

*Ε.Μ. Πολυτεχνείο*  
*Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών*  
*Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας*

**ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ  
ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ  
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΤΟΥ

**ΝΙΚΟΛΑΟΥ Π. ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΥ**

Μηχανολόγου Μηχανικού, Διπλ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2003



σταους γονείς, και στους δασκάλους





## Λίγα λόγια

Αυτή η Διδακτορική Διατριβή οφείλει πολλά στον επιβλέποντα Καθηγητή του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ κ.Σίμο Ε. Σιμόπουλο, χωρίς την ενεργή συμπαράσταση, τις ουσιαστικές παρεμβάσεις και παρατηρήσεις και τη διαρκή βοήθεια του οποίου, δεν θα είχε ολοκληρωθεί. Ευχαριστίες οφείλονται και στα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, Καθηγητές του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας κ.κ. Μ.Γ. Αγγελόπουλο, και Δ.Ι. Λεωνίδου, για την ανάθεση του θέματος, τις συμβουλές τους και την εξασφάλιση της απαραίτητης υλικοτεχνικής υποδομής. Ευχαριστίες οφείλονται επίσης στον Λέκτορα του Τομέα κ. Ε. Χίνη για τη συμβολή του στην ορθότερη διάρθρωση του κειμένου και των αποτελεσμάτων. Ο γράφων πιστεύει, ότι αυτή η εργασία συμβάλει στη καλύτερη αξιοποίηση της ήδη υπάρχουσας γνώσης σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες των ψυκτικών μέσων που είτε ήδη χρησιμοποιούνται στους λειτουργούντες Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος είτε ήδη σχεδιάζονται να χρησιμοποιηθούν στους εξελιγμένους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες 4<sup>ης</sup> Γενιάς.

Νίκος Π. Πετρόπουλος

Αθήνα, 2002



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το κείμενο αυτό αποτελεί τη Διδακτορική Διατριβή (ΔΔ) με την οποία συνεχίσθηκε η επιστημονική προσπάθεια του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. σχετικά με τις ιδιότητες των Ψυκτικών, Εργαζόμενων και Επιβραδυντικών μέσων που χρησιμοποιούνται στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος. Ηδη από το 1987 έως σήμερα έχει κατά ένα μεγάλο μέρος καλυφθεί το θέμα του ελαφρού ύδατος, με σειρά Διπλωματικών Εργασιών. Από το 1986 ξεκίνησε και η αντίστοιχη προσπάθεια για το βαρύ νερό με τη Διπλωματική Εργασία του συνάδελφου Γ.Κωστάκου, και συνεχίσθηκε στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας του γράφοντος (βλέπε σχετικά στη βιβλιογραφία).

Τις εργασίες αυτές ακολουθεί η παρούσα Διδακτορική Διατριβή, η οποία ανατέθηκε στον γράφοντα τον Δεκέμβριο του 1992. Στην πρώτη φάση της ολοκληρώθηκε η βιβλιογραφική έρευνα αφενός μεν με βάση τις βιβλιογραφικές κατευθύνσεις, που είχαν δοθεί στις σχετικές Διπλωματικές Εργασίες, αφετέρου δε και με ανάπτυξη περαιτέρω ανεξάρτητης βιβλιογραφικής αναζήτησης. Στα πλαίσια της τελευταίας εντοπίσθηκαν -όπως θέλουμε να πιστεύουμε- τα περισσότερα από τα πρόσφατα (έως και το 2001, ή και λιγότερο πρόσφατα άρθρα και δημοσιεύματα, που περιέχουν τις αναγκαίες σχέσεις, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στη διατύπωση κωδίκων Ηλεκτρονικού Υπολογιστή, ώστε να αναπαράγουν με την επιθυμητή ακρίβεια θερμοδυναμικές ιδιότητες και ιδιότητες μεταφοράς του ελαφρού ύδατος, του βαρέος ύδατος και του Νατρίου, τα οποία είναι και τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα σήμερα ψυκτικά μέσα στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος, αλλά και προβλέπεται, ιδίως το τελευταίο, να χρησιμοποιηθεί στους σχεδιαζόμενους εξελιγμένους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος της 4<sup>ης</sup> Γενιάς.

Ακολούθησε στη συνέχεια, στα πλαίσια της ΔΔ επιλογή των καταλληλότερων από εκείνα τα άρθρα και δημοσιεύματα και αξιοποιήθηκαν προς την κατεύθυνση της δημιουργίας των αριθμητικών κωδίκων που προαναφέρθηκαν. Αυτοί δέχονται σαν είσοδο τα καταστατικά θερμοδυναμικά μεγέθη πίεσεως και θερμοκρασίας και υπολογίζουν τα ειδικά μεγέθη όγκου, ενθαλπίας, εντροπίας, θερμοχωρητικότητας υπό

σταθερή πίεση και υπό σταθερό όγκο και εσωτερικής ενέργειας καθώς και τις ιδιότητες μεταφοράς, θερμική αγωγιμότητα, δυναμική συνεκτικότητα και επιφανειακή τάση, τόσο για το ελαφρύ όσο και για το βαρύ ύδωρ. Όσο αφορά τις υπολογιζόμενες θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου αυτές είναι σαφώς λιγότερες δεδομένης της έλλειψης που παρατηρείται σε κατάλληλες καταστατικές εξισώσεις και συσχετίσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς. Τονίζεται ότι όλοι οι κώδικες, για τις ιδιότητες όλων των ψυκτικών, αναπτύχθηκαν με βάση την ίδια κοινή αριθμητική και προγραμματιστική δομή ώστε να είναι δυνατόν να επεκτείνονται εύκολα και με παρόμοιο τρόπο, όταν χρειάζεται, τόσο για να υπολογίζονται και άλλες ιδιότητες όσο και για να τροποποιούνται ώστε να δέχονται ως είσοδο άλλα ζεύγη θερμοδυναμικών μεγεθών, όπως για παράδειγμα την ενθαλπία και την πίεση ή την εντροπία και τη θερμοκρασία ή την ενθαλπία και την εντροπία.

Η δομή των κωδίκων είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατόν ο χρήστης να εκμεταλλεύεται μόνο εκείνα τα τμήματά τους που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς του. Στο κείμενο της Διατριβής συμπεριλαμβάνονται λεπτομερείς οδηγίες χρήσης μαζί με πινακοποιημένες περιλήψεις που χρησιμοποιούν στην ευκολότερη αξιοποίησή των κωδίκων. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην εκμετάλλευση πιθανών δυνατότητων σύγκρισης των ιδιοτήτων του ελαφρού και του βαρέος ύδατος. Σχετικά συγκρίνονται σε αυτοτελές Κεφάλαιο οι διαφορές στην ψυκτική συμπεριφορά μεταξύ του ελαφρού και του βαρέος ύδατος μέσα σε κανάλι ψύξεως Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος προκειμένου να εξαχθούν τα πρώτα συμπεράσματα για την ασφάλεια Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος που εργάζονται με ελαφρύ ή βαρύ ύδωρ κυρίως σε ό,τι αφορά τις διαδικασίες επανάψυξης.

Ένα ξεχωριστό τμήμα της παρούσης Διατριβής αφιερώνεται στη δημοσιοποίηση των παραγόμενων κωδίκων και των αποτελεσμάτων τους μέσω του παγκόσμιου δικτυακού ιστού (World Wide Web). Μέσω της σχετικής δικτυακής εφαρμογής, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της ΔΔ στον δικτυακό εξυπηρετητή του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας (server), ο χρήστης του διαδικτύου έχει την δυνατότητα να παίρνει πληροφορίες για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του ελαφρού ύδατος, του βαρέος ύδατος και του Νατρίου για το ζευγάρι πίεσης και θερμοκρασίας που επιθυμεί. Στο πλαίσιο αυτό επίσης, οι χρήστες που επιθυμούν να λάβουν την πηγαία μορφή των κωδίκων για δική τους και όχι οποιασδήποτε μορφής

εμπορική χρήση, έχουν τη δυνατότητα να υποβάλουν σχετική αίτηση μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

Σημειώνεται ότι πολλά και σημαντικά αποτελέσματα που προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής δεν συμπεριλαμβάνονται στο παρόν κείμενο. Παρατίθεται όμως σύντομη περιγραφή των υπόψιν αποτελεσμάτων και δυνατοτήτων που παρέχονται μέσα από αυτά. Ο γράφων έχει ήδη ξεκινήσει και αναμένεται σύντομα η δημοσιοποίηση των υπόψιν αποτελεσμάτων είτε στο παγκόσμιο δικτυακό ιστό, είτε σε διεθνώς ανγνωρισμένα επιστημονικά περιοδικά, ανάλογα με την περίπτωση.

Το κυρίως κείμενο της ΔΔ συνοδεύεται από το Βιβλιογραφικό Παράρτημα που περιέχει κατάλογο όλων των άρθρων και δημοσιευμάτων που αναφέρονται και χρησιμοποιούνται.

Σε ειδικό τεύχος Παραρτημάτων παρατίθενται τέσσερα Παραρτήματα (τα I,II,III και IV), στα οποία περιλαμβάνονται τα κείμενα όλων των κωδίκων που αναπτύχθηκαν.



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

### **Κεφάλαιο 1**

#### **ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

### **Κεφάλαιο 2**

#### **ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

### **Κεφάλαιο 3**

#### **ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ ΙΣΧΥΟΣ**

### **Κεφάλαιο 4**

#### **ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΛΑΦΡΟΥ ΥΔΑΤΟΣ**

### **Κεφάλαιο 6**

#### **ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΝΑΤΡΙΟΥ**

### **Κεφάλαιο 7**

#### **ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΡΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΒΑΡΕΟΣ ΥΔΑΤΟΣ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΨΥΞΕΩΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΙΣΧΥΟΣ**

### **Κεφάλαιο 8**

#### **ΔΗΜΟΣΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΚΩΔΙΚΩΝ, LIGHT\_WASP, HEAVY\_WASP ΚΑΙ SODIUM\_LISP ΣΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΔΙΚΤΥΑΚΟ ΙΣΤΟ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ**

### **Κεφάλαιο 9**

#### **ΠΑΡΑΠΛΕΥΡΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣ ΔΗΜΟΣΙΟΠΟΙΗΣΗ**

#### **Βιβλιογραφικό Παράρτημα**

#### **ΤΕΥΧΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ**





## ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

α.α.κ.	αρχή αντιστοιχουσών καταστάσεων
Α.Ε.Ι.	Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
β.υ.	βαρύ ύδωρ (μονοξείδιο του Δευτερίου)
Δ.Δ.	Διδακτορική Διατριβή
Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.	Εθνικό Κέντρο Ερευνών Φυσικών Επιστημών
Ε.Ι.Ε.	Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών
Ε.Κ.Τ	Εθνικό Κέντρο Τεκμηρίωσης
Ε.Μ.Π.	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ε.υ.	ελαφρύ ύδωρ (μονοξείδιο του Η)
κ.ά.	και άλλα
κ.ε.	καταστατική εξίσωση ή και εξής
κτλ	και τα λοιπά
ΟΟΣΑ	Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας & Ανάπτυξης
Π.Α.Ι.	Πυρηνικός Αντιδραστήρας Ισχύος
ΠΗΣ	Πυρηνοληκτρικός Σταθμός
π.χ.	παραδείγματος χάριν
ΣΠΑ	Σύστημα Πυρηνικής Ατμοπαραγωγής
Σ.Σ.	Σημείωση Συντάκτη
Τ.Ε.Ε.	Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας
Τ.Ε.Ι.	Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Τ.Θ.	Τομέας Θερμοτήτας
Τ.Π.Τ.	Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
ΨΜ	Ψυκτικό Μέσο



## ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

(χρήσιμες κυρίως στη βιβλιογραφική μελέτη)

AEC	Atomic Energy Committee
AECL	Atomic Energy of Canada Limited
AECU	U.S. Atomic Energy Commission
AERE	Atomic Energy Research Establishment
AICHE	American Institution of Chemical Engineers
ANL	Argonne National Laboratory
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BWK	Brennstoff-Waerme-Kraft (επιστημονικό περιοδικό)
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	CANada Deuterium Uranium
CEA	Commissariat a l'Energie Atomique
CISE	Centro Informazioni Studi Esperienze (Κέντρο Πληροφοριών Πειραματικών Μελετών)
C.P.	Critical Point (Κρίσιμο Σημείο)
eos	equation of state
et al.	και άλλοι, και συνεργάτες (στα Λατινικά)
EURAEC	European Atomic Energy Committee (αλλιώς: EURATOM)
H.W.	Heavy Water
HWGCR	Heavy Water Gas Cooled Reactor
HWLWR	Heavy Water Light Water Reactor
IAPWS	International Association for the Properties of Water and Steam
ICPS	International Conference on the Properties of Steam (οργανώνεται από την IAPWS)
IFC	International Formulation Committee
IPTS 48	International Practical Temperature Scale of 1948
IPTS 68	International Practical Temperature Scale of 1968
JSME	Japan Society of Mechanical Engineers

LMFBR	Liquid Metal Fast Breeder Reactor
L.W.	Light Water
LOCA	Loss of Coolant Accident
LOFA	Loss of Fluid Accident
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBS	National Bureau of Standards
NSSS	Nuclear Steam Supply System
No.	number
Nr.	Nummer
p.	page
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor
PWR	Pressurized Water Reactor
SGHWR	Steam Generating Heavy Water Reactor
SI	Systeme Internationale (Διεθνές Σύστημα Μονάδων)
USAEC	United States Atomic Energy Committee
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Ενωση Γερμανών Μηχανικών)
vol.	volume

## ΣΥΜΒΟΛΑ - ΜΟΝΑΔΕΣ

### Μεταβλητές

B <sub>2</sub>	δεύτερος συντελεστής αμοιβαίων δράσεων σε m <sup>3</sup> /kg
B <sub>3</sub>	τρίτος συντελεστής αμοιβαίων δράσεων σε m <sup>6</sup> /kg <sup>2</sup>
B <sub>4</sub>	τέταρτος συντελεστής αμοιβαίων δράσεων σε m <sup>9</sup> /kg <sup>3</sup>
c	ειδική θερμοχωρητικότητα σε kJ/(kgK)
G	ειδική ελεύθερη ενθαλπία (συνάρτηση Gibbs, Gibbs potential) σε kJ/kg
g	επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/sec <sup>2</sup>
h	ειδική ενθαλπία σε kJ/kg
η	δυναμική συνεκτικότητα σε kg/(ms) ή Pas
ξ	μέση αύξηση της ληθαργίας
κ	κρίσιμος συντελεστής
λ	θερμική αγωγιμότητα σε W/(mK)
L	συντελεστής Laplace σε m
P	πίεση σε bar
Pr	αριθμός Prandtl
r	λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης σε kJ/kg
R	ειδική σταθερή αερίου σε kJ/(kgK)
ρ	πυκνότητα σε 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> (ισοδύναμα σε gr/cm <sup>3</sup> )
s	ειδική εντροπία σε kJ/(kgK)
Σσε	μακροσκοπική ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης
σ	επιφανειακή τάση σε N/m <sup>2</sup>
t	θερμοκρασία σε βαθμούς °C (Centigrade)
T	απόλυτη θερμοκρασία σε μονάδες K (Kelvin)
u	ειδική εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg
v	ειδικός όγκος σε 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /kg (ισοδύναμα σε cm <sup>3</sup> /gr)
Ψ	ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια (συνάρτηση Helmholtz) σε kJ/kg
z	συντελεστής συμπιεστότητας



## Δείκτες

1	υγρή φάση ελαφρού ύδατος (υποπεριοχή 1)
2	ατιώδης φάση ελαφρού ύδατος (υποπεριοχή 2)
c	κρίσιμος[-η,-ο] (critical)
f	υγρό (fluid)
fs	κορεσμένο υγρό (saturated fluid)
fu	τήξη (fusion)
g	ατμός (gas)
gs	κορεσμένος ατμός (saturated steam)
id	ιδανικό (ideal) αέριο
l	υγρό (liquid)
m	δηλωτικό του σημείου τήξεως (melting point)
max	maximum
o	αναφορά ή/και ιδανικό/τέλειο αέριο
obs	παρατηρούμενος[-η,-ο]/μετρούμενος[-η,-ο] (observed)
P	υπό σταθερή πίεση (by constant pressure, isopiestic, isobaric)
R	αναφορά (Reference)
r	ανηγμένος[-η,-ο] (reduced)
s	κορεσμός (saturation)
so	στερεό (solid)
su	εξάχνωση (sublimation)
t	στο τριπλό σημείο (at the triple point)
T	υπό σταθερή θερμοκρασία (by constant temperature, isothermal)
v	ατμός (vapour) / υπό σταθερό όγκο (by constant volume, isochoric)

## Παρατήρηση

Πέρα από τους προηγούμενους δείκτες χρησιμοποιούνται και αρκετοί λογικοί συνδυασμοί τους. Οι συνδυασμοί αυτοί ποτέ δεν υπερβαίνουν τους τρεις δείκτες και χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στον κατανοητό συμβολισμό θερμοδυναμικών μεγεθών που ορίζονται μόνο περιφραστικά. Για παράδειγμα το μέγεθος "ειδική ανηγμένη ενθαλπία του κορεσμένου υγρού" συμβολίζεται με σύμφωνα με τα παραπάνω ως  $h_{\text{rfs}}$ .





## **Εκθέτες**

' πρώτη παράγωγος

" δεύτερη παράγωγος

## **ΣΥΜΒΑΣΕΙΣ - ΜΕΤΑΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΙ**

Η υποδιαστολή των δεκαδικών αριθμών σημειώνεται πάντοτε με την τελεία " . " .

Στη συνέχεια αυτής της εργασίας όλες οι προηγούμενες μεταβλητές θα έχουν τις μονάδες που σημειώνονται πιο πάνω, εκτός αν αναφέρεται σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις διαφορετικά.

Οι θερμοκρασίες είτε αυτές γράφονται στην κλίμακα Κελσίου είτε στην απόλυτη κλίμακα ακολουθούν τη Διεθνή Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασιών που καθορίσθηκε το 1968 αν γενικά χρησιμοποιούνται σε εξισώσεις και πίνακες που δημοσιεύθηκαν μετά το τέλος της δεκαετίας του 1960, εκτός αν αναφέρεται ότι χρησιμοποιείται η παλαιότερη Διεθνής Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασιών του 1948. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται σε εξισώσεις και πίνακες που δημοσιεύθηκαν πριν το 1968 ακολουθούν οπωσδήποτε τη Διεθνή Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασιών του 1948. Η Διεθνής Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασιών του 1990 δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή.

Τα φωνήεντα a με διαλυτικά (umlaut), ο με διαλυτικά και u με διαλυτικά της γερμανικής γλώσσας αντικαθίστανται από τους διφθόγγους ae, oe και ue της αγγλικής αντίστοιχα.

Διαγράμματα και Πίνακες βρίσκονται συγκεντρωμένα στο τέλος κάθε Κεφαλαίου στο οποίο χρησιμοποιούνται.



## ΣΥΝΤΟΜΟ ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ ΣΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΑΓΓΛΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΡΜΑΝΙΚΑ

Αρχή Αντιστοιχουσών Καταστάσεων

Corresponding States Law (Theorem)

Gesetz der Korrespondierenden Zustände (Korrespondenzprinzip)

Ατμώδης Φάση

Gas Phase

Dampförmige Phase

Ειδική Θερμοχωρητικότητα

Specific Heat

Spezifische Wärme

Ειδικός Όγκος

Specific Volume

Spezifisches Volumen

Ενθαλπία

Enthalpy

Enthalpie

Εντροπία

Entropy

Entropie

Εξίσωση Κορεσμού

(Saturation) Vapour Pressure Equation

Dampfdruckgleichung (Dampfdruckkurve)

Επιφανειακή Τάση

Surface Tension

Oberflächenspannung

Θερμική Αγωγιμότητα

Thermal Conductivity

Wärmeleitfähigkeit

Θερμοδυναμικές Ιδιότητες

Thermodynamic Properties

Thermodynamische Eigenschaften (Zustandsgrößen, Stoffwerte)

Θερμοκρασία

Temperature

Temperatur
Ιδιότητες Μεταφοράς
Transport Properties
Transporteigenschaften (Transportgrößen, Stoffwerte)
Καταστατική Εξίσωση
Equation of State
Zustandsgleichung
Κρίσιμο Σημείο
Critical Point
Kritischer Punkt
Πίεση
Pressure
Druck
Πυκνότητα
Density
Dichte
Συνεκτικότητα
Viscosity
Viskosität
Συντελεστής Αμοιβαίων Δράσεων
Virial Coefficient
Τριπλό Σημείο
Triple Point
Υγρή Φάση
Liquid Phase
Φυεσσιγή Φάση
Fluessige Phase

# 1. ANTIKEIMENO THΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ANTIKEIMENO THΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ .....	1-1
1.1 Εισαγωγή.....	1-1
1.2 Συνοπτική περιγραφή 1 <sup>ου</sup> και 2 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.....	1-2
1.3 Συνοπτική περιγραφή 3 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.....	1-3
1.4 Συνοπτική περιγραφή 4 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.....	1-3
1.5 Συνοπτική περιγραφή 5 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.....	1-4
1.6 Συνοπτική περιγραφή 6 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.....	1-4
1.7 Συνοπτική περιγραφή 7 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.....	1-5
1.8 Συνοπτική περιγραφή 8 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.....	1-6
1.9 Συνοπτική περιγραφή 9 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.....	1-7
1.10 Βιβλιογραφικό Παράρτημα.....	1-8
1.11 Τεύχος Παραρτημάτων.....	1-8



### ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

#### 1.1 Εισαγωγή.

Αντικείμενο της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής είναι η ανάπτυξη κωδίκων για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων μεταφοράς των κυριότερων ψυκτικών μέσων που χρησιμοποιούνται σήμερα στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος. Ως τέτοια προσδιορίζονται, το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ και το υγρό Νάτριο, το οποίο αναμένεται μάλιστα να είναι το κυριότερο ψυκτικό μέσο των αντιδραστήρων 4<sup>ης</sup> γενιάς, που σχεδιάζεται να έχουν διατεθεί για εμπορική εκμετάλλευση μέχρι το 2030. Οι αναπτυσσόμενοι κώδικες βασίζονται σε σύγχρονες σχετικές εξισώσεις υπολογισμού και συνακόλουθες αριθμητικές μεθοδολογίες των υπόψιν ιδιοτήτων, που διατυπώθηκαν την τελευταία δεκαπενταετία και οι οποίες με είσοδο την πίεση και τη θερμοκρασία δίνουν αποτελέσματα για όλες τις ιδιότητες με ακρίβεια που συμφωνεί με δημοσιευμένους έγκριτους πίνακες. Επιδιώχθηκε οι κώδικες να υλοποιηθούν με πρόνοια φιλικότητας και αλληλεπίδρασης, για το χρήστη που θέλει να πάρει τα αποτελέσματά τους και στο επίπεδο της δικής του εφαρμογής. Δίνεται επίσης, η δυνατότητα, σε χρήστες που επιθυμούν, να χρησιμοποιήσουν τους κώδικες μέσω του διαδικτύου, χρησιμοποιώντας σχετική δικτυακή εφαρμογή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της Διατριβής.

Σημειώνεται ότι τόσο για το βαρύ ύδωρ, όσο και για το Νάτριο, δεν υπάρχουν ακόμα σχετικοί δημοσιευμένοι κώδικες. Συνακόλουθα εννοείται βεβαίως ότι η δικτυακή εφαρμογή για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος και του Νατρίου αποτελεί την πρώτη δημοσιοποίηση τέτοιων αποτελεσμάτων στα πλαίσια του παγκόσμιου δικτυακού ιστού.

Τονίζεται ότι όλοι οι κώδικες, για τις ιδιότητες όλων των ψυκτικών, αναπτύχθηκαν με βάση την ίδια κοινή αριθμητική και προγραμματιστική δομή ώστε να είναι δυνατόν να επεκτείνονται εύκολα και με παρόμοιο τρόπο, όταν χρειάζεται, τόσο για να υπολογίζονται και άλλες ιδιότητες όσο και για να τροποποιούνται ώστε να δέχονται ως είσοδο άλλα ζεύγη θερμοδυναμικών μεγεθών, όπως για παράδειγμα την ενθαλπία και την πίεση ή την εντροπία και τη θερμοκρασία ή την ενθαλπία και την εντροπία.

Σημαντική πρωτοτυπία και ενδιαφέροντα αποτελέσματα προέκυψαν στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής σε ό,τι αφορά στη σύγκριση της ψυκτικής συμπεριφοράς του

ελαφρού και του βαρέος ύδατος κατά τη διαδικασία επανάψυξης σε τυποποιημένο κανάλι ψύξεως Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος, το οποίο έχει υποστεί ατύχημα αλώλειας ψυκτικού. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται ότι αν η πίεση που επικρατεί στο κανάλι κατά την έναρξη της επανάψυξης είναι κάτω από 25 bar, ο χρόνος επανάψυξης με τη χρήση βαρέος ύδατος μπορεί να είναι μικρότερος από ό,τι του ελαφρού. Η διαπίστωση αυτή γίνεται για πρώτη φορά, όπως επαληθεύεται και από τα μέχρι στιγμής δημοσιεύματα στα σχετικά επιστημονικά περιοδικά και είναι ενδεχόμενο, μετά από περαιτέρω διερεύνηση, να οδηγήσει σε κατασκευαστική αναθεώρηση ορισμένων από τα συστήματα εκτάκτου ψύξεως πυρήνα των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος.

Επίσης, η παρούσα Διδακτορική Διατριβή οδήγησε και σε παράπλευρα αποτελέσματα και εφαρμογές, οι οποίες είναι ήδη ώριμες για δημοσιοποίηση. Ειδικά αναφέρεται, ότι στο πλαίσιο των κωδίκων ετοιμάστηκε και ελέγχεται κώδικας για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του  $T_2O$ , ο οποίος βασίζεται στις εξισώσεις υπολογισμού των σχετικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος και σε εύλογες παραδοχές. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα για την εκμετάλλευση του πλεονεκτήματος της εύκολης τροποποίησης των κωδίκων ώστε να δέχονται ως είσοδο περισσότερα του ενός διαφορετικά ζεύγη θερμοδυναμικών μεγεθών. Στα πλαίσια των προς δημοσίευση αντίστοιχων εφαρμογών, στοιχεία των οποίων δίνονται στο 9<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, διατυπώνονται για το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ συσχετίσεις που συνδέουν κατά ευθύ και αντίστροφο τρόπο ζεύγη από τις κυριότερες θερμοδυναμικές ιδιότητες για την υγρή και την αμώδη φάση κορεσμού. Πιστεύεται ότι, με βάση την τρέχουσα βιβλιογραφία, οι εν λόγω συσχετίσεις είναι επιστημονικά πρωτότυπες και θα εξηγητήσουν την ερευνητική κοινότητα όταν δημοσιοποιηθούν.

## **1.2 Συνοπτική περιγραφή 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.**

Το 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της Διδακτορικής Διατριβής περιλαμβάνει στην ουσία μία συνοπτική περιγραφή του συνόλου της εργασίας.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο συνοψίζονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και οι ιδιότητες μεταφοράς που είναι απαραίτητες για τη θερμοδυναμική ανάλυση των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος (ΠΑΙ). Περιγράφονται επιπλέον γενικά οι μορφές των εξισώσεων των οποίων υπολογίζονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και οι ιδιότητες μεταφοράς. Επίσης, παρουσιάζεται η κατάταξη των εξισώσεων αυτών σε θεωρητικές, γενικευμένες και ειδικές και αναλύεται η έννοια της θερμοδυναμικής συνέπειας ως σύγχρονη απαίτηση για τις εξισώσεις αυτών των ιδιοτήτων.



Αναπτύσσονται περαιτέρω θέματα σχετικά με τις μεθόδους διατύπωσης εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς, ανάλογα και με την ποσότητα και την ποιότητα των αντίστοιχων πειραματικών αποτελεσμάτων, και εξετάζονται οι περιορισμοί στους οποίους πρέπει να υπακούουν οι διατυπώσεις αυτές. Ακόμα αναλύονται οι τρόποι με τους οποίους γίνεται ο έλεγχος της ακρίβειας των εξισώσεων για τις ιδιότητες και παρουσιάζονται οι έννοιες "ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης" και "ακρίβεια επιστημονικής και γενικής χρήσης". Το σύνολο των στοιχείων και σχολίων που συμπεριλαμβάνονται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο χρησιμεύει για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό των εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και ιδιότητες μεταφοράς των ψυκτικών μέσων των ΠΑΙ που θα παρουσιασθούν στα επόμενα Κεφάλαια της Διδασκατορικής Διατριβής.

### **1.3 Συνοπτική περιγραφή 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδασκατορικής Διατριβής.**

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι διαθέσιμες εξισώσεις για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων μεταφοράς για το ελαφρύ, ύδωρ, το βαρύ ύδωρ και το υγρό Νάτριο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση κωδικών υπολογισμών αυτών των ιδιοτήτων. Τα τρία αυτά ψυκτικά είναι εκείνα που εκπληρώνουν τις περισσότερες προϋποθέσεις για την κάλυψη των ψυκτικών (και στις περιπτώσεις του ελαφρού και του βαρέος ύδατος και των επιβραδυντικών) αναγκών των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος, προκειμένου να επιτυγχάνεται με την απαιτούμενη ασφάλεια και απόδοση η αξιολογότερη σήμερα ειρηνική πρακτική εφαρμογή της Πυρηνικής Ενέργειας: η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

### **1.4 Συνοπτική περιγραφή 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδασκατορικής Διατριβής.**

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο κώδικας Ηλεκτρονικού Υπολογιστή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διδασκατορικής Διατριβής για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος. Στα πλαίσια του αναπτυχθέντος κώδικα οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ε.υ. υπολογίζονται για δεδομένη πίεση P και θερμοκρασία T. Αρχικά αναφέρονται συνοπτικά οι σχέσεις εκείνες που θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες, και ακριβείς για τη σύνταξη του κώδικα, και οι οποίες παρουσιάσθηκαν ήδη στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Στη συνέχεια διατυπώνεται η κοινή περιοχή ισχύος όλων των χρησιμοποιούμενων σχέσεων. Ο κώδικας συντάχθηκε σε γλώσσα FORTRAN 77, κάτω από το Λειτουργικό Σύστημα UNIX HP-UX 7.05 B, το οποίο υποστηρίζεται από τον super-mini H/Y του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας HP 9000/380. Για τη συγκρότηση του κώδικα ακολουθήθηκαν αρχές δομημένου προγραμματισμού, προκειμένου να εξασφαλίζεται α) ευκολία στη χρήση, β)

ευκολία στην τροποποίηση γ) ευκολία στη μετατροπή του κώδικα προκειμένου να μπορεί να εφαρμόζεται για άλλη έκδοση της γλώσσας FORTRAN ή/και για άλλο λειτουργικό σύστημα ή/και σε άλλου τύπου ηλεκτρονικό υπολογιστή, και τέλος δ) συμβατότητα στον τρόπο ανάπτυξης και στον τρόπο λειτουργίας με τον αντίστοιχο κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

### **1.5 Συνοπτική περιγραφή 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.**

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο κώδικας Ηλεκτρονικού Υπολογιστή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος. Στα πλαίσια του αναπτυχθέντος κώδικα οι θερμοφυσικές ιδιότητες του β.υ. υπολογίζονται –όπως και για την περίπτωση του ελαφρού ύδατος- για δεδομένη πίεση P και θερμοκρασία T. Αρχικά αναφέρονται συνοπτικά οι σχέσεις εκείνες που θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες, και ακριβείς για τη σύνταξη του κώδικα, και οι οποίες παρουσιάστηκαν ήδη στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Στη συνέχεια διατυπώνεται η κοινή περιοχή ισχύος όλων των χρησιμοποιούμενων σχέσεων. Ο κώδικας συντάχθηκε σε γλώσσα FORTRAN 77, κάτω από το Λειτουργικό Σύστημα UNIX HP-UX 7.05 B, το οποίο υποστηρίζεται από τον super-mini H/Y του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας HP 9000/380. Για τη συγκρότηση του κώδικα ακολουθήθηκαν οι αρχές δομημένου προγραμματισμού, που ακολουθήθηκαν και κατά τη συγκρότηση του κώδικα του ελαφρού ύδατος. Εξασφαλίζεται και εδώ η συμβατότητα στον τρόπο ανάπτυξης και στον τρόπο λειτουργίας με τον αντίστοιχο κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Σημειώνεται ότι αντίστοιχοι εμπορικοί κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος δεν είναι σήμερα διαθέσιμοι στην αγορά.

### **1.6 Συνοπτική περιγραφή 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.**

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο κώδικας Ηλεκτρονικού Υπολογιστή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του νατρίου (Na). Στα πλαίσια του αναπτυχθέντος κώδικα οι θερμοφυσικές ιδιότητες του νατρίου υπολογίζονται –όπως και για τις περιπτώσεις του ελαφρού ύδατος και του βαρέος ύδατος- για δεδομένη πίεση P και θερμοκρασία T. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες (κυρίως πυκνότητα, ενθαλπία, ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και υπό σταθερό όγκο) στις καταστάσεις κορεσμένου υγρού και ατμού και για τις ιδιότητες μεταφοράς (θερμική αγωγιμότητα,

δυναμική συνεκτικότητα και επιφανειακή τάση) στην υγρή φάση. Αρχικά αναφέρονται συνοπτικά οι σχέσεις εκείνες που θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες, και ακριβείς για τη σύνταξη του κώδικα, και οι οποίες παρουσιάστηκαν ήδη στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Στη συνέχεια διατυπώνεται η κοινή περιοχή ισχύος όλων των χρησιμοποιούμενων σχέσεων. Ο κώδικας συντάχθηκε σε γλώσσα FORTRAN 77, κάτω από το Λειτουργικό Σύστημα UNIX HP-UX 7.05 B, το οποίο υποστηρίζεται από τον super-mini H/Y του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας HP 9000/380. Για τη συγκρότηση του κώδικα ακολουθήθηκαν οι ίδιες αρχές δομημένου προγραμματισμού, που ακολουθήθηκαν και για τη σύνταξη των κωδίκων του ελαφρού και του βαρέος ύδατος προκειμένου να εξασφαλίζεται α) ευκολία στη χρήση, β) ευκολία στην τροποποίηση γ) ευκολία στη μετατροπή του κώδικα προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί για άλλη έκδοση της γλώσσας FORTRAN ή/και για άλλο λειτουργικό σύστημα ή/και σε άλλου τύπου ηλεκτρονικό υπολογιστή, και τέλος δ) συμβατότητα –κατά το δυνατόν– στον τρόπο ανάπτυξης και στον τρόπο λειτουργίας με τους αντίστοιχους κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος και του βαρέος ύδατος. Σημειώνεται ότι αντίστοιχοι εμπορικοί κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Na δεν είναι σήμερα διαθέσιμοι στην αγορά.

## 1.7 Συνοπτική περιγραφή 7<sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.

Στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της Διδακτορικής Διατριβής πραγματοποιείται μέρος της ανάλυσης της θερμοϋδραυλικής συμπεριφοράς ενός Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος για δύο περιπτώσεις ψυκτικού μέσου: του ελαφρού ύδατος και του βαρέος ύδατος. Υπενθυμίζεται ότι η ανάλυση της θερμοϋδραυλικής συμπεριφοράς ενός Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος αποτελεί ένα από τα κυριότερα προβλήματα σχεδιάσεώς του, εξαιρετικά βασικό και δυσεπίλυτο, δεδομένου ότι εμπλέκεται η μελέτη των μηχανισμών μεταδόσεως της θερμότητας από τον πυρήνα του αντιδραστήρα προς το ψυκτικό (εργαζόμενο) μέσο και το περιβάλλον, σε συσχετισμό με τους καθαρά πυρηνικούς μηχανισμούς παραγωγής της ενέργειας στο όλο σύστημα. Το μέρος της ανάλυσης που εφαρμόζεται εστιάζει το ενδιαφέρον της στα όσα συμβαίνουν στο δυσμενέστερο από άποψη θερμικής φόρτισης κανάλι του πυρήνα του αντιδραστήρα. Με δεδομένα τα γεωμετρικά στοιχεία και τα υλικά του καναλιού και του ψυκτικού μέσου και με τη χρήση εύλογων παραδοχών υπολογίζονται για τα δύο ψυκτικά (το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ): (α) Η θερμοκρασία του περιβλήματος της ράβδου του καυσίμου μετά το LOCA και πριν την έναρξη της επανανύξεως για διάφορες τιμές της πίεσεως P και του χρόνου από τη στιγμή του ατυχήματος μέχρι την ενεργοποίηση του Συστήματος Εκτάκτου Ψύξεως του Πυρήνα του Αντιδραστήρα (ECCS – Emergency Core Cooling System) και (β) ο

αντίστροφος ρυθμός επαναψύξεως και ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη επαναψύξη του καναλιού, για διάφορες τιμές της πίεσης, της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού στο κανάλι και της παροχής του ψυκτικού. Τα προκύπτοντα αποτελέσματα συγκρίνονται τόσο για τα δύο ψυκτικά και με ανάλογη μοναδική εργασία που έχει δημοσιευθεί για τη σύγκριση της ψυκτικής συμπεριφοράς του ελαφρού και του βαρέος ύδατος. Για πρώτη φορά διαπιστώνεται ότι ο χρόνος επαναψύξης για πιέσεις κάτω από 25 bar είναι μικρότερος αν η επανάψυξη γίνεται με βαρύ ύδωρ αντί για ελαφρύ.

## 1.8 Συνοπτική περιγραφή 8<sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.

Στο Κεφάλαιο αυτό της Διδακτορικής Διατριβής περιγράφεται η εφαρμογή της διάθεσης των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων μεταφοράς του ελαφρού ύδατος, του βαρέος ύδατος και του Νατρίου μέσω του παγκόσμιου δικτυακού ιστού (world wide web), όπως αυτή αναπτύχθηκε στον δικτυακό εξυπηρετητή (server) του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας. Η εφαρμογή περιλαμβάνει τρία διακριτά συνεργαζόμενα μέρη: (α) τμήματα γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού html, (β) τμήματα γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού perl και τέλος (γ) εκτελέσιμα αρχεία υπολογισμού των ιδιοτήτων των ψυκτικών μέσων που ενδιαφέρουν, τα οποία φυσικά βασίζονται στους κώδικες LIGHT\_WASP, HEAVY\_WASP και SODIUM\_LISP, όπως αυτοί περιγράφονται στα προηγούμενα τρία Κεφάλαια.

Συνοπτικά η εφαρμογή μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Μέσα από ειδικές σελίδες html, δημοσιευμένες στον δικτυακό τόπο του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, ο δικτυακός χρήστης οδηγείται με φιλικό τρόπο να υποβάλει φόρμα υπολογισμού των ιδιοτήτων του ψυκτικού μέσου που τον ενδιαφέρει. Η φόρμα δέχεται ως είσοδο την πίεση και την θερμοκρασία, στην οποία ο δικτυακός χρήστης θέλει να γίνουν οι υπολογισμοί. Στη συνέχεια και μέσω εφαρμογής σε γλώσσα perl, τα δεδομένα εισόδου εισάγονται σε αρχείο δεδομένων και παραλαμβάνονται από το αντίστοιχο εκτελέσιμο αρχείο ιδιοτήτων για το ψυκτικό μέσο που ενδιαφέρει. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν εισάγονται με τη σειρά τους σε αρχείο αποτελεσμάτων από όπου παραλαμβάνονται από την εφαρμογή σε γλώσσα perl, η οποία ακολούθως δημιουργεί σελίδες html με τα αποτελέσματα του κώδικα, οι οποίες δημοσιοποιούνται με ευπαρουσίαστο τρόπο αυτόματα στην οθόνη του δικτυακού χρήστη. Ο χρόνος που μεσολαβεί από την υποβολή της φόρμας μέχρι τη δημοσιοποίηση του αποτελέσματος είναι εξαιρετικά σύντομος (<1s για το εσωτερικό δίκτυο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου). Η εφαρμογή συνοδεύεται από δικτυακή ιστοσελίδα σε html, όπου διατυπώνονται οι απαραίτητοι περιορισμοί που εξασφαλίζουν στους συγγραφείς των σελίδων και των κωδίκων, στοιχειώδη νομική προστασία εξαιτίας αθέλητων λαθών στα

αποτελέσματα, καθώς και οι περιορισμοί από το copyright αυτών των δημοσιεύσεων στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό.

## 1.9 Συνοπτική περιγραφή 9<sup>ου</sup> Κεφαλαίου της Διδακτορικής Διατριβής.

Στο 9<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφονται τα παράπλευρα αποτελέσματα και οι εφαρμογές στις οποίες οδήγησε η παρούσα Διδακτορική Διατριβή και οι οποίες είναι ήδη ώριμες για δημοσιοποίηση. Ειδικά αναφέρεται, ότι στο πλαίσιο των κωδίκων είναι πρακτικά έτοιμος και κώδικας για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του T<sub>2</sub>O, ο οποίος βασίζεται στις εξισώσεις υπολογισμού των σχετικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος και σε εύλογες παραδοχές. Ο κώδικας αυτός στην τελική του μορφή θα υπολογίζει θερμοδυναμικές ιδιότητες και ιδιότητες μεταφοράς για το T<sub>2</sub>O για δεδομένη πίεση P και θερμοκρασία T. Από την παγκόσμια δημοσιευμένη βιβλιογραφία δεν φαίνεται μέχρι σήμερα (2002) να έχουν διατυπωθεί τέτοιοι κώδικες για δύο κυρίως λόγους: (α) είναι πολύ δύσκολο να εξασφαλισθεί έτσι και μικρή ποσότητα του σχετικού υλικού ώστε να ληφθούν πειραματικά αποτελέσματα για τις θερμοδυναμικές και τις ιδιότητες μεταφοράς του και (β) έχει υπολογισθεί ότι παγκοσμίως το υπάρχον T<sub>2</sub>, το οποίο παράγεται με φυσικό τρόπο στο γήινο περιβάλλον είναι μόλις 7.3 kg (το 10<sup>-18</sup>% του υδρογόνου που απαντάται στη φύση). Παρόλαυτά, επιστημαίνεται ότι η ανάπτυξη ενός τέτοιου κώδικα παρουσιάζει ενδιαφέρον δεδομένου ότι το T<sub>2</sub>O που παράγεται με τεχνητό τρόπο στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος είναι γενικά ρυπαντής του ψυκτικού ύδατος του αντιδραστήρα, είτε αυτό είναι ελαφρύ είτε βαρύ ύδωρ, και επιπλέον είναι άγνωστες (εικάζονται μόνο) οι ποσότητες του T<sub>2</sub> και επομένως και του T<sub>2</sub>O που υπάρχουν σήμερα στον πλανήτη και χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του πυρηνικού οπλοστασίου των υδρογονοβομβών.

Σε σχέση με τα λοιπά παράπλευρα αποτελέσματα και τις εφαρμογές που προκύπτουν από αυτή τη Διδακτορική Διατριβή αναφέρεται επιπλέον, ότι οι κώδικες για τις ιδιότητες αναπτύχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να επεκτείνονται εύκολα όταν χρειάζεται τόσο ώστε να υπολογίζονται και άλλες ιδιότητες όσο και να τροποποιούνται για να δέχονται ως είσοδο άλλα θερμοδυναμικά μεγέθη, όπως για παράδειγμα την ενθαλπία και την πίεση ή την εντροπία και τη θερμοκρασία ή την ενθαλπία και την εντροπία παρουσιάζεται η δυνατότητα για την εν καιρώ εκμετάλλευση αυτού του πλεονεκτήματος. Στα πλαίσια της υπό ανάπτυξη σχετικής εφαρμογής έχουν προετοιμασθεί για το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ συσχετίσεις που συνδέουν κατά ευθύ και αντίστροφο τρόπο για την υγρή και την ατμώδη φάση κορεσμού:

- την εντροπία κορεσμού με τη θερμοκρασία κορεσμού, και
- την πίεση κορεσμού με την πυκνότητα κορεσμού

Πιστεύεται ότι, όπως αναφέρθηκε και στην § 1.1, με βάση την τρέχουσα βιβλιογραφία, οι εν λόγω συσχετίσεις είναι επιστημονικά πρωτότυπες και θα εξυπηρετήσουν την ερευνητική κοινότητα όταν δημοσιολογηθούν. Συγκεκριμένα αν είναι  $x$ ,  $y$  και  $z$  τα καταστατικά μεγέθη πίεσης, θερμοκρασίας και ειδικού όγκου, οι συσχετίσεις αυτές υλοποιούμενες στο σύνολο της εφαρμογής θα εξυπηρετήσουν ειδικά ώστε όταν ο χρήστης ενός κώδικα ιδιοτήτων επιθυμεί αντί η είσοδος να είναι μόνο ένα ζεύγος (καταστατικό μέγεθος  $x$ , καταστατικό μέγεθος  $y$ ) να παρέχεται και η δυνατότητα η είσοδος να είναι και:

- ένα ζεύγος του τύπου (καταστατικό μέγεθος  $x$ , καταστατικό μέγεθος  $z$ ) ή και
- ένα ζεύγος του τύπου (καταστατικό μέγεθος  $y$ , καταστατικό μέγεθος  $z$ ),

ή και

- ένα ζεύγος του τύπου (θερμοδυναμική ιδιότητα  $q$ , θερμοδυναμική ιδιότητα  $v$ ) ή και
- ένα ζεύγος του τύπου (θερμοδυναμική ιδιότητα  $q$ , καταστατικό μέγεθος  $x, y$  ή  $z$ ) κ.ο.κ.

και το αποτέλεσμα να συμπεριλαμβάνει τις υπόλοιπες θερμοφυσικές ιδιότητες και τα υπόλοιπα καταστατικά μεγέθη. Παρόμοιου τύπου εφαρμογές δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα ούτε για το βαρύ ύδωρ, ούτε για το Νάτριο. Για την περίπτωση του ελαφρού ύδατος, μόλις το 2001 δημοσιεύτηκαν εξισώσεις για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες που επιτρέπουν είσοδο σε κώδικες ιδιοτήτων με περισσότερα από ενός τύπου ζεύγη καταστατικών μεγεθών, ή θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.

## **1.10 Βιβλιογραφικό Παράρτημα.**

Το Βιβλιογραφικό Παράρτημα στο τέλος του κυρίως κειμένου της  $\Delta\Delta$ , περιλαμβάνει όλα τα άρθρα και τα δημοσιεύματα που χρησιμοποιήθηκαν ή αναφέρονται. Η ταξινόμηση των άρθρων και των δημοσιευμάτων είναι αλφαβητική κατά το επώνυμο του πρώτου συγγραφέα. Στο κείμενο της  $\Delta\Delta$ , τα άρθρα και τα δημοσιεύματα συσχετίζονται με το Βιβλιογραφικό Παράρτημα επίσης με τον ίδιο αλφαβητικό τρόπο.

## **1.11 Τεύχος Παραρτημάτων.**

Η Διδακτορική Διατριβή συνοδεύεται από τα ακόλουθα Παραρτήματα:

1. Το Παράρτημα I με τίτλο:

"ΤΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ LIGHT\_WASP",

το οποίο περιλαμβάνει το κείμενο του κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος.

2. Το Παράρτημα Π με τίτλο:

"ΤΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ HEAVY\_WASP",

το οποίο περιλαμβάνει το κείμενο του κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος.

3. Το Παράρτημα ΙΙΙ με τίτλο:

"ΤΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ SODIUM\_LISP",

το οποίο περιλαμβάνει το κείμενο του κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου.

4. Το Παράρτημα ΙV με τίτλο:

"ΑΡΧΕΙΑ ΣΕ ΓΛΩΣΣΕΣ HTML ΚΑΙ PERL"

το οποίο περιλαμβάνει τα κείμενα των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημοσιοποίηση των ποσάνω τριών κωδίκων στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό.





## 2. ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

2. ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ .....	2-1
2.1 Εισαγωγή. ....	2-1
2.2 Θερμοφυσικές ιδιότητες. ....	2-1
2.3 Γενικά για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες - Καταστατικές εξισώσεις και εξισώσεις κορεσμού.....	2-3
2.4 Γενικά για τις εξισώσεις των ιδιοτήτων μεταφοράς. ....	2-10
2.5 Μέθοδοι διατύπωσης εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς. ....	2-12
2.5.1 Ουσίες γενικά αγνώστων ιδιοτήτων.....	2-13
2.5.2 Ουσίες μερικά γνωστών ιδιοτήτων .....	2-14
2.5.3 Ουσίες μάλλον γνωστών ιδιοτήτων.....	2-16
2.6 Περιοριστικές συνθήκες για τις εξισώσεις ιδιοτήτων.....	2-18
2.7 Οι τιμές των καταστατικών μεγεθών στο κρίσιμο σημείο.....	2-20
2.8 Έλεγχος ακρίβειας μιας καταστατικής εξίσωσης ή και άλλων εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς.....	2-21
2.8.1 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα. ....	2-21
2.8.2 Σύγκριση με Πίνακες Πλαισιού. ....	2-22
2.9 Απαιτήσεις ακρίβειας των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες .....	2-23



# ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

## 2.1 Εισαγωγή.

Στο Κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και οι ιδιότητες μεταφοράς που είναι απαραίτητες για τη θερμοϋδραυλική ανάλυση των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος (ΠΑΙ). Περιγράφονται επιπλέον γενικά οι μορφές των εξισώσεων των οποίων υπολογίζονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και οι ιδιότητες μεταφοράς. Επίσης παρουσιάζεται η κατάταξη των εξισώσεων αυτών σε θεωρητικές, γενικευμένες και ειδικές και αναλύεται η έννοια της θερμοδυναμικής συνέπειας ως σύγχρονη απαίτηση για τις εξισώσεις αυτών των ιδιοτήτων. Αναπτύσσονται περαιτέρω θέματα σχετικά με τις μεθόδους διατύπωσης εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς, ανάλογα και με την ποσότητα και την ποιότητα των αντίστοιχων πειραματικών αποτελεσμάτων, και εξετάζονται οι περιορισμοί στους οποίους πρέπει να υπακούουν οι διατυπώσεις αυτές. Ακόμα αναλύονται οι τρόποι με τους οποίους γίνεται ο έλεγχος της ακρίβειας των εξισώσεων για τις ιδιότητες και παρουσιάζονται οι έννοιες "ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης" και "ακρίβεια επιστημονικής και γενικής χρήσης". Το σύνολο των στοιχείων και σχολίων που συμπεριλαμβάνονται στο παρόν Κεφάλαιο χρησιμεύει για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό των εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και ιδιότητες μεταφοράς των ψυκτικών μέσων των ΠΑΙ που θα παρουσιασθούν στα επόμενα Κεφάλαια της Διδακτορικής Διατριβής.

## 2.2 Θερμοφυσικές ιδιότητες.

Η θερμοϋδραυλική ανάλυση ενός συστήματος απαιτεί τη γνώση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων μεταφοράς του εργαζόμενου μέσου, στις οποίες θα αναφερόμαστε με το γενικό όρο **θερμοφυσικές ιδιότητες**.

Είναι γνωστό ότι κάθε ιστροπικό σύστημα σταθερής σύνθεσης και μάζας, το οποίο δρα στα όριά του με ομοιόμορφη και σταθερή στατική πίεση και δεν υπόκειται στην επίδραση πεδίων βαρύτητας, ηλεκτρισμού ή μαγνητισμού, εμφανειακών ή χημικών δράσεων, ακτινοβολίας κτλ., ονομάζεται θερμοδυναμικό σύστημα PVT (βλέπε και Κουρεμένος Δ.Α., 1982).

Ως κυριότερα θερμοδυναμικά μεγέθη ενός συστήματος PVT ορίζονται η πίεση P, η θερμοκρασία T και ο ειδικός όγκος  $v$  -ή ισοδύναμα η πυκνότητα  $\rho$ . Άλλα σημαντικά θερμοδυναμικά μεγέθη είναι η ειδική εσωτερική ενέργεια  $u$ , η ειδική εντροπία  $s$ , η ειδική ενθαλπία  $h$ , η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση  $c_p$ , η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο  $c_v$ , ο συντελεστής ισεντροπικής μεταβολής  $\gamma$ , ο συντελεστής Joule - Thomson  $\mu$ , η ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα  $k_T$  και η ταχύτητα του ήχου  $a$ . Τα παραπάνω θερμοδυναμικά μεγέθη είναι αυτά που ενδιαφέρουν για τα ψυκτικά μέσα των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος και θα εξετασθούν στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή. Αυτά τα θερμοδυναμικά μεγέθη ενός συστήματος PVT, θα αναφέρονται στο εξής ως **θερμοδυναμικές ιδιότητες**. Κατ' εξαίρεση η πίεση P, η θερμοκρασία T και ο ειδικός όγκος  $v$ , θα αναφέρονται ως **καταστατικά μεγέθη**. Σε κάθε αναφορά στις θερμοδυναμικές ιδιότητες "εσωτερική ενέργεια", "ενθαλπία" και "εντροπία" θα εννοούνται τα θερμοδυναμικά μεγέθη ειδική εσωτερική ενέργεια, ειδική ενθαλπία και ειδική εντροπία αντίστοιχα, εκτός αν σημειώνεται κάτι διαφορετικό. Γενικά το επίθετο "ειδικός-ή-ό" συνήθως παραλείπεται. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες υπολογίζονται συνήθως από εξισώσεις οι οποίες έχουν ονομασθεί **καταστατικές εξισώσεις (κ.ε)**.

Ως **ιδιότητες μεταφοράς** εννοούνται κυρίως η δυναμική συνεκτικότητα  $\eta$ , η θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$  και η επιφανειακή τάση  $\sigma$  μεταξύ υγρού και ατμού μιας ουσίας στην κατάσταση κορεσμού. Υπάρχουν φορές στο εξής που η δυναμική συνεκτικότητα θα αναφέρεται απλά ως συνεκτικότητα. Αντίθετα η κινηματική συνεκτικότητα θα αναφέρεται πάντοτε με το επίθετό της. Επίσης η ιδιότητα "επιφανειακή τάση μεταξύ υγρού και ατμού σε κατάσταση κορεσμού" θα αναφέρεται ως "επιφανειακή τάση" μολονότι ο όρος αυτός μπορεί να καλύψει και τις έννοιες "επιφανειακή τάση υγρού - αέρα" ή "ατμού - αέρα" κτλ. Οι ιδιότητες μεταφοράς υπολογίζονται συνήθως από κατάλληλες συναρτήσεις αναδρομής που εκτιμήθηκαν από πειραματικά δεδομένα.

Τόσο οι καταστατικές εξισώσεις, όσο και οι εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς των συνηθέστερων εργαζόμενων μέσων σε θερμοδυναμικά συστήματα (πχ ελαφρύ ύδωρ, αέρας, CO<sub>2</sub>, ψυκτικά, βαρύ ύδωρ κοκ) αποτελούν αντικείμενο ερευνών πολυμελών επιστημονικών ομάδων, τα αποτελέσματα των οποίων, αφού ελεγχθούν κριτικά, οδηγούν στις ονομαζόμενες **διατυπώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες (thermophysical properties formulations)**. Οι διατυπώσεις αυτές συνοδεύονται συνήθως από τους λεγόμενους **Πίνακες Πλάιστου**<sup>1</sup>. Οι

---

<sup>1</sup> Πρόκειται για όρο που χρησιμοποιείται στα ελληνικά - βλέπε και Schmidt E., Grigull U., 1987 Μετάφραση - Επιμέλεια: Ρακόπουλος Κ.Δ., για να αποδώσει τον αντίστοιχο όρο "Skeleton Table" της Αγγλικής ή τον όρο "Rahmentafel" της Γερμανικής.

Πίνακες Πλαιοίου συνοψίζουν για μια περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών κριτικά ελεγμένες πειραματικές τιμές για τις θερμοφυσικές ιδιότητες μαζί με τις σχετικές ανοχές σφάλματος.

### 2.3 Γενικά για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες - Καταστατικές εξισώσεις και εξισώσεις κορεσμού

Ένα PVT σύστημα το οποίο ισορροπεί, και το οποίο αποτελείται από μία και μόνη καθαρή ουσία, περιγράφεται πλήρως με τη βοήθεια δύο από τα θερμοδυναμικά μεγέθη πιέσεως  $P$ , θερμοκρασίας  $T$ , και ειδικού όγκου  $v$ : τα θερμοδυναμικά μεγέθη  $P$ ,  $T$  και  $v$  ονομάζονται ως εκ τούτου μεγέθη κατάστασης ή **καταστατικά μεγέθη**.

Επιπλέον, εάν σε κατάσταση ισορροπίας του συστήματος δύο από αυτές τις μεταβλητές έχουν μία ορισμένη σταθερή τιμή, τότε η τρίτη λαμβάνει<sup>2</sup> καθορισμένη τιμή. Υπάρχει επομένως μεταξύ των τριών καταστατικών μεγεθών μια σχέση της μορφής

$$\Phi(P, v, T) = 0 \quad (2-1)$$

η οποία ονομάζεται **καταστατική εξίσωση - κ.ε., equation of state - eos**.

Σε ένα τέτοιο PVT σύστημα μπορούν να διακριθούν και οι ακόλουθες τρεις (3) ειδικότερες περιπτώσεις ή αλλιώς καταστάσεις:

1. **Κατάσταση κορεσμού (saturation state) ή κατάσταση ατμοποίησης**, όπου η υγρή και η ατμώδης φάση συνυπάρχουν σε ισορροπία.

Για την πλήρη περιγραφή μιας τέτοιας κατάστασης, **αρκεί** μόνο ένα από τα καταστατικά θερμοδυναμικά μεγέθη πιέσεως κορεσμού  $P_s$  ή θερμοκρασίας κορεσμού  $T_s$  ή ειδικού όγκου υγρής φάσης  $v_{is}$  ή ατμώδους φάσης  $v_{gs}$ , βάσει του οποίου είναι δυνατόν να υπολογισθούν τα υπόλοιπα καταστατικά μεγέθη και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες για το κορεσμένο υγρό και τον κορεσμένο ατμό. Εάν μία από αυτές τις μεταβλητές έχει μια ορισμένη σταθερή τιμή, τότε και κάθε μία από τις άλλες λαμβάνει αντίστοιχα (συνήθως μοναδική) καθορισμένη τιμή. Φανερό είναι λοιπόν ότι σε κατάσταση κορεσμού η κ.ε. εκφυλίζεται σε μία από τις ακόλουθες σχέσεις της μορφής:

$$\Phi_s(P_s, T_s) = 0 \quad (2-2)$$

ή

---

<sup>2</sup> Συνήθως μοναδική –δεν πρέπει να παραγνωρίζονται και οι μετασταθείς καταστάσεις.  
2-3

$$\Phi_3(P_{s}, V_{fs}) = 0 \text{ ή } \Phi_3(P_{s}, V_{gs}) = 0$$

( 2-3)

ή

$$\Phi_3(T_{s}, V_{fs}) = 0 \text{ ή } \Phi_3(T_{s}, V_{gs}) = 0$$

( 2-4)

οι οποίες ονομάζονται **εξισώσεις κορεσμού** (vapor pressure equations).

Η σχέση (2-2) παριστάνεται σε ένα διάγραμμα πίεσης - θερμοκρασίας με μία γνησίως αύξουσα καμπύλη, η οποία ονομάζεται **καμπύλη εξάτμισης ή καμπύλη ατμοποίησης** (vaporisation curve) ή **καμπύλη κορεσμού** (saturation curve) και έχει δύο ακραία σημεία "2" και "C", όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2-1 (βλέπε και Abbot M.M. και Van Ness H.C., 1970). Το σημείο "2" που βρίσκεται στην περιοχή χαμηλών θερμοκρασιών και πιέσεων ονομάζεται **τριπλό σημείο** (triple point) και αντιπροσωπεύει την κατάσταση του PVT συστήματος στην οποία συνυπάρχουν σε ισορροπία η στερεή, η υγρή και η ατιμώδης φάση. Το ακραίο σημείο της καμπύλης κορεσμού που βρίσκεται στην περιοχή υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων ονομάζεται **κρίσιμο σημείο** (critical point).

2. **Κατάσταση εξάχνωσης** (sublimation state), όπου η στερεή και η ατιμώδης φάση συνυπάρχουν σε ισορροπία.

Για την πλήρη περιγραφή μιας τέτοιας κατάστασης, **αρκεί** μόνο ένα από τα καταστατικά θερμοδυναμικά μεγέθη πίεσεως εξάχνωσης  $P_{su}$  ή θερμοκρασίας εξάχνωσης  $T_{su}$  ή ειδικού όγκου στερεής φάσης  $V_{sосу}$  ή ατιμώδους φάσης  $V_{gsυs}$ , βάσει του οποίου είναι δυνατόν να υπολογισθούν τα υπόλοιπα καταστατικά μεγέθη και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες για το εξαχνούμενο στερεό και τον προκύπτοντα ισορροπούντα ατμό. Εάν μία από αυτές τις μεταβλητές έχει μια ορισμένη σταθερή τιμή, τότε και κάθε μία από τις άλλες λαμβάνει αντίστοιχα (συνήθως μοναδική) καθορισμένη τιμή. Φανερό είναι λοιπόν ότι σε κατάσταση εξάχνωσης η κ.ε. εκφυλίζεται σε μία από τις ακόλουθες σχέσεις της μορφής

$$\Phi_{su}(P_{su}, T_{su}) = 0$$

( 2-5)

ή

$$\Phi_{su}(P_{su}, V_{sосу}) = 0 \text{ ή } \Phi_{su}(P_{su}, V_{gsυs}) = 0$$

( 2-6)

ή

$$\Phi_{su}(T_{su}, V_{so, su}) = 0 \quad \text{ή} \quad \Phi_{su}(T_{su}, V_{gsu}) = 0$$

( 2-7)

οι οποίες ονομάζονται **εξισώσεις εξάχνωσης**.

Η σχέση (2-5) παριστάνεται σε ένα διάγραμμα πίεσης - θερμοκρασίας με μία γνησίως αύξουσα καμπύλη, η οποία ονομάζεται **καμπύλη εξάχνωσης** (sublimation curve) και η οποία καταλήγει στο ακραίο σημείο "2" που διακρίνεται στο Διάγραμμα 2-1. Όπως σημειώθηκε ήδη το σημείο "2" ονομάζεται **τριπλό σημείο** και αντιπροσωπεύει την κατάσταση του ΡVΤ συστήματος στην οποία συνυπάρχουν σε ισορροπία η στερεή, η υγρή και η ατιμώδης φάση.

3. **Κατάσταση τήξης** (fusion state), όπου η στερεή και η υγρή φάση συνυπάρχουν σε ισορροπία.

Για την πλήρη περιγραφή μιας τέτοιας κατάστασης, **αρκεί** μόνο ένα από τα καταστατικά θερμοδυναμικά μεγέθη πίεσης εξάχνωσης  $P_{fu}$  ή θερμοκρασίας εξάχνωσης  $T_{fu}$  ή ειδικού όγκου στερεής φάσης  $v_{so, fu}$  ή υγρής φάσης  $v_{fu}$ , βάσει του οποίου είναι δυνατόν να υπολογισθούν τα υπόλοιπα καταστατικά μεγέθη και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες για το τηκόμενο στερεό και το προκύπτον υγρό σε ισορροπία. Εάν μία από αυτές τις μεταβλητές έχει μια ορισμένη σταθερή τιμή, τότε και κάθε μία από τις άλλες λαμβάνει αντίστοιχα (συνήθως μοναδική) καθορισμένη τιμή. Φανερό είναι λοιπόν ότι σε κατάσταση τήξης η κ.ε. εκφυλίζεται σε μία από τις ακόλουθες σχέσεις της μορφής

$$\Phi_{fu}(P_{su}, T_{su}) = 0$$

( 2-8)

ή

$$\Phi_{fu}(P_{fu}, v_{so, fu}) = 0 \quad \text{ή} \quad \Phi_{fu}(P_{fu}, v_{fsu}) = 0$$

( 2-9)

ή

$$\Phi_{fu}(T_{fu}, v_{so, fu}) = 0 \quad \text{ή} \quad \Phi_{fu}(T_{fu}, v_{fsu}) = 0$$

( 2-10)

οι οποίες ονομάζονται **εξισώσεις τήξης**.

Η σχέση (2-8) παριστάνεται σε ένα διάγραμμα πίεσης - θερμοκρασίας με μία γνησίως αύξουσα καμπύλη, η οποία ονομάζεται **καμπύλη τήξεως** (fusion curve) και η οποία ξεκινάει από το ακραίο σημείο "2" που διακρίνεται στο Διάγραμμα 2-1. Όπως σημειώθηκε ήδη το

σημείο "2" ονομάζεται **τριπλό σημείο** και αντιπροσωπεύει την κατάσταση του ΡVΤ συστήματος στην οποία συνυπάρχουν σε ισορροπία η στερεή, η υγρή και η ατμώδης φάση.

Είναι φανερό ότι το μέγιστο "C" των εξισώσεων κορεσμού (2-2) έως και (2-4) είναι το κρίσιμο σημείο. Η πίεση  $P_c$  και η θερμοκρασία  $T_c$  στο κρίσιμο σημείο ονομάζονται **κρίσιμη πίεση** και **κρίσιμη θερμοκρασία αντίστοιχα**. Αντικαθιστώντας τις τιμές της κρίσιμης θερμοκρασίας και πίεσης στη σχέση (2-1), ή ισοδύναμα στις σχέσεις (2-3) και (2-4), προκύπτει ο όγκος  $V_c$  στο κρίσιμο σημείο, δηλαδή ο **κρίσιμος ειδικός όγκος**. Για πιέσεις ή θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τις κρίσιμες δεν είναι δυνατόν να γίνει διάκριση μεταξύ υγρής και ατμώδους φάσεως -υπάρχει μία και μόνο ενιαία φάση, η οποία ονομάζεται **φάση πυκνού ατμού** ή **αλλιώς υπερκρίσιμη φάση**.

Γενικά οι καταστατικές εξισώσεις διακρίνονται συνήθως σε δύο κατηγορίες:

**α. καταστατικές εξισώσεις κατηγορίας P-T** είναι εκείνες που δέχονται ως είσοδο τα καταστατικά μεγέθη πίεσεως και θερμοκρασίας. Φαίνεται ότι τέτοιες εξισώσεις είναι ευκολότερο να διατυπώνονται καθώς τόσο η πίεση όσο και η θερμοκρασία είναι μεγέθη που μετρώνται χωρίς δυσκολία.

**β. καταστατικές εξισώσεις κατηγορίας T-p** είναι εκείνες που δέχονται ως είσοδο τα καταστατικά μεγέθη θερμοκρασίας και πυκνότητας (ισοδύναμα ειδικού όγκου). Επειδή η πυκνότητα είναι μέγεθος που δύσκολα μετρείται, τέτοιας μορφής καταστατικές εξισώσεις άρχισαν να καταστρώνονται πολύ αργότερα από τις εξισώσεις κατηγορίας P-T. Για παράδειγμα μόλις στις αρχές της δεκαετίας του 1970 βεβαιώθηκαν οι ερευνητές για την αξιοπιστία των πειραμάτων εξακρίβωσης της πυκνότητας του αέρα και του ελαφρού ύδατος και προχώρησαν έτσι στην ανάπτυξη εξισώσεων κατηγορίας T-p για αυτά τα δύο μέσα. Όσο αφορά στο βαρύ ύδωρ η περιγραφή των θερμοδυναμικών του ιδιοτήτων μέχρι και το 1980 ήταν δυνατή μόνο με κ.ε. κατηγορίας P-T ώσπου οι Hill P.G. et al., 1981; 1982 διατύπωσαν καταστατική εξίσωση κατηγορίας T-p εξαιρετικής ακρίβειας και για αυτήν την ουσία.

Αν τώρα είναι  $\chi$  μία οποιαδήποτε θερμοδυναμική ιδιότητα μιας ουσίας για τον υπολογισμό της οποίας χρησιμοποιείται μία κ.ε. της κατηγορίας (α), τότε βέβαια θα ισχύει:

$$\chi = \chi(P, T)$$

Αντίθετα αν για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται μία κ.ε. της κατηγορίας (β) θα ισχύει:



$$\chi = \chi(T, p)$$

Κατά κανόνα από τις καταστατικές εξισώσεις της κατηγορίας (α) μπορεί να παραχθεί εύκολα μία αναλυτική λύση για το καταστατικό μέγεθος του ειδικού όγκου:

$$v = v(P, T)$$

ενώ από αυτές της κατηγορίας (β) παράγεται χωρίς δυσκολία αναλυτική λύση για το καταστατικό μέγεθος της πίεσης:

$$P = P(T, \rho)$$

Επειδή συνήθως οι κ.ε. κατηγορίας P-T είναι πεπλεγμένες ως προς την πίεση και οι κ.ε. κατηγορίας T-p είναι πεπλεγμένες ως προς την πυκνότητα, λύση για τα καταστατικά μεγέθη της θερμοκρασίας και της πυκνότητας αντίστοιχα μπορεί να ληφθεί ως επί το πλείστον μόνο με αριθμητική μέθοδο.

Τόσο οι κ.ε. κατηγορίας P-T όσο και οι κ.ε. κατηγορίας T-p είναι σχεδόν πάντα πεπλεγμένες ως προς τη θερμοκρασία, σπάνια όμως ζητάει κανείς να λυθούν ως προς αυτή. Το καταστατικό μέγεθος της θερμοκρασίας λογίζεται τις περισσότερες φορές ως ανεξάρτητη μεταβλητή.

Εξισώσεις που να δέχονται ως είσοδο τα καταστατικά μεγέθη πίεσης και πυκνότητας (ισοδύναμα ειδικού όγκου) έχουν αναπτυχθεί μόνο για πολύ ειδικές περιπτώσεις.

Κατά κανόνα οι σύγχρονες καταστατικές εξισώσεις περιγράφουν με ικανοποιητική ακρίβεια τόσο την υγρή και την ατμώδη φάση στην υποκρίσιμη περιοχή ( $P < P_c$ ,  $T < T_c$ ), όσο και μέρος της υπερκρίσιμης φάσης της ουσίας για την οποία καταστράφηκαν. Οφείλουν ακόμα να αναπαράγουν με κομψό τρόπο, δηλαδή με λίγες πράξεις, κυρίως παραγωγίσεις και λίγες ή καθόλου ολοκληρώσεις, τις περισσότερες ή και όλες τις θερμοδυναμικές ιδιότητες της ουσίας, δηλαδή την ενθαλπία, την εντροπία, τις ειδικές θερμοχωρητικότητες κτλ. Πριν όμως η βασική έρευνα φθάσει στις σύγχρονες κ.ε., και σε μια εποχή όπου ούτε είχαν ακόμα συγκεντρωθεί πολλά πειραματικά αποτελέσματα, ούτε είχαν αναπτυχθεί οι μοντέρνες αριθμητικές μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων, εξαιτίας βέβαια και της ελλείψεως ισχυρών υπολογιστικών εργαλείων, έγιναν προσπάθειες με καθαρά θεωρητικούς συλλογισμούς να παρουσιασθούν ικανοποιητικής ακρίβειας κ.ε., οι οποίες να ισχύουν για πολλά στοιχεία, χημικές ενώσεις και μίγματα με παρεμφερείς φυσικές και χημικές ιδιότητες, για όλες τις καταστάσεις. Οι προσπάθειες αυτές ξεκινούσαν με στόχο να εξηγήσουν τη θερμοφυσική

συμπεριφορά των ουσιών λαμβάνοντας υπόψη τη μοριακή τους δομή, αλλά δεν κατέλιγαν παρά μόνο σε **θεωρητικές καταστατικές εξισώσεις** περιορισμένου ενδιαφέροντος. Σε γενικές γραμμές τέτοιες προστάθειες -χωρίς ακόμα και σήμερα να έχουν σταματήσει- χαρακτηρίζονται ως πρακτικά περιορισμένες, ισχύουν δηλαδή για λίγες μόνο ουσίες και για ορισμένες μόνο καταστάσεις -συνήθως για αέρια και ατμούς σε χαμηλές πιέσεις. Πρόσφατα πάντως σημειώθηκαν και μερικές επιτυχίες, κυρίως όσο αφορά στη θεωρητική αντιμετώπιση της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των υλικών γύρω από το κρίσιμο σημείο. Τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα επαληθεύθηκαν πλήρως από σχετικά πειραματικά δεδομένα.

Παράλληλα, προτάθηκαν οι λεγόμενες **γενικές ή γενικευμένες καταστατικές εξισώσεις**. Πρόκειται για εμπειρικές ή ημιεμπειρικές κ.ε., οι οποίες αναπτύχθηκαν τόσο με βάση πειράματα, όσο και από θεωρητικά συμπεράσματα της βασικής έρευνας και που ισχύουν με κατάλληλες τροποποιήσεις, για τις περισσότερες από τις ουσίες που χρησιμοποιούνται πολύ στις βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτές οι γενικευμένες εξισώσεις έχουν πάντως περιορισμένη ακρίβεια. Τέτοιες εξισώσεις είναι: η γνωστή εξίσωση Van der Waals, η εξίσωση Berthelot, η εξίσωση Dieterici, η εξίσωση Beattie - Bridgeman, η εξίσωση B-W-R (Benedict - Webb - Rubin), η εξίσωση Αμοιβαίων Δράσεων κτλ<sup>3</sup>. Έχει διαπιστωθεί ότι πολλές από αυτές τις κ.ε. δίνουν αποδεκτά αποτελέσματα μόνο όταν δοθούν στους συντελεστές τους κατάλληλες τιμές για κάθε περιοχή ισχύος και κάθε εργαζόμενο μέσο· και πάλι όμως η ακρίβειά τους υπολείπεται πολύ της ζητούμενης ακρίβειας βιομηχανικής χρήσης. Περισσότερο ικανοποιητικές εμφανίζονται να είναι οι κ.ε. B-W-R και Αμοιβαίων Δράσεων, μειονεκτούν βασικά όμως στο γεγονός ότι δεν μπορούν να εκφράσουν αναλυτικά τον ειδικό όγκο  $v$  ή ισοδύναμα την πυκνότητα  $\rho$  -πρόκειται για εξισώσεις κατηγορίας T-ρ.

Στις γενικές ή γενικευμένες κ.ε. συγκαταλέγονται και ορισμένα γενικευμένα διαγράμματα που παρουσιάζουν την αλληλεξάρτηση  $\Phi(P, v, T) = 0$  μεταξύ της πίεσης  $P$ , της θερμοκρασίας  $T$  και του ειδικού όγκου  $v$  με εύληπτο τρόπο και που ισχύουν και αυτά για περισσότερες από μία ουσίες. Το κλασικότερο παράδειγμα ενός τέτοιου διαγράμματος είναι το γνωστό<sup>4</sup> **γενικευμένο διάγραμμα του συντελεστή συμπίεσιότητας**. Στα γενικευμένα διαγράμματα εντάσσονται και τα γνωστά διαγράμματα ενθαλπίας - εντροπίας ( $h,s$ ) ή διαφορετικά τα **διαγράμματα Mollier** που έχουν καταστρωθεί για πολλές από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ουσίες.

---

<sup>3</sup> Βλέπε και Hatsopoulos G.N. et al., 1965, Κουρεμένος Δ.Α., 1982, Κουρεμένος Δ.Α., 1987 κ.ά.

<sup>4</sup> Βλέπε και Πετρόπουλος Ν.Π., 1991, Παράρτημα II.  
2-8

Μετά την περιορισμένη επιτυχία των γενικών ή γενικευμένων κ.ε. και ταυτόχρονα με την ανάπτυξη της θεωρίας της αριθμητικής ανάλυσης και κανών υπολογιστικών συστημάτων, αλλά και τον εμπλουτισμό των πειραματικών μερήσεων για τις κυριότερες θερμοδυναμικές ιδιότητες, διατυπώθηκαν σχετικά εύκολα απλές εξισώσεις πολυωνυμικής μορφής για τον ειδικό όγκο  $v$  σε συνάρτηση με την πίεση  $P$  και την θερμοκρασία  $T$ , με τη χρησιμοποίηση πειραματικών δεδομένων μίας και μόνο ουσίας και οι οποίες ίσχυαν μόνο για αυτή τη συγκεκριμένη ουσία και τις περισσότερες φορές όχι για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των  $P$  και  $T$ . Αυτές οι εξισώσεις αποτέλεσαν τον πρόδρομο εκείνων που σήμερα ονομάζουμε **ειδικές καταστατικές εξισώσεις**. Είχαν συνήθως μεγάλο πλήθος όρων μεγάλης τάξης, οι οποίοι, όπως ήταν φυσικό, δρούσαν σε βάρος της ακρίβειας των υπολογισμών, ιδιαίτερα όταν ήταν αναγκαίο να μεσολαβήσουν πολλές πράξεις, εξαιτίας της προκαλούμενης μείωσης του πλήθους των σημαντικών ψηφίων των αποτελεσμάτων. Έτσι οδηγούσαν τις παραγόμενες συναρτήσεις για τις άλλες θερμοδυναμικές ιδιότητες σε μη πραγματικές και εντέλει ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και ασυνέχειες. Η φυσική συνέχεια προς τη βελτίωση μίας τέτοιας πολυωνυμικού τύπου κ.ε. ήταν η κατάλληλη επιλογή εκείνων των όρων, που χαρακτηρίζονται σημαντικοί, και γενικά η αντικατάσταση πολλών από τους "βλαβερούς" όρους μεγάλης τάξης με την εισαγωγή στην εξίσωση εκθετικών όρων εξομάλυνσης. Με αυτό τον τρόπο εμποδίσθηκε αποτελεσματικά η διάχυση του σφάλματος, τα προηγούμενα μειονεκτήματα πρακτικά εξαλείφθηκαν και επιτεύχθηκε τελικά η ζητούμενη ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης. Τέτοιας μορφής ειδικές κ.ε., που ισχύουν μόνο για συγκεκριμένες ουσίες και καταστάσεις, είναι σήμερα πλατιά διαδεδομένες.

Όμως, όπως ήταν αναμενόμενο, η πρόοδος στις κ.ε. δεν σταμάτησε εδώ. Οι ερευνητές πέτυχαν στις σύγχρονες εξισώσεις όχι μόνο την αποδεκτή ακρίβεια των πολυωνυμικών συσχετίσεων που προαναφέρθηκαν, αλλά και ευρεία περιοχή ισχύος και επίσης αυτό που καλείται σήμερα **θερμοδυναμική συνέπεια**. Την προϋπόθεση της θερμοδυναμικής συνέπειας ικανοποιούν σχεδόν όλες οι νεότερες κ.ε., όσες δηλαδή δίνονται σε ολοκληρωτική μορφή και με τρόπο τέτοιο ώστε με εφαρμογή απλών κλασσικών θερμοδυναμικών συλλογισμών<sup>5</sup> να δίνουν με λίγες παραγωγίσεις και πράξεις, σχέσεις και αποτελέσματα για τις περισσότερες θερμοδυναμικές ιδιότητες.

Για παράδειγμα, όταν ο ειδικός όγκος  $v$  και η θερμοκρασία  $T$  επιλέγονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές, τότε μπορούν να παραχθούν εκφράσεις για την πίεση  $P$ , την ειδική ενθαλπία  $h$

---

<sup>5</sup> ΣΣ: όπως οι σχέσεις Maxwell, οι "συμπληρωματικές" σχέσεις Maxwell, οι σχέσεις Tds, οι γνωστοί πίνακες Bridgeman κτλ -βλέπε και Hatsopoulos G.N., 1965; Hendricks R.C. et al., 1973; Κουρεμένος Δ.Α., 1982.

και όλες τις άλλες θερμοδυναμικές ιδιότητες με απευθείας παραγωγίες της συνάρτησης Helmholtz,  $\Psi = \Psi(v,T)$ , όπου  $\Psi$  είναι η ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια, που παίζει βέβαια το ρόλο της θερμοδυναμικά συνεπούς κ.ε.<sup>6</sup> Η συνάρτηση αυτή ανήκει βέβαια στις κ.ε. κατηγορίας T-p και κατά κανόνα δε λύνεται αλγεβρικά ως προς τον ειδικό όγκο. Άλλη παρόμοια συνάρτηση είναι η συνάρτηση Gibbs,  $G = G(P,T)$ , όπου G η ειδική ελεύθερη ενθαλπία, από την οποία μπορούν να παραχθούν εκφράσεις για τον ειδικό όγκο  $v$  και τις άλλες θερμοδυναμικές ιδιότητες επίσης με απλές παραγωγίες<sup>7</sup>. Η συνάρτηση Gibbs ανήκει στις κ.ε. κατηγορίας P-T και σχεδόν πάντα μπορεί να λυθεί ως προς την πίεση μόνο με κάποια αριθμητική μέθοδο.

Αν για τον υπολογισμό κάποιων από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες απαιτείται ολοκλήρωση με χρήση της καταστατικής εξίσωσης, θεωρείται ότι αυτή είναι μειωμένης θερμοδυναμικής συνέπειας. Το ίδιο συμβαίνει αν απαιτούνται πολλές πράξεις. Αν επίσης οι θερμοδυναμικές ιδιότητες δεν παράγονται από μία καταστατική εξίσωση αλλά από ένα καταστατικό μοντέλο αποτελούμενο από περισσότερες και πολυπλοκότερες εξισώσεις τότε και το μοντέλο θεωρείται μειωμένης θερμοδυναμικής συνέπειας διότι παρατηρούνται μεγάλες ασυνέχειες στην κλίση των θερμοδυναμικών εμφανειών. Όπως ήταν φυσικό, οι πρώτες διατυπώσεις γενικευμένων ή ειδικών καταστατικών εξισώσεων είχαν απλά στοιχειώδη θερμοδυναμική συνέπεια.

Οι σύγχρονες κ.ε. είναι τελικά πολυσύνθετοι νόμοι, των οποίων η διατύπωση έχει φθάσει σε υψηλό βαθμό τελειότητας. Η περιγραφή και η χρησιμοποίησή τους σε θερμοδυναμικούς υπολογισμούς είναι όπως θα δούμε αρκετά περίπλοκη. Με βάση αυτές όμως, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός, αν όχι όλων, τουλάχιστον των περισσοτέρων θερμοδυναμικών μεγεθών ενός συστήματος PVT.

#### **2.4 Γενικά για τις εξισώσεις των ιδιοτήτων μεταφοράς.**

Όπως ήταν αναμενόμενο η εξέλιξη των εξισώσεων για τις ιδιότητες μεταφοράς ακολούθησε, με μία χρονική καθυστέρηση, παράλληλους δρόμους με την εξέλιξη των καταστατικών εξισώσεων.

Αρχικά, στα πλαίσια βασικής έρευνας και με βάση κυρίως θεωρητικούς συλλογισμούς, έγιναν μικρές προσπάθειες να παρουσιασθούν θεωρητικές εξισώσεις για τις ιδιότητες

---

<sup>6</sup> Βλέπε π.χ. και Hill P.G. et al., 1982.

<sup>7</sup> Βλέπε π.χ. και Schmidt E. et al., 1987.

μεταφοράς, που να ισχύουν γενικά για στοιχεία, χημικές ενώσεις και μίγματα με παρόμοιες φυσικές και χημικές ιδιότητες κυρίως για την υγρή και την ατμώδη φάση. Αυτές οι προσπάθειες έδωσαν πενήντρά αποτελέσματα και μπορεί να θεωρηθεί ότι σήμερα έχουν σταματήσει. Οι συλλογισμοί πάντως, στους οποίους βασίζονται, χρησιμοποιούνται από καιρό σε καιρό για να δικαιολογήσουν ή να ερμηνεύσουν τη συμπεριφορά ορισμένων ουσιών σε ιδίομορφα σημεία, όπως π.χ. το τριπλό σημείο, το κρίσιμο σημείο κ.ά.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν οι γενικές η γενικευμένες εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς. Πρόκειται για διάφορα είδη εμπειρικών ή ημιεμπειρικών εξισώσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι γενικές η γενικευμένες εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς δεν αναπτύχθηκαν στο βαθμό που αναπτύχθηκαν οι γενικές ή γενικευμένες καταστατικές εξισώσεις. Στις γενικές ή γενικευμένες εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς συγκαταλέγονται και τα λεγόμενα **γενικευμένα διαγράμματα για τις ιδιότητες μεταφοράς**. Πρόκειται για γραφικές παραστάσεις, οι οποίες ισχύουν για περισσότερα από ένα παρεμφερή μεταξύ τους υλικά και οι οποίες δέχονται ως εισόδο συνήθως την πίεση και τη θερμοκρασία και δίνουν ως έξοδο τη ζητούμενη ιδιότητα. Αυτά τα διαγράμματα αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τις περιπτώσεις, όπου ήταν αναγκαία μια σύντομη και ικανοποιητική προσέγγιση μιας από τις ιδιότητες μεταφοράς. Τέτοια διαγράμματα χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα όπου δεν υπάρχουν κατάλληλες ειδικές εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς μιας ουσίας. Η ακρίβειά τους, όπως γίνεται κατανοητό, είναι συζητήσιμη.

Η συγκέντρωση ενός σημαντικού πλήθους πειραματικών αποτελεσμάτων, αλλά και η ανάπτυξη ικανών ειδικών αριθμητικών μεθόδων και υπολογιστικών συστημάτων τα τελευταία χρόνια, επέτρεψε και για τις ιδιότητες μεταφοράς την διατύπωση αυτών που σήμερα ονομάζονται **ειδικές εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς**. Πρόκειται στην ουσία για εξισώσεις πολυωνυμικής συνήθως μορφής για την θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$ , τη συνεκτικότητα  $\eta$ , την επιφανειακή τάση  $\sigma$  κτλ, σε συνάρτηση με την πίεση  $P$  και την θερμοκρασία  $T$  ή σε συνάρτηση με την θερμοκρασία  $T$  και την πυκνότητα  $\rho$ . Αυτές οι εξισώσεις δημιουργήθηκαν με βάση πειραματικά δεδομένα για μία και μόνο ουσία και ισχύουν μόνο για αυτή τη συγκεκριμένη ουσία. Οι ειδικές εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς είναι προϊόν εξέλιξης από προηγούμενων γενικών ή γενικευμένων εξισώσεων. Έχουν συνήθως περιοχή ισχύος που καλύπτει την υγρή και την ατμώδη φάση. Αμφιβολίες υπάρχουν γενικά για την ακρίβειά τους στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου. Επιπλέον εμπεριέχουν μεγάλο πλήθος όρων μεγάλης τάξης, των οποίων όμως η ύπαρξη δεν είναι ενοχλητική δεδομένου ότι οι όροι αυτοί χρησιμοποιούνταν μόνο για τον υπολογισμό της

ζητούμενης ιδιότητας μεταφοράς και όχι και σε άλλες πράξεις, όπως παραγωγίες, ολοκληρώσεις κ.ά.

Οι σύγχρονες ειδικές εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς έχουν συνήθως τέτοια μορφή ώστε να χρησιμοποιούν τις ίδιες ανεξάρτητες μεταβλητές με τις θερμοδυναμικά συνεπείς καταστατικές εξισώσεις. Για παράδειγμα αν μια θερμοδυναμικά συνεπής κ.ε. είναι της μορφής συνάρτησης Helmholtz  $\Psi = \Psi(p,T)$ , οφείλουν και οι αντίστοιχες ειδικές εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς να δέχονται και αυτές ως είσοδο την πυκνότητα και τη θερμοκρασία για να εξασφαλιστεί η αρμονικότερη δυνατή συνεργασία και να ικανοποιείται η απαίτηση για θερμοδυναμική συνέπεια.

## **2.5 Μέθοδοι διατύπωσης εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς.**

Οι μέθοδοι διατύπωσης εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς μπορεί να ταξινομηθούν, στα πλαίσια της παρούσης Διδασκαρικής Διατριβής, σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη γνώση που υπάρχει για τις ιδιότητες των ουσιών στις οποίες αναφέρονται:

- τις ουσίες γενικά αγνώστων ιδιοτήτων,
- τις ουσίες μερικά γνωστών ιδιοτήτων και
- τις ουσίες μάλλον γνωστών ιδιοτήτων.

Οι τρεις αυτές κατηγορίες διακρίνονται από τα πιο κάτω χαρακτηριστικά αντίστοιχα:

### **α. Ουσίες γενικά αγνώστων ιδιοτήτων.**

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το μόνο που είναι γνωστό για τις ουσίες αυτές είναι διάφορες φυσικές και χημικές τους ιδιότητες, των οποίων σήμερα η εξακρίβωση είναι μάλλον εύκολη, όπως για παράδειγμα η μοριακή τους δομή και σύνθεση, το μοριακό βάρος, το σημείο βρασμού σε ατμοσφαιρική πίεση κτλ. Ενδεχομένως να είναι γνωστές και πολύ λίγες πειραματικές τιμές για ορισμένες από τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες.

### **β. Ουσίες μερικά γνωστών ιδιοτήτων.**

Πρόκειται για ουσίες με τις οποίες έχουν ασχοληθεί αρκετοί ερευνητές με σκοπό την πειραματική εξακρίβωση αρκετών από τις θερμοδυναμικές τους ιδιότητες. Αντίθετα λίγοι έχουν ασχοληθεί με τις ιδιότητες μεταφοράς. Συνολικά το επίπεδο της σχετικής

συγκεντρωμένης γνώσης για τις ουσίες αυτές χαρακτηρίζεται ποσοτικά και ποιοτικά μέτριο. Παρόλαυτά, η έρευνα που έχει συμπληρωθεί θεωρείται πολύ καλή βάση για την παραπέρα πειραματική δουλειά.

γ. Ουσίες μάλλον γνωστών ιδιοτήτων.

Ως τέτοιες θεωρούνται οι ουσίες για τις οποίες έχει συγκεντρωθεί μεγάλο πλήθος πειραματικών μετρήσεων υψηλής ακρίβειας για τις περισσότερες, αν όχι και όλες, θερμοφυσικές ιδιότητες. Είναι βέβαια πιθανό να υστερούν κατά τι η ποιότητα και η ποσότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων για τις ιδιότητες μεταφοράς, πλην όμως η κάλυψη οποιοδήποτε κενού θεωρείται πλέον θέμα σύντομου χρόνου. Αυτά τα κενά δεν εμποδίζουν την κατάταξη της εξεταζόμενης ουσίας στις "μάλλον γνωστές". Οι πολλές και καλές πειραματικές μετρήσεις συνιστούν σε αυτή την περίπτωση μία καλή βάση δεδομένων με ικανό μέγεθος ώστε, κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, να μπορεί να τροφοδοτήσει χωρίς προβλήματα μία αριθμητική διαδικασία για τη διατύπωση εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες.

Και για τις τρεις κατηγορίες ουσιών α, β και γ, θα παρουσιασθούν στη συνέχεια μέθοδοι διατύπωσης εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς. Οι μέθοδοι αυτές εξαρτώνται σημαντικά από το αν υπάρχει ή όχι φυσικά και μοριακά πανομοιότητα "ουσία γνωστών ιδιοτήτων". Για παράδειγμα το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ θεωρούνται πανομοιότυπα και για να μην περιορίζεται κανείς μόνο σε αυτά τα δύο υλικά, υπενθυμίζεται η συνεχής δημιουργία νέων χλωροφθορανθράκων, οι οποίοι μοιάζουν εξαιρετικά, όσο αφορά τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες, με τους παλαιότερους. Τα βήματα των μεθόδων διατύπωσης που θα αναπτυχθούν δεν είναι βέβαια μονόδρομος ούτε, ακόμα περισσότερο, τόσο σαφώς διακεκριμένα όσο παρουσιάζονται. Μπορεί επίσης να έχουν και διαφορετική σειρά ή να αλληλοκαλύπτονται. Η διάκριση που έγινε εξυπηρετεί την όσο το δυνατό καλύτερη ανάλυση και κατανόηση των επιμέρους συνιστωσών των μεθόδων για τη διατύπωση εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς.

### **2.5.1 Ουσίες γενικά αγνώστων ιδιοτήτων.**

I. Δεν υπάρχει φυσικά και μοριακά πανομοιότητα ουσία.

Οι καθαρά θεωρητικές καταστατικές εξισώσεις των οποίων οι σταθερές εξαρτώνται κατά κανόνα από τη μοριακή δομή της ουσίας μπορούν να εφαρμοσθούν, σύμφωνα πάντα με

αυστηρούς θεωρητικούς νόμους, για να αναπαράγουν ορισμένες μόνο από τις θερμοφυσικές ιδιότητες. Από τέτοιες εξισώσεις δεν υπάρχουν απαιτήσεις ακρίβειας.

II. Υπάρχει φυσικά και μοριακά πανομοιότυπη ουσία γνωστών ιδιοτήτων.

Σε αυτή την περίπτωση ανοίγονται αρκετές εναλλακτικές λύσεις. Στις -έστω και αν ακόμα είναι λίγες- πειραματικές μετρήσεις για τις ιδιότητες της πανομοιότυπης ουσίας "ταμιάζει" πιθανότατα κάποια από τις γενικευμένες εξισώσεις ή κάποιο από τα γενικευμένα διαγράμματα ιδιοτήτων. Οι εξισώσεις και τα διαγράμματα αυτά συνήθως μπορούν να εφαρμοσθούν με την απαραίτητη προσοχή και στη συγγενή άγνωστη ουσία. Καλό είναι τότε να μη χρησιμοποιούνται οι ίδιες οι εξισώσεις και τα διαγράμματα, αλλά οι αδιάστατες ανηγμένες μορφές τους σε μία κατάσταση που είναι και για τις δύο ουσίες γνωστή ή κατά προσέγγιση γνωστή, όπως το κρίσιμο ή το τριπλό σημείο. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με αυτόν τον τρόπο είναι σαφώς καλύτερη από εκείνη της πιο πάνω περιπτώσεως (I) αλλά υπολείπεται από τη ζητούμενη. Μεγαλύτερη επιτυχία σημειώνεται πάντοτε αν πρόκειται για τον ατμό της άγνωστης ουσίας και μάλιστα για χαμηλές πιέσεις. Αν για την πανομοιότυπη ουσία γνωστών ιδιοτήτων έχουν ήδη διατυπωθεί εξισώσεις θερμοφυσικών ιδιοτήτων είναι σίγουρο ότι με την εφαρμογή της αρχής των αντιστοιχουσών καταστάσεων<sup>84</sup> και με τις ίδιες αυτές εξισώσεις, ελαφρά μόνο τροποποιημένες μπορούν να υπολογισθούν οι θερμοφυσικές ιδιότητες της άγνωστης ουσίας με βελτιωμένη ακρίβεια, που και πάλι όμως υστερεί σημαντικά από τη ζητούμενη ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης.

### 2.5.2 Ουσίες μερικά γνωστών ιδιοτήτων

I. Δεν υπάρχουν φυσικά και μοριακά πανομοιότυπη ουσία.

Αν δεν υπάρχουν αρκετές πειραματικές μετρήσεις για τις ιδιότητες της εξεταζόμενης ουσίας τότε το μόνο που μπορεί να επιδιώξει κανείς είναι ελάχιστες δοκιμές με θεωρητικές ή γενικευμένες καταστατικές εξισώσεις χωρίς απαιτήσεις ακρίβειας. Αν το πλήθος των πειραματικών μετρήσεων είναι ικανό, είναι δυνατόν να επιτευχθεί σχετικά καλή ακρίβεια με τις γενικευμένες κ.ε. για περιορισμένη όμως περιοχή και κυρίως για την ατμόδη φάση. Συνήθως σε μια τέτοια περίπτωση εξετάζεται και το ενδεχόμενο να διατυπωθούν με βάση τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα εξισώσεις για τις ιδιότητες της ουσίας σε κατάσταση κορεσμού. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας προσπάθειας δεν είναι συνήθως ικανοποιητικά ακριβή. Το πρόβλημα πάντως του ακριβούς εντοπισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων σε

---

<sup>8</sup> Βλέπε και Πετρόπουλος Ν.Π., 1991, Παράρτημα II.



κατάσταση κορεσμού πρέπει έτσι και αλλιώς να αντιμετωπισθεί ακόμα και με τη χρήση των πρώτων λίγων πληροφοριών για τις ιδιότητες, και αυτό διότι η κατάσταση κορεσμού είναι σαφές όριο δύο εντελώς διαφορετικών καταστάσεων της ουσίας, οι οποίες, σύμφωνα και με την εμπειρία από άλλα γνωστά υλικά, ίσως να χρειάζεται να αντιμετωπισθούν με επίσης διαφορετικούς τρόπους όσο αφορά στις εξισώσεις για τις ιδιότητες. Μια εξίσωση κορεσμού αποτελεί επίσης πολύτιμο μέσο για τον υπολογισμό της θερμότητας ατμοποίησης.

II. Υπάρχει φυσικά και μοριακά πανομοιότυπη ουσία γνωστών ιδιοτήτων.

Όταν υπάρχει φυσικά και μοριακά πανομοιότυπη ουσία γνωστών ιδιοτήτων δεν εξυπηρετεί να χρησιμοποιούνται θεωρητικές καταστατικές εξισώσεις διότι δεν παρέχουν την απαιτούμενη ακρίβεια για τις "ουσίες μερικά γνωστών ιδιοτήτων". Αυτό που εξυπηρετεί είναι να τροποποιηθούν ελαφρά οι γενικευμένες εξισώσεις και τα γενικευμένα διαγράμματα, που παριστάνουν με επιτυχία τις ιδιότητες της πανομοιότυπης ουσίας, προκειμένου να υπολογισθούν και οι ιδιότητες της ουσίας που ενδιαφέρει. Για τον έλεγχο της ακρίβειας των τροποποιημένων γενικευμένων εξισώσεων και διαγραμμάτων χρησιμοποιούνται οι υπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις ιδιοτήτων για την ουσία που ενδιαφέρει. Δεν είναι σπάνιες οι περιπτώσεις όπου παρατηρείται καλή σύμπτωση σε μεγάλες περιοχές της ατμώδους αλλά και της υγρής φάσης. Η διατύπωση τουλάχιστον μιας εξίσωσης κορεσμού με βάση τα μέχρι στιγμής πειραματικά αποτελέσματα, και τις τροποποιημένες γενικευμένες εξισώσεις για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες της πανομοιότυπης ουσίας γνωστών ιδιοτήτων μπορεί να επιτευχθεί. Μια τέτοια διατύπωση διευκολύνεται χαρακτηριστικά από το αν υπάρχει καταστατική εξίσωση ή έστω μόνο εξίσωση κορεσμού για την πανομοιότυπη ουσία. Χρησιμοποιείται και σε αυτή την περίπτωση η αρχή των αντιστοιχουσών καταστάσεων<sup>9</sup> με εξαιρετικά καλά αποτελέσματα, που μερικές φορές προσεγγίζουν και την ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης. Είτε με βάση τα λιγοστά πειραματικά αποτελέσματα για την κατάσταση κορεσμού της εξεταζόμενης ουσίας, είτε με βάση τις εξισώσεις για τις άλλες θερμοδυναμικές ιδιότητες στην κατάσταση κορεσμού της πανομοιότυπης ουσίας -αν υπάρχουν- επιδιώκεται και η δημιουργία αντιστοιχών εξισώσεων ιδιοτήτων στην κατάσταση κορεσμού με καλά αποτελέσματα. Η ευρύτερη εφαρμογή της αρχής των αντιστοιχουσών καταστάσεων και πέρα από την κατάσταση κορεσμού, με τη χρησιμοποίηση άλλων εξισώσεων ιδιοτήτων που πιθανόν να υπάρχουν για την πανομοιότυπη ουσία, δίνει επίσης αποδεκτά αποτελέσματα για τις ιδιότητες της εξεταζόμενης ουσίας.

---

<sup>9</sup> Βλέπε και Πετρόπουλος Ν.Π., 1991, Παράρτημα II.

### 2.5.3 Ουσίες μάλλον γνωστών ιδιοτήτων.

Το αν υπέρχει για αυτήν την ουσία άλλη φυσικά και μοριακά πανομοιότυπη ουσία γνωστών ιδιοτήτων είναι ως επί το πλείστον αδιάφορο. Η μοναδική επίπτωση μιας τέτοιας -μάλλον απίθανης- ελλείψεως συνιστά μία μικρή επιμήκυνση της σχετικής έρευνας. Τα πολλά και καλά πειραματικά δεδομένα επιτρέπουν συνήθως την ανάπτυξη των ζητούμενων ειδικών εξισώσεων ιδιοτήτων της ουσίας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται ώστε τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό να είναι πρωτογενή (raw data) να μην έχουν δηλαδή περάσει από κάποια επεξεργασία εξομάλυνσης (smoothed data). Αυτό είναι αναγκαίο για να διατηρείται η πραγματική μεταβλητότητα των πειραματικών τιμών. Πράγματι έχει διαπιστωθεί ότι οι εξομαλυσμένες πειραματικές τιμές που αναφέρονται στην ίδια περιοχή και προέρχονται από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες τις περισσότερες φορές αλληλοσυγκρούονται, πράγμα που συνήθως δεν συμβαίνει αν πρόκειται για πρωτογενείς τιμές. Στερείται νοήματος, στην περίπτωση ουσίας μάλλον γνωστών ιδιοτήτων, η χρησιμοποίηση κατάλληλα τροποποιημένων γενικευμένων εξισώσεων και διαγραμμάτων καθώς επίσης και εξισώσεων ιδιοτήτων πανομοιότυπων ουσιών προσαρμοσμένων στην εξεταζόμενη ουσία με βάση την αρχή των αντιστοιχουσών καταστάσεων. Για τη δημιουργία των αναγκαίων ειδικών εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σύγχρονες αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης αναδρομής. Η διαδικασία που συνηθίζεται ακολουθεί τα διαδοχικά βήματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1. Συγκέντρωση, ταξινόμηση, ποσοτική, και το σημαντικότερο, ποιοτική αξιολόγηση των παραχθέντων πειραματικών αποτελεσμάτων για τις ιδιότητες της ουσίας.
2. Τεχνητή συμπλήρωση των πειραματικών δεδομένων με πληροφορίες που μπορούν να παραχθούν από αυτά.

Η τεχνητή συμπλήρωση των πειραματικών δεδομένων είναι ο ουσιαστικότερος σταθμός στο δρόμο για τη διατύπωση εξισώσεων ιδιοτήτων μετά την ολοκλήρωση του σημαντικότερου μέρους των πειραματικών μετρήσεων. Για να κατανοηθεί το βάρος που πρέπει να δοθεί σε αυτό το βήμα πρέπει να συνειδητοποιήσει κανείς ότι οι πειραματικές μετρήσεις αποτελούν στην πραγματικότητα μεμονωμένους θύλακες πληροφοριών, μέσα σε μια μάλλον ευρεία περιοχή που στο μεγαλύτερο μέρος της είναι πειραματικά άγνωστη. Οι θύλακες αυτοί εντοπίζονται, όπως είναι και αναμενόμενο, στα τμήματα που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, δηλαδή αποτελούνται από μετρήσεις στις καταστάσεις κορεσμού, μετρήσεις στη γειτονιά του τριπλού και του κρίσιμου σημείου και γενικά μετρήσεις στην υγρή και την ατμώδη φάση, μόνο όμως σε περιοχές πιέσεων και θερμοκρασιών, όπου συνήθως εργάζεται ή πρόκειται να εργασθεί η εξεταζόμενη ουσία. Έτσι, τα πειραματικά αποτελέσματα για τις

ιδιότητες μίας ουσίας, επειδή αφήνουν μεγάλα κενά, δεν είναι ποτέ από μόνα τους αρκετά για την κατασκευή των αντίστοιχων εξισώσεων και απαιτείται ο τεχνητός εμπλουτισμός τους.

Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εύκολη η παραγωγή συμπληρωματικών δεδομένων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και ειδικά για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού. Οι τεχνικές που ακολουθούνται δεν θα αναλυθούν εδώ, συνίστανται πάντως στη χρησιμοποίηση αριθμητικών μεθόδων παρεμβολής, απλών θερμοδυναμικών σχέσεων, γενικευμένων καταστατικών εξισώσεων και κυρίως εξισώσεων αμοιβαίων δράσεων, των οποίων οι συντελεστές μπορούν να υπολογισθούν εύκολα δεδομένης της πολυωνυμικής τους μορφής, ακόμα και εξισώσεων ιδιοτήτων φυσικά και μοριακά συγγενών ουσιών σε συνδυασμό με την αρχή των αντιστοιχουσών καταστάσεων. Δεν αποκλείεται επίσης, σε λίγες περιπτώσεις, η χρησιμοποίηση και γραφικών μεθόδων. Η αξιοπιστία των υπολογισμένων δεδομένων είναι μάλλον δύσκολο να αποδειχθεί. Οι υπολογισμοί μπορούν να θεωρηθούν ακριβείς αν ο τρόπος με τον οποίο έγιναν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί με επιτυχία και μάλιστα για τον εμπλουτισμό μετρήσεων για μία συγγενή ουσία ή αν υπάρχουν πειραματικές μετρήσεις για συγγενή ουσία, για την οποία η εφαρμογή αυτού του τρόπου υπολογισμού δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτές.

Η τεχνητή συμπλήρωση των πειραματικών δεδομένων με πληροφορίες που μπορούν να παραχθούν από αυτά, δηλαδή το βήμα 2, ακολουθείται από:

3. Διατύπωση εξίσωσης κορεσμού.
4. Διατύπωση καταστατικής εξίσωσης για την ατιμώδη φάση.
5. Διατύπωση καταστατικής εξίσωσης για την υγρή φάση.
6. Ενοποίηση κατά το δυνατόν των δύο καταστατικών εξισώσεων σε μία.
7. Τροποποίηση κατά το δυνατόν της καταστατικής εξίσωσης ώστε να εκπληρώνεται η απαίτηση θερμοδυναμικής συνέπειας. Έλεγχος της ακρίβειας της διατύπωσης για την εξίσωση κορεσμού σε σχέση με την καταστατική εξίσωση και εφαρμογή -αν απαιτείται- αναγκαίων τροπούσεων στην εξίσωση κορεσμού.
8. Υπόδειξη των καλύτερων τρόπων με τους οποίους μπορούν να υπολογισθούν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες με βάση την καταστατική εξίσωση.
9. τροποποίηση της καταστατικής εξίσωσης ώστε να πάρει ανηγμένη μορφή.
10. διατύπωση εξισώσεων για τις ιδιότητες μεταφοράς.

11. τροποποίηση των εξισώσεων για τις ιδιότητες μεταφοράς ώστε να πάρουν ανηγμένη μορφή.

Κάθε ένα από τα προηγούμενα βήματα μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για έναν ή και περισσότερους ερευνητές. Οι καλύτερες από τις διατυπώσεις εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες μίας ουσίας αναγνωρίζονται και υιοθετούνται επίσημα από τα αντίστοιχα Διεθνή Συνέδρια.

## **2.6 Περιοριστικές συνθήκες για τις εξισώσεις ιδιοτήτων.**

Ένα "λεπτό" σημείο στη διατύπωση εξισώσεων ιδιοτήτων και κυρίως εξισώσεων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, που αφορά όχι μόνο στην ορθότητα των σχέσεων αυτών καθεωτών αλλά και στη συγκρισιμότητά τους με άλλες σχέσεις που δημιουργήθηκαν για τον ίδιο σκοπό όσο και με πειραματικές μετρήσεις, είναι η συμβατότητα των κλιμάκων θερμοκρασίας, εσωτερικής ενέργειας και εντροπίας. Η δυσκολία που υπήρχε με τις κλιμακές θερμοκρασίας έχει αντιμετωπισθεί μάλλον οριστικά με τη διατύπωση της απόλυτης κλιμακας θερμοκρασιών<sup>10</sup>, αλλά τόσο η εσωτερική ενέργεια όσο και η εντροπία παραμένουν σχετικά μεγέθη οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από εκείνες που αυθαίρετα λαμβάνονται ως τιμές αναφοράς, σε μία πίεση και θερμοκρασία αναφοράς. Οι περισσότεροι ερευνητές συντηθίζουν να δέχονται ως σημείο αναφοράς το τριπλό σημείο όπου αυθαίρετα επιλέγουν μηδενικές τιμές για την εσωτερική ενέργεια και για την εντροπία. Ειδικά για το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ αυτή η επιλογή είναι θεσμοθετημένος κανόνας με αποφάσεις Διεθνών Συνεδρίων.

Αλλά όσο και να φαίνεται παράξενο δεν αρκεί να αναπαράγει μόνο μια εξίσωση με ακρίβεια κάποια πειραματικά αποτελέσματα, ούτε επιπλέον να υπακούει σε κάποιους προφανείς μαθηματικούς νόμους, όπως δηλαδή να είναι συνεχής, παραγωγίσιμη, ολοκληρώσιμη κτλ.

Μια εξίσωση ιδιοτήτων οφείλει να αναπαριστά με καλή προσέγγιση και τη φυσική πραγματικότητα της ουσίας την οποία πραγματεύεται. Συγκεκριμένα, τα διάφορα υλικά για τα οποία χρησιμοποιούνται ή ζητούνται να διατυπωθούν εξισώσεις ιδιοτήτων διαθέτουν ορισμένα κοινά φυσικά χαρακτηριστικά που συνοψίζονται ως εξής:

- ύπαρξη υγρής φάσεως,
- ύπαρξη ατιμώδους φάσεως,
- κατάσταση κορεσμού (συνύπαρξη υγρού και ατμού της ουσίας),
- τριπλό σημείο (συνύπαρξη στερεού, υγρού και ατμού της ουσίας),

- κρίσιμο σημείο (πέραν αυτού υπάρχει μόνο ατμός της ουσίας) και το σημαντικότερο
- ομοιότητα στη μορφή των διαφόρων γραφικών παραστάσεων των ιδιοτήτων.

Η επιτυχία μιας καταστατικής εξίσωσης ή μιας εξίσωσης ιδιοτήτων δεν χαρακτηρίζεται μόνο από την καλή περιγραφή των δύο φάσεων και της κατάστασης κορεσμού αλλά και από την ικανοποίηση των συνθηκών που επικρατούν στο τριπλό και κατά δεύτερο λόγο στο κρίσιμο σημείο. Οι συνθήκες αυτές αποτελούν και τους πρώτους περιορισμούς που πρέπει να επιβληθούν σε μία υπό κατασκευή εξίσωση. Αυτό επιδιώχθηκε από πολύ νωρίς από τους περισσότερους από εκείνους τους ερευνητές που ασχολήθηκαν με τη διατύπωση εξισώσεων ιδιοτήτων. Παρόλαυτά, είναι λίγα σήμερα τα υλικά για τα οποία επιτεύχθηκε συμφωνία εξισώσεων και συνθηκών όσο αφορά στο κρίσιμο σημείο.

Υπάρχουν επιπλέον και μία σειρά από περιορισμούς, οι οποίοι βοηθούν να εξασφαλιστεί ότι οι θερμοφυσικές ιδιότητες υπολογίζονται με τρόπο που πράγματι αναπαριστά τη φυσική πραγματικότητα. Αυτοί οι περιορισμοί εξασφαλίζουν περαιτέρω και την ομοιότητα στη μορφή των διαφόρων γραφικών παραστάσεων των ιδιοτήτων. Γενικά πρέπει να ισχύει:

(1) Οι συσχετίσεις  $P_s = P_s(v_{gs})$  και  $P_s = P_s(v_{gs})$  της πίεσης κορεσμού σε συνάρτηση με τον ειδικό όγκο του κορεσμένου υγρού και τον ειδικό όγκο του κορεσμένου ατμού αντίστοιχα, οφείλουν να παρουσιάζουν το ίδιο μέγιστο και να στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω στο κρίσιμο σημείο<sup>11</sup>.

(2) Το ίδιο πρέπει να συμβαίνει και για τις συναρτήσεις  $h_{gs}(T)$ ,  $s_{gs}(T)$ ,  $h_{gs}(T)$  και  $s_{gs}(T)$  για την ενθαλπία και την εντροπία του κορεσμένου υγρού και ατμού αντίστοιχα.

(3) Στη γειτονία του τριπλού σημείου, σύμφωνα και με τους Levelt Sengers J.M.H. et al., 1976, είναι συνήθως:

$$d^2P/dT^2 \approx (T_c - T)^{-\theta}$$

(πχ. για το βαρύ νερό λαμβάνεται  $\theta = 0.1$ )

(4) Υπάρχει συνήθως καμπύλη μέγιστης πυκνότητας όπου ισχύει

$$(\partial P/\partial T)_p = 0$$

<sup>10</sup> Τελευταία τροποποίηση είναι αυτή της Διεθνούς Πρακτικής Κλίμακας Θερμοκρασιών του 1990 - IPTS 90.

<sup>11</sup> Πρώτη παράγωγος ως προς τον ειδικό όγκο μηδέν, δεύτερη παράγωγος ως προς τον ειδικό όγκο μεγαλύτερη του μηδενός.

(5) Πρέπει να είναι γνωστές μία ή και περισσότερες τιμές του δεύτερου συντελεστή αμοιβαίων δράσεων σε υψηλές και κατά προτίμηση σε υπερκρίσιμες θερμοκρασίες.

Οι παραπάνω περιορισμοί και όσοι άλλοι είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν σε άλλες εξισώσεις ιδιοτήτων<sup>12</sup> οφείλουν να αποτελέσουν μέρος της αριθμητικής διαδικασίας υπολογισμού τους. Αν αυτό δε γίνει τότε σπάνια επαληθεύονται εκ των υστέρων. Τέτοιου είδους περιορισμοί μολονότι σημαντικοί για την ποιότητα μιας εξίσωσης ιδιοτήτων εφαρμόζονται μόνο από λίγους ερευνητές που προσπαθούν σχετικά.

Μεγάλη προσοχή έδωσαν σε τέτοιους περιορισμούς στις εργασίες τους για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος οι Hill P.G. και MacMillan R.D.C., 1979a, οι Hill P.G. et al., 1982 και οι Hill P.G. και MacMillan R.D.C., 1988. Αντίθετα οι περισσότερες από τις παλαιότερες σχετικές εργασίες αποφεύγουν να θέξουν σχετικά θέματα.

## **2.7 Οι τιμές των καταστατικών μεγεθών στο κρίσιμο σημείο.**

Υπάρχουν περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση σε θερμοδυναμικούς υπολογισμούς των τιμών των καταστατικών μεγεθών πίεσης, θερμοκρασίας και ειδικού όγκου στο κρίσιμο σημείο. Για παράδειγμα αυτές οι τιμές μπορεί να είναι απαραίτητες σε μία καταστατική εξίσωση ή σε μία εξίσωση για ιδιότητα μεταφοράς. Εν προκειμένω οι τιμές των καταστατικών μεγεθών στο κρίσιμο σημείο έχουν το ρόλο σταθερών της καταστατικής εξίσωσης ή της εξίσωσης ιδιότητας μεταφοράς. Προσοχή απαιτείται ώστε ο χρήστης τέτοιων εξισώσεων να δέχεται σαν τιμές των καταστατικών μεγεθών στο κρίσιμο σημείο, εκείνες τις οποίες υιοθετεί και ο κατασκευαστής της καταστατικής εξίσωσης ή της εξίσωσης ιδιότητας μεταφοράς, έτσι και αν αυτές δεν αναταποκρίνονται ακριβώς στην πραγματικότητα του κρίσιμου σημείου, όπως αυτή προκύπτει από άλλες έρευνες. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι θερμοφυσικές ιδιότητες θα υπολογισθούν με την ακρίβεια που επεδίωξε ο κατασκευαστής των εξισώσεων κυρίως στις περιοχές μακριά από το κρίσιμο σημείο, οι οποίες εξάλλου είναι και αυτές που συνήθως ενδιαφέρουν για τα περισσότερα εργαζόμενα μέσα. Γίνεται αντιληπτό ότι σε περίπτωση που ο χρήστης αντικαταστήσει τις τιμές αυτών των σταθερών, διακινδυνεύει να αλλοιώσει σημαντικά την ακρίβεια των εξισώσεων.

Οι τιμές των καταστατικών μεγεθών πίεσης, θερμοκρασίας και πυκνότητας στο κρίσιμο σημείο που παίρνουν το ρόλο τέτοιων σταθερών στις εξισώσεις ιδιοτήτων συμβολίζονται σε

---

<sup>12</sup> Αναφέρονται μέχρι και δεκατέσσερις τέτοιες συνθήκες ενώ χρησιμοποιούνται συνήθως μέχρι και επτά -βλέπε και Keyes F.G. et al., 1968.

αυτή τη Διδακτορική Διατριβή με  $P^*$ ,  $T^*$  και  $\rho^*$  αντίστοιχα, προκειμένου να μην συγχέονται με τις ακριβείς τιμές αυτών των μεγεθών, δηλαδή τις  $P_c$ ,  $T_c$  και  $\rho_c$ . Οι τιμές  $P^*$ ,  $T^*$  και  $\rho^*$  ονομάζονται **ψευδοκρίσιμες τιμές των καταστατικών μεγεθών**.

Παρόμοιο ρόλο σταθερών για τις εξισώσεις ιδιοτήτων, παίζουν οι τιμές του Μοριακού Βάρους (MB) και της σταθερής R. Τόσο η τιμή του MB όσο και η τιμή R που χρησιμοποιούνται σε μια εξίσωση θερμοφυσικής ιδιότητας ως σταθερές δεν πρέπει να αντικαθιστώνται από τον χρήστη της εξίσωσης με άλλες τιμές, έστω και αν αυτές θεωρούνται ακριβέστερες.

## **2.8 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΙΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ Ή ΚΑΙ ΆΛΛΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.**

Γενικά για τον έλεγχο της ακρίβειας μιας καταστατικής εξίσωσης ή άλλων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες προτείνονται δύο μέθοδοι: είτε η απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων των εξισώσεων με διατιθέμενα πειραματικά δεδομένα, είτε η σύγκρισή τους με αναγνωρισμένους Πίνακες Πλαισίου για τις υπό έλεγχο τιμές των ιδιοτήτων.

### **2.8.1 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα.**

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο συγκρίνονται τα αποτελέσματα των εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις, όπου και αν υπάρχουν τέτοιες. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το αν οι πειραματικές μετρήσεις είναι πρωτογενείς ή έχουν με κάποιο τρόπο εξομαλυνθεί, παρόλο που αυτό δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο όσο στην περίπτωση που τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν κάποια αριθμητική διαδικασία για τη διατύπωση μίας συσχέτισης. Μετά τη σύγκριση σημειώνεται συνήθως η μέγιστη και ελάχιστη παρατηρούμενη απόκλιση, υπολογίζεται η μέση τιμή των αποκλίσεων και σπανιότερα αναφέρεται η τυπική τους διασπορά και η περιοχή όπου εμφανίζονται οι μεγαλύτερες ασυμφωνίες.

Αυτή η μέθοδος ελέγχου ακρίβειας δεν θέτει καμία ενδιάμεση επεξεργασία μεταξύ των υπολογισμών και των πειραματικών δεδομένων. Ο ευθύς αυτός δρόμος όμως, είναι δυνατόν να αποβεί και το μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου. Γιατί αν μεν το πλήθος των πειραματικών εργασιών που ασχολούνται με μετρήσεις μιας ιδιότητας σε μια περιοχή είναι μικρό (μία ή δύο εργασίες) είναι εύκολο να προβεί κανείς στις απαραίτητες συγκρίσεις, αν όμως οι σχετικές εργασίες είναι περισσότερες είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποφασισθεί

μεμονωμένα ποιές από αυτές ή και ποιός συνδυασμός τους είναι ο καταλληλότερος για να χρησιμοποιηθεί σαν αξιόπιστη βάση ελέγχου. Υπενθυμίζεται εδώ ότι τα πειράματα μετρήσεων μιας θερμοφυσικής ιδιότητας, ιδιαίτερα όταν έχουν γίνει από διαφορετικούς ερευνητές και εργαστήρια, τις περισσότερες φορές αφορούν εντελώς άλλες περιοχές ενδιαφέροντος ή/και αποκλίνουν σημαντικά μεταξύ τους. Επιπλέον ο χαρακτήρας κάθε ομάδας πειραματικών μετρήσεων είναι γενικά "τοπικός". Ως εκ τούτου δεν είναι δυνατόν να βγούν με αυτόν τον τρόπο συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της ελεγχόμενης εξίσωσης για μεγάλο μέρος της περιοχής ισχύος της και χρειάζονται πολλαπλές συγκρίσεις.

Παρολανά η απευθείας σύγκριση με πειραματικά δεδομένα στάθηκε προσφύλης για πολλούς από τους ερευνητές που ασχολήθηκαν με την κατασκευή και τον έλεγχο εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς. Μάλιστα οι σημερινές δυνατότητες εύκολης αποτύπωσης σε διαγράμματα, τόσο των πειραματικών τιμών όσο και αυτών που υπολογίζονται από συσχετίσεις για τις ιδιότητες, προσφέρει εποπτεία διευκολύνοντας έτσι την σύγκριση. Αναφέρονται εδώ χαρακτηριστικά οι σημαντικές εργασίες των Hill P.G. et al., 1981; 1982 και των Matsunaga N. και Nagashima A., 1983a που αφορούν στο βαρύ ύδωρ. Οι περισσότεροι από εκείνους που χρησιμοποίησαν αυτή τη μέθοδο για να ελέγξουν την ακρίβεια των εξισώσεων τους είναι ιδιαίτερα προσεκτικοί σχετικά με τα πειραματικά αποτελέσματα που χρησιμοποιούν. Εξηγούν γιατί αποφεύγουν ορισμένες ομάδες πειραματικών μετρήσεων -συνήθως αυτό συμβαίνει με τις χρονικά παλαιότερες μετρήσεις- και επιλέγουν τις θεωρούμενες ως πιο αξιόπιστες και μάλιστα, όπως είναι λογικό, αυτές που κυρίως αξιοποίησαν για την τελική διαμόρφωση των εξισώσεων που προτείνουν.

### **2.8.2 Σύγκριση με Πίνακες Πλαισίου.**

Οι Πίνακες Πλαισίου παρέχουν για μια περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών, όχι μόνο τις τιμές των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων ή των ιδιοτήτων μεταφοράς αλλά και τις αποδεκτές ανοχές μέσα στις οποίες αυτές πρέπει να υπολογίζονται. Οι τιμές των ανοχών προκύπτουν από συλλογική επεξεργασία πειραματικών δεδομένων και αναπαριστούν την αβεβαιότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων (βλέπε και § 2.1).

Σημειώνεται ότι Πίνακες Πλαισίου με τιμές ιδιοτήτων, ανοχές κτλ νοούνται για πολλές ουσίες που έχουν τεχνολογικό ενδιαφέρον, όπως ο αέρας, το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ, το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρογονάνθρακες, οι χλωροφθοράνθρακες κ.ά. Ένας Πίνακας Πλαισίου από τη στιγμή που θα καταστρωθεί πρέπει να είναι επδεκτικός σε μεταβολές και τροποποιήσεις, που μπορούν να επφέρουν νεότερες μετρήσεις των ιδιοτήτων. Η αναθεώρηση αυτών των πινάκων πάντως γίνεται μόνο αν έχει συγκεντρωθεί σημαντικός αριθμός νέων



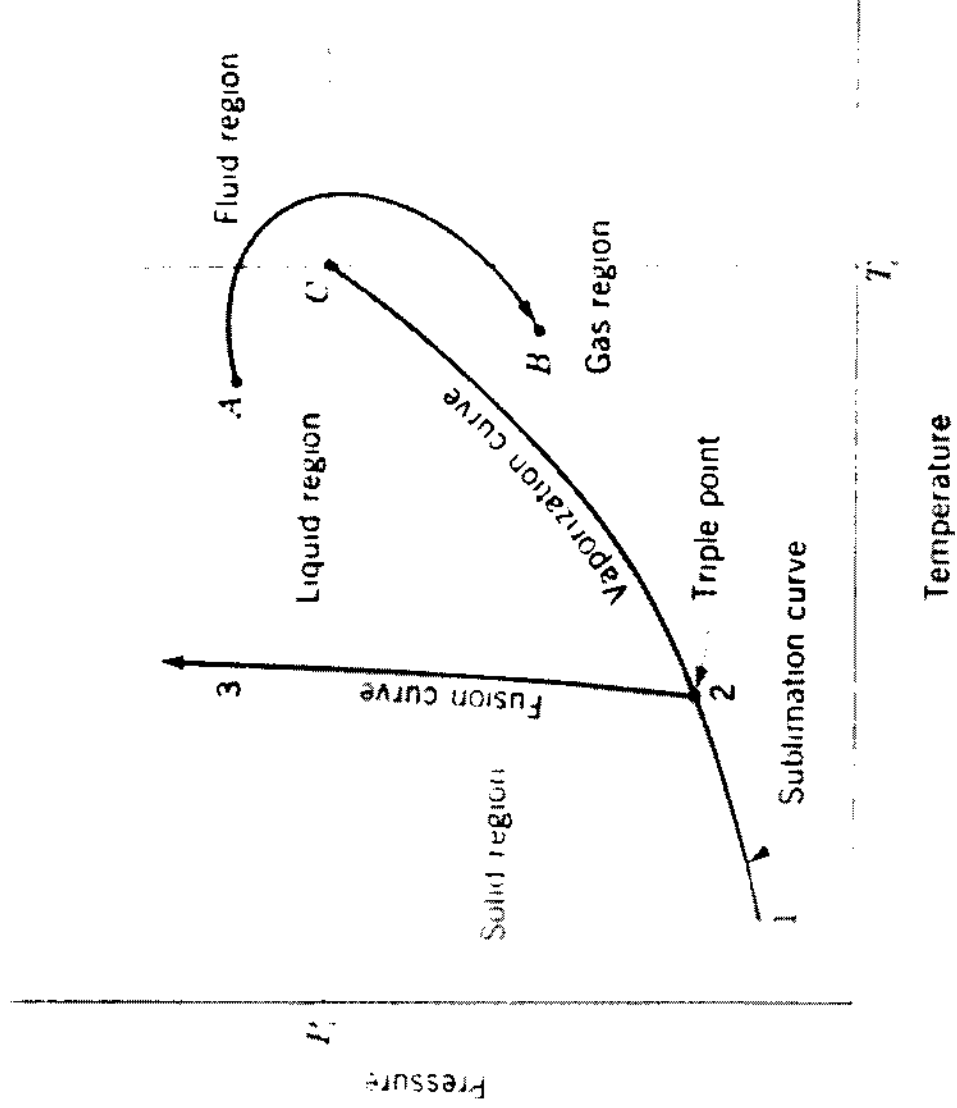
πειραματικών αποτελεσμάτων τα οποία να αλλοιώνουν συνολικά την εικόνα για τις τιμές των ιδιοτήτων και τις αντίστοιχες ανοχές τους.

Είναι φανερό, ότι ένας Πίνακας Πλαισίου ως προϊόν συλλογικής επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων αποτελεί εξαιρετική βάση σύγκρισης για τις εξισώσεις θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων μεταφοράς και το σημαντικότερο δεν παρουσιάζει τα μειονεκτήματα της προηγούμενης μεθόδου της απευθείας σύγκρισης. Σε σχέση με τα μεμονωμένα πειραματικά δεδομένα, έχει μεγάλη περιοχή ισχύος, καλή ακρίβεια και βέβαια συμπεριλαμβάνει πληροφορίες από πολλές διαφορετικές πειραματικές ομάδες μετρήσεων για συγκεκριμένες θερμοφυσικές ιδιότητες.

## **2.9 Απαιτήσεις ακρίβειας των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες.**

Η ζητούμενη ακρίβεια των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες ενός εργαζόμενου μέσου σε θερμοϋδραυλικά συστήματα, όπως είναι τα ψυκτικά μέσα στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος, είναι αυτή που ήδη αναφέρθηκε σε αρκετά σημεία του Κεφαλαίου αυτού ως "**ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης**". Οι εξισώσεις για τις ιδιότητες που καλύπτουν αυτήν την απαίτηση υπολογίζουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς ενός μέσου στις περιοχές πιέσεων και θερμοκρασιών όπου συνήθως αυτό εργάζεται, μέσα στα πλαίσια ανοχών που επιβάλλονται από τους Πίνακες Πλαισίου. Πέρα από την ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης υπάρχει και η καλύτερη "**ακρίβεια επιστημονικής και γενικής χρήσης**" σύμφωνα με την οποία οι θερμοφυσικές ιδιότητες υπολογίζονται γενικά με καλύτερη ακρίβεια και ιδιαίτερα σε περιοχές πιέσεων και θερμοκρασιών πέρα από τις περιοχές εργασίας, όπως πχ. στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου. Πρέπει να σημειωθεί, ότι στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή, υπάρχουν μόνο απαιτήσεις ακρίβειας βιομηχανικής χρήσης. Η ακρίβεια επιστημονικής και γενικής χρήσης δεν έχει νόημα να ζητείται δεδομένου ότι τα ψυκτικά μέσα στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος δεν εργάζονται ως 100% καθαρά, αλλά, όπως είναι φυσικό, αποκτούν προσμίξεις που αλλοιώνουν τη θερμοφυσική τους συμπεριφορά.

## Διαγράμματα του Κεφαλαίου



Διάγραμμα 2-1 : Οι καμπύλες ατμοποίησης, εξάχνωσης και τήξης στο διάγραμμα P-T.

### 3. ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

#### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

3. ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ ΙΣΧΥΟΣ.....	3-i
3.1 Εισαγωγή.....	3-1
3.2 Γενικά για τα χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος.....	3-3
3.3 Το ελαφρύ ύδωρ ως ουσία μάλλον γνωστών ιδιοτήτων.....	3-10
3.3.1 Γενικά για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος.....	3-10
3.3.2 Η καταστατική εξίσωση του F.G. Keyes και των συνεργατών του για την υγρή φάση, την κατάσταση κορεσμού και την ατμώδη φάση.....	3-10
3.3.3 Σχέσεις για τον υπολογισμό των λοιπών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων από την καταστατική εξίσωση του F.G. Keyes και των συνεργατών του.....	3-13
3.3.4 Οι συντελεστές αμοιβαίων δράσεων του ελαφρού ύδατος.....	3-16
3.3.5 Οι ιδιότητες μεταφοράς του ελαφρού ύδατος.....	3-19
3.3.5.1 Η συνεκτικότητα σύμφωνα με τους J.V. Sengers και J.T.R. Watson.....	3-19
3.3.5.2 Η θερμική αγωγιμότητα σύμφωνα με τους J.V. Sengers και J.T.R. Watson.....	3-20
3.3.5.3 Η επιφανειακή τάση σύμφωνα με τον J. Straub και τους συνεργάτες του.....	3-22
3.4 Το βαρύ ύδωρ ως ουσία μάλλον γνωστών ιδιοτήτων.....	3-23
3.4.1 Γενικά για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος.....	3-23
3.4.2 Η καταστατική εξίσωση του P.G. Hill και των συνεργατών του για την υγρή φάση, την κατάσταση κορεσμού και την ατμώδη φάση.....	3-25
3.4.3 Σχέσεις για τον υπολογισμό των λοιπών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων από την καταστατική εξίσωση του P.G. Hill και των συνεργατών του.....	3-29
3.4.4 Οι συντελεστές αμοιβαίων δράσεων του βαρέος ύδατος.....	3-30
3.4.5 Οι ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος.....	3-31
3.4.5.1 Η συνεκτικότητα σύμφωνα με τους N. Matsunaga και A. Nagashima.....	3-32

3.4.5.2	Η θερμική αγωγιμότητα σύμφωνα με τους N. Matsunaga και A. Nagashima.....	3-35
3.4.5.3	Σχόλια για τις εξισώσεις για τη συνεκτικότητα και τη θερμική αγωγιμότητα.....	3-37
3.4.5.4	Η επιφανειακή τάση του βαρέος ύδατος σύμφωνα με τον J. Straub και τους συνεργάτες του.....	3-38
3.5	Το Νάτριο ως ουσία μερικά γνωστών ιδιοτήτων.....	3-40
3.5.1	Σχέσεις για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Na σύμφωνα με τους J.K. Fink και L. Leibowitz.....	3-42
3.5.1.1	Εισαγωγή.....	3-42
3.5.1.2	Εξίσωση κορεσμού και θερμότητα ατμοποίησης.....	3-44
3.5.1.3	Θερμοδυναμικές ιδιότητες του κορεσμένου υγρού.....	3-45
3.5.1.4	Θερμοδυναμικές ιδιότητες του κορεσμένου ατμού.....	3-50
3.5.1.5	Ιδιότητες μεταφοράς.....	3-54

# ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

### 3.1 Εισαγωγή.

Η αξιολογότερη σήμερα ειρηνική πρακτική εφαρμογή των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος (ΠΑΙ) είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της παραγωγής ατμού, όπως και στους συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Ο ατμός παράγεται από τη θερμότητα που εκλύεται από τις σχάσεις στον αντιδραστήρα και χρησιμοποιείται για την κίνηση στροβιλογεννήτριας (Αγγελόπουλος Μ., 1989).

Η ατμοπαραγωγή μπορεί να γίνει είτε **(α) στον ίδιο τον αντιδραστήρα, είτε (β) έξω από τον αντιδραστήρα** σε μία ή περισσότερες μονάδες ατμοπαραγωγής, στις οποίες μεταφέρεται η θερμότητα του αντιδραστήρα με κατάλληλο Ψυκτικό Μέσο (ΨΜ). Και στις δύο περιπτώσεις, το κύκλωμα κυκλοφορίας του ΨΜ, στο οποίο περιλαμβάνεται και ο αντιδραστήρας, διατηρείται σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία για ευνόητους θερμοδυναμικά λόγους. Το Διάγραμμα 3-1 παρέχει σε πολύ απλοποιημένη μορφή, τη βασική συγκρότηση ενός Πυρηνοληλεκτρικού Σταθμού (ΠΗΣ), για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις ατμοπαραγωγής.

Γενικά το "Σύστημα Πυρηνικής Ατμοπαραγωγής - ΣΠΑ" (Nuclear Steam Supply System – NSSS) περιλαμβάνει στη μεν περίπτωση **(α)** τον αντιδραστήρα και την αντλία κυκλοφορίας, στη δε περίπτωση **(β)** τον αντιδραστήρα, την ή τις μονάδες ατμοπαραγωγής και την ή τις σχετικές αντλίες κυκλοφορίας του ΨΜ.

Η συγκρότηση ενός ΠΗΣ συμπληρώνεται με το "Σύστημα Ηλεκτροπαραγωγής", το οποίο, όπως και στους συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς αποτελείται από το στρόβιλο, τη γεννήτρια, τον συμπυκνωτή (ψυγείο) με το σύστημα ψύξεώς του, την αντλία κυκλοφορίας για την επιστροφή του συμπυκνώματος και τέλος τον μετασχηματιστή ανυψώσεως της τάσεως από την τάση της γεννήτριας στην τάση του συστήματος μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Όπως γίνεται φανερό, το Σύστημα Πυρηνικής Ατμοπαραγωγής κατέχει σε έναν ΠΗΣ, τη θέση που κατέχει ο λέβητας σε ένα συμβατικό θερμοηλεκτρικό σταθμό καύσεως πετρελαίου, άνθρακα, λιγνίτη κτλ.

Ο ρόλος που παίζουν τα ΨΜ εντοπίζεται στην με σταθερό ρυθμό απαγωγή αλό τον πυρήνα ενός αντιδραστήρα της θερμότητας που αυτός παράγει, εξασφαλίζοντας έτσι την ανάπτυξη σε αυτόν χρονικά αμετάβλητων θερμοκρασιακών πεδίων· αυτό αποτελεί και την βασική προϋπόθεση για τη σταθερή λειτουργία ενός ΠΑΙ και επομένως και ενός ΠΗΣ (Σιμόπουλος Σ.Ε., 1983).

Τα ΨΜ ενός ΠΑΙ μπορούν να είναι υγρά ή αέρια. Ένα ψυκτικό μέσο πρέπει να πληροί όσο το δυνατό περισσότερες από τις πιο κάτω απαιτήσεις:

#### A. Θερμοφυσικές

- Υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, υψηλή θερμική αγωγιμότητα και χαμηλή συνεκτικότητα.
- Χαμηλό σημείο τήξεως (ώστε το ΨΜ να παραμένει ρευστό κατά το δυνατό, κατά το κλείσιμο του αντιδραστήρα).
- Μικρές πιέσεις και μεγάλες θερμοκρασίες ατμοποίησης.

#### B. Πυρηνικές

- Χαμηλή ενεργό διατομή απορρόφησης θερμικών νετρονίων.
- Επιβραδυντικές ιδιότητες ανάλογες με τον τύπο του αντιδραστήρα.
- Αντίσταση στη ραδιόλυση και στη θερμόλυση.
- Ελάχιστη ραδιενεργό ενεργοποίηση.

#### Γ. Άλλες

- Χημική ευστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Ελάχιστη τοξικότητα, ελάχιστο κίνδυνο ανάφλεξης και έκρηξης.
- Ελάχιστη διαβρωτική επίδραση στα λοιπά υλικά του ΠΑΙ.
- Χαμηλό κόστος και υψηλή διαθεσιμότητα.

Φυσικά δεν είναι δυνατό να υπάρχουν ψυκτικά που να ικανοποιούν ταυτόχρονα όλα τα ποπάνω κριτήρια.

Από πυρηνικής πλευράς δεν υπάρχει ανώτερο όριο ασφαλείας για τη ροή νετρονίων σε έναν αντιδραστήρα ισχύος. Όμως, μεταλλουργικοί κυρίως λόγοι, όπως άλλωστε και στους συμβατικούς Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς, θέτουν ανώτατα όρια θερμοκρασιών και κατά συνέπεια θερμικών και νετρονικών ροών που πρέπει να επικρατούν σε έναν ΠΑΙ. Υπέρβαση αυτών των ορίων μπορεί να συνεπάγεται τήξη του πυρηνικού καυσίμου, καταστροφή του περιβλήματός του και έκλυση ραδιενεργών προϊόντων σχάσεως στο περιβάλλον. Αυτό και μόνο δείχνει πόσο προσεκτική πρέπει να είναι η μελέτη της ασφαλούς λειτουργίας του ψυκτικού συστήματος ενός ΠΑΙ. Αποφασιστικό ρόλο σε μία ορθή τέτοια μελέτη, αλλά και στη γρήγορη εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός ΠΑΙ σε μεταβατικές καταστάσεις, πχ ενάυσεως, σβέσεως ή και ατυχήματος απώλειας ψυκτικού παίζει η ικανοποιητική γνώση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων σήμερα ΨΜ, δεδομένου μάλιστα ότι υπάρχει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των θερμοφυσικών και των πυρηνικών ιδιοτήτων που ενός ΨΜ.

### **3.2 Γενικά για τα χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος.**

Τα κυριότερα υγρά ΨΜ που χρησιμοποιούνται σήμερα στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος είναι **το ελαφρύ και το βαρύ νερό** (H<sub>2</sub>O και D<sub>2</sub>O) και **τα υγρά μέταλλα** (συνήθως το Νάτριο, Na), ενώ το κυριότερο αέριο ΨΜ που ακόμα οριακά χρησιμοποιείται είναι **το διοξείδιο του άνθρακα** (CO<sub>2</sub>). Αλλά ψυκτικά μέσα που κατά καιρούς δοκιμάστηκαν πειραματικά ή χρησιμοποιήθηκαν και σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι τα αέρια άζωτο, ήλιο, υδρογόνο, τα μίγματα τους και τα μίγματά τους με διοξείδιο του άνθρακα, και τα υγρά μέταλλα λίθιο, κάλιο, βισμούθιο, μόλυβδος, τα κράματά τους, τα κράματά τους με νάτριο και τέλος ορισμένες υγρές οργανικές ενώσεις.

Το ελαφρύ ύδωρ χρησιμοποιείται στους αντιδραστήρες "ύδατος ζέοντος τύπου" (Boiling Water Reactors - BWR) και στους αντιδραστήρες "ύδατος πεπαισμένου τύπου" (Pressurized Water Reactors - PWR). Στους αντιδραστήρες τύπου BWR η ατμοπαραγωγή γίνεται στον ίδιο τον αντιδραστήρα -περίπτωση (α), Διάγραμμα 3-1, ενώ στους αντιδραστήρες τύπου PWR, η ατμοπαραγωγή γίνεται έξω από τον αντιδραστήρα -περίπτωση (β), Διάγραμμα 3-1. Το βαρύ ύδωρ χρησιμοποιείται στους ειδικούς για αυτό το σκοπό αντιδραστήρες "πεπαισμένου τύπου" CANDU (CANadian

Deuterium Uranium). Το Νάτριο χρησιμοποιείται στους αντιδραστήρες "υγρών μετάλλων - ταχέων νετρονίων" (Liquid Metal Fast Breeder Reactors - LMFBR). Τόσο στους αντιδραστήρες τύπου CANDU, όσο και στους αντιδραστήρες τύπου LMFBR έχουμε ατμοπαραγωγή περίπτωσης (β).

Η τυπική περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών στις οποίες εργάζεται το ελαφρύ ύδωρ, όταν ο ΠΑΙ λειτουργεί σε πλήρη ισχύ, είναι:

- στους αντιδραστήρες τύπου BWR, 70 bar, 220 - 290 °C.
- στους αντιδραστήρες τύπου PWR, 150 - 160 bar, 290 - 330 °C.

Η τυπική περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών στις οποίες εργάζεται το βαρύ ύδωρ στους αντιδραστήρες τύπου CANDU (πλήρης ισχύς) είναι:

- 100 -110 bar, 270 -310 °C.

Στους υδροψυκτους αντιδραστήρες ο επιτυγχανόμενος ρυθμός απαγωγής θερμότητας από τον πυρήνα του ΠΑΙ κυμαίνεται μεταξύ 28 - 45 kWm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>.

Η τυπική περιοχή θερμοκρασιών στις οποίες εργάζεται το Νάτριο στους αντιδραστήρες τύπου LMFBR είναι:

- 340 - 550 °C (το κύκλωμα ψύξεως δεν τηρείται υπό πίεση διότι το Νάτριο ακόμα και σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες παραμένει υγρό).

Ο επιτυγχανόμενος ρυθμός απαγωγής θερμότητας από τον πυρήνα του ΠΑΙ φθάνει περί τα 250 kWm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ θερμοφυσικών και πυρηνικών ιδιοτήτων ενός ψυκτικού μέσου είναι πάρα πολύ ισχυρή στην περίπτωση των υδροψυκτων αντιδραστήρων, δεδομένου ότι το πλήθος των ελαστικών σκεδάσεων και των απορροφήσεων των νετρονίων - και ως εκ τούτου η παραγωγή των θερμικών νετρονίων που παράγουν τις σχάσεις- εξαρτάται, όπως είναι φυσικό, από την πυκνότητα του ψυκτικού μέσου. Η τελευταία δεν παραμένει γενικά σταθερή, λόγω των μεταβολών στην πίεση και τη θερμοκρασία στο εσωτερικό των καναλιών ψύξεως των ράβδων πυρηνικού καυσίμου. Το πρόβλημα είναι πολύπλοκότερο στην περίπτωση των αντιδραστήρων ζέοντος τύπου όπου συνυπάρχει ατμός και υγρή φάση γύρω από τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου. Τονίζεται επομένως ότι η ακριβής γνώση της σύστασης του διαφαστικού



μίγματος υγρού - ατμού και ως εκ τούτου της πυκνότητας κατά μήκος ενός καναλιού ψύξεως επιτρέπει την ακριβή εκτίμηση των επικρατούντων επιβραδυντικών ιδιοτήτων του ψυκτικού, τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας όσο και σε περιπτώσεις εκτάκτων καταστάσεων που δημιουργούνται από ατύχημα απώλειας ψυκτικού.

Οι δείκτες που μπορεί να χαρακτηρίσει συνδυασμένα τις επιβραδυντικές ικανότητες ενός μέσου, εν προκειμένω του ψυκτικού που ενδεχομένως λειτουργεί και ως επιβραδυντής, είναι το γινόμενο  $\xi\Sigma_{se}$  που ονομάζεται **ικανότητα επιβραδύνσεως**.

Όπου:

- $\xi$  η μέση αύξηση της ληθαργίας (ισοδύναμα: το μέτρο της ικανότητας μείωσης της ενέργειας των νετρονίων ανά ελαστική σκέδαση)
- $\Sigma_{se}$  η μακροσκοπική ενεργός διατομή ελαστικής σκέδασης σε  $\text{cm}^{-1}$  (ισοδύναμα: το μέτρο της πιθανότητας πραγματοποίησης ελαστικής σκεδάσεως κατά τις συγκρούσεις των νετρονίων με πυρήνες του μέσου)

Όσο μεγαλύτερο είναι το γινόμενο  $\xi\Sigma_{se}$  τόσο καλύτερες επιβραδυντικές ιδιότητες έχει το μέσο.

Για το ελαφρύ ύδωρ είναι  $\xi\Sigma_{sc} = 1.35 \text{ cm}^{-1}$  με  $\xi = 0.920$

Για το βαρύ ύδωρ είναι  $\xi\Sigma_{se} = 0.176 \text{ cm}^{-1}$  με  $\xi = 0.509$

Ένα υλικό, προκειμένου να χαρακτηριστεί καλός επιβραδυντής πρέπει πέρα από ικανοποιητικές επιβραδυντικές ιδιότητες να παρουσιάζει και ασθενή ικανότητα απορρόφησης νετρονίων -κυρίως θερμικών νετρονίων. Το μέγεθος που χαρακτηρίζει ένα μέσο από άποψη ικανότητας απορρόφησης νετρονίων είναι η μακροσκοπική ενεργός διατομή απορρόφησης νετρονίων  $\Sigma_a$  -όσο μικρότερη τόσο καλύτερα. Η κατ'αρχή σύγκριση διαφόρων επιβραδυντικών μέσων γίνεται συνήθως με τη χρήση του μέγεθους  $\xi\Sigma_{se}/\Sigma_a$  που ονομάζεται **σχέση επιβραδύνσεως**. Ο δείκτης αυτός χαρακτηρίζει συνδυασμένα τόσο τις ιδιότητες επιβραδύνσεως όσο και την ικανότητα απορρόφησης νετρονίων. Ένα μέσο μπορεί να θεωρηθεί καλός επιβραδυντής σε πρώτη προσέγγιση, αν εμφανίζει μεγάλη τιμή της σχέσεως επιβραδύνσεως.

Με  $\Sigma_a$  υπολογισμένο για νετρόνια ενεργείας 0.025 eV (θερμικά νετρόνια) είναι:

Για το ελαφρύ ύδωρ  $\xi_{\Sigma_{sc}}/\Sigma_a = 71$

Για το βαρύ ύδωρ  $\xi_{\Sigma_{sc}}/\Sigma_a = 5670$

Για βαρύ ύδωρ με προσμίξεις 0.16% ελαφρού ύδατος  $\xi_{\Sigma_{sc}}/\Sigma_a = 2880$ .

Αλλο χαρακτηριστικό μέγεθος σχετικό με την επιβραδυντική ικανότητα είναι η **ηλικία Fermi** των θερμικών νετρονίων  $\tau_T$  σε  $\text{cm}^2$ . μέγεθος που αποτελεί το μέτρο της απόστασης που πρέπει να διανύσουν τα νετρόνια μέσα στο επιβραδυντικό μέσο προκειμένου να γίνουν θερμικά. Αποδεικνύεται ότι το μέγεθος  $\tau_T$  είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της πυκνότητας του επιβραδυντικού μέσου, καθώς επίσης ότι εξαρτάται λίγο και από τη θερμοκρασία του.

Γενικά ισχύει:

$$\tau_T(\rho) = \tau_T(\rho_0)(\rho_0/\rho)^2$$

Σε συνθήκες περιβάλλοντος με  $T = 20^\circ\text{C}$  είναι:

$$\text{Για το ελαφρύ ύδωρ } \rho = 1 \text{ gcm}^{-3}, \tau_T \cong 27 \text{ cm}^2$$

$$\text{Για το βαρύ ύδωρ } \rho = 1.1 \text{ gcm}^{-3}, \tau_T \cong 131 \text{ cm}^2$$

Η πρακτική σημασία των παραπάνω μεγεθών και τιμών είναι ότι το βαρύ ύδωρ, δεν έχει τόσο καλή επίδοση στη μείωση της ενέργειας των ταχέων νετρονίων "με μεγάλα βήματα" όσο έχει το ελαφρύ ύδωρ. Η επίδοση αυτή όμως, τόσο για το ελαφρύ όσο και για το βαρύ ύδωρ μειώνεται δραστικά αν δημιουργηθεί ατμός στο ψυκτικό μέσο, δεδομένου ότι το μέγεθος  $\Sigma_{sc}$  είναι ανάλογο της πυκνότητας και το μέγεθος  $\tau_T$  είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μείωση της σταθερής κρισιμότητας  $k$  των υδρόψυκτων αντιδραστήρων σε τιμές μικρότερες της μονάδας, δεδομένου ότι περιορίζεται η παραγωγή θερμικών νετρονίων που επάγουν τις σχάσεις. Αυτό δεν σημαίνει πάντοτε αντίστοιχη μείωση της παραγόμενης ισχύος από τον αντιδραστήρα, διότι σε αυτό δεν παίζει μόνο ρόλο η μείωση της σταθερής κρισιμότητας  $k$  αλλά και ο ρυθμός με τον οποίο συμβαίνει αυτή. Τέτοιες επιδράσεις δεν έχουμε στους ΠΑΙ που ψύχονται με υγρά μέταλλα καθόσον οι επιβραδυντικές τους ιδιότητες είναι τέτοιες που δεν επηρεάζουν τη σταθερή κρισιμότητας του αντιδραστήρα.

Υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας το ποσοστό του ατμού στην έξοδο του ψυκτικού στους αντιδραστήρες τύπου BWR δεν πρέπει να ξεπερνά το 15%. Στους αντιδραστήρες τύπου CANDU επιτρέπεται να υπάρχει ατμός στην έξοδο του ψυκτικού σε ποσοστό το πολύ μέχρι 3%· ο ατμός αυτός φυσικά δεν χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας. Στους αντιδραστήρες τύπου PWR δεν νοείται η ύπαρξη ατμού στο ψυκτικό υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Αν το ποσοστό του ατμού στο ψυκτικό ελαφρύ ή βαρύ ύδωρ αυξηθεί πέρα από τις προδιαγραφές, γίνεται αντιληπτό ότι μεταβάλλονται δραστικά τόσο οι θερμοαπαγωγές όσο και οι επιβραδυντικές ιδιότητες. Επειδή τόσο το ελαφρύ όσο και το βαρύ ύδωρ παρουσιάζουν υψηλή πίεση κορεσμού, η οποία αυξάνεται με τη θερμοκρασία είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται στους αντιδραστήρες ύδατος συστήματα υψηλής πίεσεως για τη διατήρηση της γρήγης φάσης που όχι μόνο αυξάνουν το κόστος αλλά δυσκολεύουν και τη λειτουργία των ΠΑΙ.

Στην περίπτωση ατυχήματος απώλειας ψυκτικού ύδατος, πρέπει το συντομότεο δυνατό να αποκατασταθούν συνθήκες γρήγης φάσης στον πυρήνα του αντιδραστήρα προκειμένου να επανέλθουν οι επιθυμητές τιμές των θερμοφυσικών και επιβραδυντικών ιδιοτήτων του ψυκτικού μέσου πράγμα που θα επιτρέψει και πάλι την με ελεγχόμενο ρυθμό απαγωγή της θερμότητας από τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου και την αποτροπή του πυρηνικού ατυχήματος, που μπορεί να επέλθει λόγω της ανεξέλεγκτης αύξησης της θερμοκρασίας στις ράβδους, της τήξης του πυρηνικού καυσίμου, της καταστροφής του περιβλήματός του και της έκλυσης ραδιενεργών προϊόντων στο περιβάλλον. Η καλή γνώση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού και του βαρέος ύδατος και η ύπαρξη εύχρηστων κωδίκων ηλεκτρονικού υπολογιστή για την σύντομη και εύκολη αναπαραγωγή τους βοηθούν στην ερευνητική μελέτη προβλημάτων απώλειας ψυκτικού και στην υιοθέτηση τεχνολογικά εφαρμόσιμων λύσεων στην πράξη.

Σημειώνεται ότι οι μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με τη συμπεριφορά του ελαφρού ύδατος ως ψυκτικού στους αντιδραστήρες ισχύος είναι αρκετές και λεπτομερείς. Αντίθετα οι αντίστοιχες μελέτες για το βαρύ ύδωρ είναι, όσο είναι γνωστό, πολύ λίγες. Αφορούν κυρίως στη σύγκριση των θερμοαπαγωγών ιδιοτήτων του με εκείνες του ελαφρού ύδατος για διάφορα πιθανά σενάρια απώλειας ψυκτικού, για τα γνωστά

δηλαδή τυποποιημένα προβλήματα LOCA (Loss-Of-Coolant-Accident, ατύχημα απώλειας ψυκτικού). Συγκεκριμένα αναφέρεται σε σχετική εργασία<sup>1</sup> ως προκαταρκτικό συμπέρασμα ότι, πιθανότατα, η ψυκτική απόδοση του βαρέος ύδατος είναι ελαφρά καλύτερη από αυτή του ελαφρού όσο αφορά στο χρόνο επιβίωσης των ράβδων του πυρηνικού καυσίμου μετά από ένα ατύχημα απώλειας ψυκτικού. Σημειώνεται επίσης ότι δεν είναι λεπτομερείς οι θερμοϋδραυλικές μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με τη συμπεριφορά του Νατρίου τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας των αντιδραστήρων ισχύος, όσο και σε έκτακτες καταστάσεις. Το γεγονός ότι το Νάτριο ως ΨΜ σε αντίθεση με το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ δεν επηρεάζει τη σταθερή κρισιμότητας καθώς και ότι παραμένει υγρό -και επομένως διατηρεί τις θερμοαπαγωγές του ιδιότητες- σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, από περίπου 100 έως περίπου 2230 °C, χωρίς να χρειάζεται να διατηρείται υπό πίεση, το καθιστούν πολύ περισσότερο ασφαλές ψυκτικά. Στα πλαίσια όμως του στόχου της αύξησης του βαθμού απόδοσης των ΠΑΙ που ψύχονται με Νάτριο, καθώς και της καλύτερης μελέτης τους από πλευράς ασφάλειας έναντι απώλειας ψυκτικού, τέτοιες ενδεδειχείς θερμοϋδραυλικές μελέτες είναι απαραίτητες.

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιασθούν οι σχέσεις εκείνες που θεωρούνται οι πλέον κατάλληλες και ακριβείς για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων για τα κυριότερα ΨΜ που χρησιμοποιούνται σήμερα στους ΠΑΙ, δηλαδή, για το ελαφρύ ύδωρ, το βαρύ ύδωρ και το Νάτριο. Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται σε κώδικες υπολογισμών των θερμοφυσικών ιδιοτήτων αυτών των ψυκτικών μέσων, που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής. Για την επιλογή των σχέσεων για τις ιδιότητες προηγήθηκε εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η παρουσίαση της οποίας ξεφεύγει από τους στόχους της Διδακτορικής Διατριβής και ως εκ τούτου δεν θα γίνει.

Οι σχέσεις για τις ιδιότητες που χρησιμοποιούνται επλήχθηκαν με κριτήρια, κυρίως την όσο το δυνατό υψηλότερη θερμοδυναμική τους συνέπεια, την απαιτήση για ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης και την εύκολη υλοποίησή τους σε κώδικα ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα παραπάνω δεν σημαίνουν ότι επιλέχθηκαν και οι χρονικά νεότερες σχέσεις για τις ιδιότητες. Παρόλαυτά, στις οικείες παραγράφους

---

<sup>1</sup> Kaizerman S. et al., 1984.

σημειώνονται για λόγους αναφοράς ποιές είναι -όταν υπάρχουν- οι πιο σύγχρονες διαθέσιμες συσχετίσεις για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς.

Ειδικά σε ό,τι αφορά τις εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος και του Νατρίου, πρέπει να σημειωθεί ότι, ο σχολιασμός είναι πιο ενδελεχής και οι βιβλιογραφικές αναφορές πολυπληθέστερες σε σχέση με τον σχολιασμό και τις βιβλιογραφικές αναφορές για τις εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος. Αυτό γίνεται διότι τόσο το βαρύ ύδωρ, όσο και το Νάτριο είναι ουσίες των οποίων οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και οι ιδιότητες μεταφοράς άρχισαν να γίνονται γνωστές με ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης μόλις στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Οι λεπτομέρειες λοιπόν σχετικά με την πραγματοποιηθείσα σχετική έρευνα που παρατίθενται δυνατόν να βοηθήσουν σε μελλοντική μελέτη.

Υπενθυμίζεται σχετικά με την έννοια της υψηλής θερμοδυναμικής συνέπειας, ότι σύμφωνα με αυτή επιβάλλεται οι κ.ε. να διατυπώνονται στη μορφή συνάρτησης Helmholtz,  $\psi = \psi(p, T)$ , ή στη μορφή συνάρτησης Gibbs,  $g = g(p, T)$ , η οποία να ισχύει τόσο στην υγρή, στην ατιμώδη αλλά και στην υπερκρίσιμη φάση. Από τη συνάρτηση Helmholtz ή τη συνάρτηση Gibbs είναι δυνατό να προκύψουν με παραγωγίσεις οι περισσότερες από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες (βλέπε και § 2.3).

Σημειώνεται ότι οι κ.ε. για το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ που χρησιμοποιούνται στο υπολογιστικό μέρος της Διδακτορικής Διατριβής έχουν τη μορφή συναρτήσεων Helmholtz.

Κατάλληλες εξισώσεις κορεσμού της μορφής (2-2) έως και (2-4), χρησιμοποιούνται ως όρια φάσεων, προκειμένου να διαπιστώνεται αν ζητείται από τους κώδικες που καταστρώθηκαν για το ε.υ. το β.υ. ή για το Νάτριο με βάση τις επιλεχθείσες σχέσεις, να υπολογίζουν τις θερμοφυσικές ιδιότητες της υγρής, της ατιμώδους ή της υπερκρίσιμης φάσης. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτό θα αναπτυχθεί σε επόμενα Κεφάλαια.

### 3.3 Το ελαφρύ ύδωρ ως ουσία μάλλον γνωστών ιδιοτήτων.

#### 3.3.1 Γενικά για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος.

Στο 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> "Διεθνές Συνέδριο για τις Ιδιότητες του Υδρατμού" (2<sup>nd</sup> και 3<sup>rd</sup> ICPS, 1955 και 1957 αντίστοιχα) καθορίσθηκε η μορφή που πρέπει να έχουν οι Πίνακες Πλαισίου για τις ιδιότητες του ελαφρού ύδατος. Οι Πίνακες Πλαισίου του ελαφρού ύδατος διευρύνθηκαν, για να καλύψουν μία ευρύτερη περιοχή πίεσης και θερμοκρασίας, και βελτιώθηκαν στα επόμενα "Διεθνή Συνέδρια για τις Ιδιότητες του Υδρατμού" ενώ πήραν την τελική τους μορφή στο 6<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο (6<sup>th</sup> ICPS, 1963 -βλέπε και Schmidt E., 1969; Schmidt E. et al., 1987).

Αυτοί οι Πίνακες Πλαισίου βασίζονται σε όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ιδιοτήτων που ήταν διαθέσιμα μέχρι εκείνο τον καιρό, και για τα οποία επιστεύετο ότι ήταν αξιόπιστα. Τα μεγέθη των ανοχών επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε όλα τα θεωρούμενα αξιόπιστα πειραματικά αποτελέσματα να βρίσκονται μέσα σε αυτές. Δυστυχώς οι ανοχές δεν μπορούν να ορισθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια -π.χ. με την χρήση της στατιστικής θεωρίας σφαλμάτων- λόγω του μικρού αριθμού των πειραματικών σημείων που είναι διασκορπισμένα σε μεγάλες περιοχές. Η δημοσίευση της τελικής μορφής των Πινάκων Πλαισίου για το ελαφρύ ύδωρ<sup>2</sup> επέτρεψε τη διατύπωση εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς όπως αυτές που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους. Οι εξισώσεις αυτές διακρίνονται για τη θερμοδυναμική τους συνέπεια, την ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης και την δυνατότητα εύκολης υλοποίησής τους σε κώδικα ηλεκτρονικού υπολογιστή.

#### 3.3.2 Η καταστατική εξίσωση του F.G. Keyes και των συνεργατών του για την υγρή φάση, την κατάσταση κορεσμού και την ατμώδη φάση.

Ο Keyes F.G. και οι συνεργάτες του<sup>3</sup> παρουσίασαν το 1968 μία πολύ επιτυχή καταστατική εξίσωση για το ελαφρύ ύδωρ, μετά από διεξοδική αριθμητική επεξεργασία των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων για την υγρή και την ατμώδη

---

<sup>2</sup> Βλέπε και Schmidt E., 1969.

<sup>3</sup> Βλέπε Keyes F.G. et al., 7<sup>th</sup> International Conference on the Properties of Steam, Tokyo, Japan, 1968.

φάση από το τριπλό σημείο μέχρι μία πίεση 100 MPa και μία θερμοκρασία<sup>4</sup> περίπου 1750 K. Στην εργασία τους χρησιμοποίησαν την θεμελιώδη καταστατική εξίσωση κατηγορίας Γ-ρ:

$$\psi = \psi(\rho, T) = \psi_0(T) + RT [\ln p + \rho Q(\rho, T)] \quad (3-1)$$

όπου

- $\psi$  είναι η ειδική ελεύθερη ενέργεια Helmholtz και
- $Q$  μία ποσότητα η οποία είναι συνάρτηση της πυκνότητας  $\rho$  και της θερμοκρασίας  $T$  και θα οριστεί στη συνέχεια.

Όπως και οι περισσότεροι ερευνητές που ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη καταστατικών εξισώσεων αυτής της μορφής, έτσι και οι Keyes F.G. et al., 1968 για να μπορέσουν να αναπαράγουν με ακρίβεια τις τιμές των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος, επέλεξαν μία τροποποιημένη μορφή καταστατικής εξίσωσης αμοιβαίων δράσεων της μορφής:

$$P = P(\rho, T) = \sum_{i=1}^6 A_i(T) \rho^i + \sum_{j=1}^2 B_j(T) \rho^{2i+1} \exp(-c\rho^2) \quad (3-2)$$

όπου  $P$  είναι η πίεση και οι όροι  $A_i(T)$  και  $B_j(T)$  είναι συνήθως πολυώνυμα των μεγεθών  $T$  και  $T^{-1}$ .

Παρόλο που η πίεση σαν συνάρτηση της ελεύθερης ενέργειας Helmholtz προκύπτει πολύ απλά από την σχέση:

$$P = \rho^2 (\partial \psi / \partial \rho)_T = \rho RT [1 + \rho Q + \rho^2 (\partial Q / \partial \rho)_T] \quad (3-3)$$

το μέγεθος  $Q$  δίνεται συνήθως από μία μάλλον περίπλοκη εξίσωση που δυσκολεύει τους σχετικούς υπολογισμούς για τις υπόλοιπες θερμοδυναμικές ιδιότητες.

Σε κάθε περίπτωση μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει ότι αυτή η καταστατική εξίσωση βασίζεται σε σημαντικές τροποποιήσεις της γενικευμένης καταστατικής εξίσωσης B-W-R<sup>5</sup>. Συγκεκριμένα έχουν προστεθεί νέοι εκθετικοί όροι με σκοπό να ληφθεί υπόψη η ιδιαίτερη συμπεριφορά του ελαφρού ύδατος σε υψηλές τιμές της

---

<sup>4</sup> Βλέπε επιπλέον και Hendricks R.C. et al., 1973.

πυκνότητας. Αυτή είναι μία τεχνική που έχει δοκιμασθεί επιτυχώς στην περιγραφή των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων πολλών ψυκτικών μέσων.

Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιήσαν οι Keyes F.G. et al. για την προσαρμογή στα πειραματικά αποτελέσματα ήταν φυσικά μία τεχνική με ελάχιστα τετράγωνα και κατάλληλες συναρτήσεις βάρους (στάθμισης) σε συνδυασμό και με μαθηματικούς περιορισμούς που επιβάλλει η φυσική και η θερμοδυναμική του προβλήματος διατύπωσης μίας καταστατικής εξίσωσης. Οι περισσότεροι από αυτούς τους περιορισμούς παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Η εξέταση βέβαια της αριθμητικής διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι θέμα αυτής της Διδαστορικής Διατριβής<sup>6</sup>.

Για την ποσότητα Q έχουμε:

$$Q = (\tau - \tau_0) \sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \left[ \sum_{i=1}^8 A_{ij}(\rho - \rho_a)^{i-1} + \exp(-E\rho) \times \sum_{i=9}^{10} A_{ij}\rho^{i-9} \right] \quad (3-4)$$

και

$$\psi_0(T) = \sum_{i=1}^j C_i(T/1000)^{i-1} + C_{j+1} \ln T + C_{j+2} T(\ln T)/1000 \quad (3-5)$$

με

$$R = 0.46151 \quad \text{kJ/(kgK)}$$

$$\tau = 1000/T\alpha$$

$$j = 3$$

Οι μονάδες έχουν ως εξής

$\psi$ ,  $\psi_0$  ελεύθερη εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg

(ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς  $\psi_{ft} = 0$ )

<sup>5</sup> Benedict-Webb-Rubin, βλέπε και Benedict M. et al., 1940 και Hatsopoulos G.N. et al., 1965.

<sup>6</sup> Για λεπτομέρειες της τεχνικής αυτής σχετικά με τις καταστατικές εξισώσεις βλέπε και Friedman A.S. et al., 1954 και McCarty R.D., 1975.



T απόλυτη θερμοκρασία σε μονάδες K

$\tau$  1000/T σε  $K^{-1}$

$\rho$  πυκνότητα σε  $10^3 \text{ kg/m}^3$  (ισοδύναμα σε  $\text{g/cm}^3$ )

Οι σταθερές στο ανάπτυγμα διπλού αθροίσματος Q είναι

$$\tau_c = 1.544912 \quad E = 4.8$$

$$\tau_{aj} = 1.544912 \quad (j = 1) \quad \rho_{aj} = 0.634 \quad (j = 1)$$

$$\tau_{aj} = 2.5 \quad (j > 1) \quad \rho_{aj} = 1.0 \quad (j > 1)$$

Οι συντελεστές  $A_{ij}$  δίνονται στον Πίνακα 3-1.

Οι συντελεστές  $C_i$  δίνονται στον Πίνακα 3-2.

### 3.3.3 Σχέσεις για τον υπολογισμό των λοιπών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων από την καταστατική εξίσωση του F.G. Keyes και των συνεργατών του.

Μερικές από τις ιδιότητες που μπορεί κάποιος εύκολα να πάρει από την καταστατική εξίσωση των Keyes F.G. eta 1. με κατάλληλες παραγωγίσεις, αν γνωρίζει βέβαια τη θερμοκρασία και την πυκνότητα, είναι:

Πίεση P σε Mpa

$$P = \rho^2 (\partial \psi / \partial \rho)_\tau \quad (3-6)$$

$$P = \rho RT \left[ 1 + \rho Q + \rho^2 (\partial Q / \partial \rho)_\tau \right] \quad (3-7)$$

Ειδική εσωτερική ενέργεια u σε kJ/kg

$$u = [\partial(\psi\tau) / \partial \tau]_\rho \quad (3-8)$$

$$u = d(\psi_0\tau) / d\tau + 1000R\rho (\partial Q / \partial \tau)_\rho \quad (3-9)$$

(ειδική εσωτερική ενέργεια αναφοράς  $u_{H=0}$ )

Ειδική εντροπία s σε kJ/(kgK)

$$s = -(\partial\psi/\partial T)_p \quad (3-10)$$

$$s = -R \left[ \ln p + \rho Q + \rho(1000/T)(\partial Q/\partial T)_p \right] - d\psi_o/dT \quad (3-11)$$

Ειδική ενθαλπία h σε kJ/kg

$$h = u + P/\rho \quad (3-12)$$

$$h = RT \left[ 1 + \rho Q - \rho(1000/T)(\partial Q/\partial T)_p + \rho^2(\partial Q/\partial T)_p \right] + d(\psi_o\tau)/d\tau \quad (3-13)$$

Ειδικές θερμοχωρητικότητες c<sub>p</sub> και c<sub>v</sub> σε kJ/(kgK)

$$c_p = (\partial h/\partial T)_p \quad (3-14)$$

$$c_p = (\partial h/\partial T)_p - (\partial h/\partial p)_T(\partial P/\partial T)_p/(\partial P/\partial p)_T \quad (3-15)$$

$$c_v = (\partial u/\partial T)_p = -R\rho(1000/T)^2(\partial^2 Q/\partial\tau^2)_p - T(d^2\psi_o/dT^2) \quad (3-16)$$

$$c_v = -R\rho(1000/T)^2(\partial^2 Q/\partial\tau^2)_p - T(d^2\psi_o/dT^2) \quad (3-17)$$

Συντελεστής ισεντροπικής μεταβολής

$$\gamma = c_p/c_v \quad (3-18)$$

Συντελεστής Joule-Thomson μ σε K/MPa

$$\mu = (\partial T/\partial P)_h \quad (3-19)$$

$$\mu = -(\partial h/\partial P)_T(1/c_p) = \left\{ T(\partial P/\partial T)_p \left[ \rho(\partial P/\partial p)_T \right] - 1 \right\} / (\rho c_p) \quad (3-20)$$

Ισοθερμοκρασιακή Συμπίεσιότητα κ<sub>T</sub> σε MPa<sup>-1</sup>

$$k_T = \left[ \rho(\partial P/\partial p)_T \right]^{-1} \quad (3-21)$$

Ταχύτητα του Ηχου a σε m/s

$$a = 10^{3/2} \left\{ 1/(\partial P/\partial p)_T - T(\partial P/\partial T)_p \left[ c_p \rho^2(\partial P/\partial p)_T^2 \right] \right\}^{-1/2} \quad (3-22)$$

ή ισοδύναμα

$$a = 10^{3/2} \gamma (\partial P / \partial \rho)_T^{1/2}$$

ή

$$a = 10^{3/2} (\partial P / \partial \rho)_s^{1/2}$$

Η πίεση κορεσμού μπορεί να υπολογίζεται από τη συσχέτιση<sup>7</sup>:

$$P_s(T) = P^* \exp \left\{ \left[ \sum_{v=1}^5 k_v (1 - T_r)^v \right] / \left[ T_r + k_6 (1 - T_r) T_r + k_7 (1 - T_r)^2 T_r \right] - (1 - T_r) / \left[ k_8 (1 - T_r)^2 + k_9 \right] \right\} \quad (3-23)$$

με  $T_r = T/T^*$ ,

$T^* = 647.27$  K και  $P^* = 221.15$  bar οι ψευδοκρισιμες τιμές θερμοκρασίας και πίεσης.

Οι σταθερές  $k_i$  δίνονται στον Πίνακα 3-3.

Η συσχέτιση (3-23) ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$(\psi + P/\rho)_{fs} = (\psi + P/\rho)_{gs}$$

όπου οι δείκτες fs και gs δηλώνουν το κορεσμένο υγρό και τον κορεσμένο ατμό αντίστοιχα.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες που υπολογίζονται με βάση την κ.ε. των Keyes F.G. et al., 1968 προκύπτουν, όπως φαίνεται από τα παραπάνω ως συνδυασμός παραγώγων της συνάρτησης Helmholtz  $\psi$ . Το μόνο μέγεθος πάντως που δεν μπορεί να υπολογισθεί εύκολα από την καταστατική εξίσωση είναι, όπως γίνεται φανερό, ο ειδικός όγκος  $v$  του ελαφρού ύδατος. Η εξίσωση, όπως σχεδόν όλες οι κ.ε. κατηγορίας T-r είναι πεπλεγμένη ως προς τον ειδικό όγκο και πρέπει για τη λύση ως προς αυτόν να χρησιμοποιηθεί αριθμητική μέθοδος.

---

<sup>7</sup> Προτείνεται από τους Schmidt E. και Griggull U., 1987.

Σήμερα (1998) είναι διαθέσιμες νεότερες διατυπώσεις καταστατικών εξισώσεων για το ελαφρύ ύδωρ από τη διατύπωση των Keyes F.G. et al. που παρουσιάστηκε εδώ. Μπορεί κανείς να μελετήσει συγκεκριμένα και τις εργασίες των Haar L. et al (1984) και των Kestin J. και Sengers J.V. (1986). Αυτές οι διατυπώσεις έχουν μεν ακρίβεια επιστημονικής και γενικής χρήσης, δεν προσθέτουν όμως τίποτε στην διατύπωση που παρουσιάστηκε όσο αφορά στην ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης και στην περιοχή ισχύος που ενδιαφέρει για τη λειτουργία των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος που εργάζονται με ελαφρύ ύδωρ.

### 3.3.4 Οι συντελεστές αμοιβαίων δράσεων του ελαφρού ύδατος.

Αν στη θεμελιώδη καταστατική εξίσωση (3-1) η οποία έχει τη μορφή

$$\psi = \psi(\rho, T) = \psi_0(T) + RT [\ln p + \rho Q(\rho, T)]$$

γίνει δεκτό ότι για την ατιμώδη φάση και για θερμοκρασίες μικρότερες από την κρίσιμη θερμοκρασία, η ποσότητα:

$$\rho Q(\rho, T)$$

μπορεί να υπολογίζεται από μία συνάρτηση της μορφής:

$$f(\rho, T) = \sum_{i=0}^2 B_{i+2} \rho^{i+1} (i+1)^{-1}$$

τότε μέσω της ταυτότητας (3-6)

$$P = \rho^2 (\partial \psi / \partial P)_T$$

θα είναι

$$P = \rho RT \left( 1 + \sum_{i=0}^2 B_{i+2} \rho^{i+1} \right)$$

Η τελευταία εξίσωση έχει τη γενική μορφή μίας καταστατικής εξίσωσης αμοιβαίων δράσεων:

$$P = (\rho_g RT) (1 + B_2 \rho_g + B_3 \rho_g^2 + B_4 \rho_g^3) \quad (3-24)$$

όπου

$\rho_g$  η πυκνότητα του ατμού

$B_2$  ο δεύτερος συντελεστής αμοιβαίων δράσεων

$B_3$  ο τρίτος συντελεστής αμοιβαίων δράσεων

$B_4$  ο τέταρτος συντελεστής αμοιβαίων δράσεων

Εύκολα αποδεικνύεται ότι μία καταστατική εξίσωση αμοιβαίων δράσεων αυτής της μορφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος στην ατμόδη φάση για θερμοκρασίες μικρότερες από εκείνη του κρίσιμου σημείου, αν γίνει η χρήση των σχέσεων (3-8), (3-10), (3-12), (3-14), (3-16), (3-18), (3-19), (3-21) και (3-20). Για το σκοπό αυτό αρκεί να είναι γνωστές συσχετίσεις για τους συντελεστές αμοιβαίων δράσεων  $B_2$ ,  $B_3$  και  $B_4$ , καθώς και για τις παραγώγους:

$$d\{B_2\tau\}/d\tau, d\{B_3\tau^2\}/d\tau \text{ και } d\{B_4\tau^3\}/d\tau \quad (3-25)$$

όπου  $\tau = 1/T$

Σύμφωνα με τους Hill P.G. και MacMillan R.D.C., 1988 οι συντελεστές αμοιβαίων δράσεων  $B_2$  σε  $m^3kg^{-1}$ ,  $B_3$  σε  $(m^3kg^{-1})^2$  και  $B_4$  σε  $(m^3kg^{-1})^3$ , του ελαφρού ύδατος υπολογίζονται από τις ακόλουθες συσχετίσεις:

$$B_2 = \sum_{i=1}^6 a_i f_i(T) \quad (3-26)$$

όπου

$$f_1(T) = (1 + T/\alpha)^{-1}, f_2(T) = (1 - e^{-\beta T})^{5/2} (T/\beta)^{1/2} e^{\beta T}, f_3(T) = \beta/T, f_4(T) = (\beta/T)^2,$$

$$f_5(T) = (\beta/T)^3 \text{ και } f_6(T) = (\beta/T)^4$$

με

$$a_1 = 0.160946868952524 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$$

$$a_2 = -0.1270588577231565 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$$

$$a_3 = -0.1947567798197269 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$$

$$a_4 = a_5 = 0$$

$$a_6 = 0.2960495174903245 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

ενώ  $\alpha = 10000 \text{ K}$  και  $\beta = 1500 \text{ K}$ .

$$\mathbf{B}_3 = \sum_{i=0}^2 \mathbf{b}_i \tau^{i+7} \quad (3-27)$$

όπου  $\tau = 1/\Gamma$  και

$$b_0 = 0.9606202982962455 \cdot 10^{15} \text{ (m}^3 \text{ kg}^{-1})^2$$

$$b_1 = 0$$

$$b_2 = 0.3270581916232076 \cdot 10^{21} \text{ (m}^3 \text{ kg}^{-1})^2$$

$$\mathbf{B}_4 = \sum_{i=0}^2 \mathbf{c}_i \tau^{i+7} \quad (3-28)$$

όπου  $c_0 = c_1 = 0$  και  $c_2 = 0.4640023591592001 \cdot 10^{18} \text{ (m}^3 \text{ kg}^{-1})^3$

Είναι φανερό ότι οι παράγωγοι (3-25) είναι δυνατό να υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$d\{\mathbf{B}_2 \tau\}/d\tau = \sum_{i=1}^6 \mathbf{a}_i g_i(\Gamma) \quad (3-29)$$

όπου

$$g_1 = [f_1(\Gamma)]^2 (1+2\Gamma/\alpha)$$

$$g_2 = f_2(\Gamma) [1/2 + \beta/\Gamma + (5/2)(\beta/\Gamma)(e^{\beta\Gamma} - 1)^{-1}]$$

$$g_3 = 2(\beta/\Gamma)$$

$$g_4 = 3(\beta/\Gamma)^2$$

$$g_5 = 4(\beta/\Gamma)^3$$

$$g_6 = 5(\beta/\Gamma)^4$$

$$d\{\mathbf{B}_3 \tau^2\}/d\tau = \sum_{i=0}^2 \mathbf{b}_i (i+9) \tau^{i+8} \quad (3-30)$$

$$d\{\mathbf{B}_4 \tau^3\}/d\tau = \sum_{i=0}^2 \mathbf{c}_i (i+10) \tau^{i+9} \quad (3-31)$$

Οι συσχετίσεις (3-26) έως και (3-31) ισχύουν για την ατμώδη φάση του ελαφρού ύδατος μέχρι τη θερμοκρασία των 300 °C.

### 3.3.5 Οι ιδιότητες μεταφοράς του ελαφρού ύδατος.

#### 3.3.5.1 Η συνεκτικότητα σύμφωνα με τους J.V. Sengers και J.T.R. Watson.

Για τον υπολογισμό της συνεκτικότητας  $\eta$  του ελαφρού ύδατος σε όλες τις φάσεις προσφέρεται η σχέση<sup>8</sup>:

$$\eta_r = \mu_0(T_r) \mu_1(T_r, \rho_r) \mu_2(T_r, \rho_r) \quad (3-32)$$

Είναι:

$$\mu_0 = T_r^{0.5} \left[ \sum_{i=0}^3 H_i (T_r)^{-i} \right]^{-1} \quad (3-33)$$

και

$$\mu_1 = \exp \left[ (\rho_r) \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^6 H_{ij} (1/T_r - 1)^i (\rho_r - 1)^j \right] \quad (3-34)$$

Για ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης, λαμβάνεται πάντα:

$$\mu_2(T_r, \rho_r) = 1$$

Ορίζεται επίσης:  $T_r = T/T^*$ ,  $\rho_r = \rho/\rho^*$ ,  $P_r = P/P^*$ ,  $\eta_r = \eta/\eta^*$

όπου  $T^*$ ,  $\rho^*$ ,  $P^*$  και  $\mu^*$  είναι σταθερές της εξίσωσης για τη συνεκτικότητα, οι οποίες αντιπροσωπεύουν προσεγγιστικά τις τιμές της απόλυτης θερμοκρασίας, της πυκνότητας, της πίεσης και της συνεκτικότητας στο κρίσιμο σημείο αντίστοιχα -είναι δηλαδή οι ψευδοκρίσιμες τιμές, και έχουν ως εξής:

---

<sup>8</sup> Βλέπε και Sengers J.V., Watson J.T.R., Journal of Physical Chemistry Reference Data,

$$T^* = 647.27 \text{ K}, \rho^* = 317.763 \text{ kgm}^{-3}, p^* = 22.115 \times 10^6 \text{ Pa} \text{ και } \eta^* = 55.071 \times 10^{-6} \text{ Pas}$$

Η πυκνότητα  $\rho$  λαμβάνεται από την καταστατική εξίσωση για το ελαφρύ ύδωρ των Keyes F.G. et al., 1968, που παρουσιάσθηκε στην προηγούμενη παράγραφο 3.3.2.

Οι συντελεστές της εξίσωσης (3-33) είναι:

$$H_0 = 1.000000, H_1 = 0.978197, H_2 = 0.579829 \text{ και } H_3 = -0.202354$$

Οι συντελεστές  $H_{ij}$  της εξίσωσης (3-34) δίνονται στον Πίνακα 3-4.

Η περιοχή ισχύος της πιο πάνω εξίσωσης για τη συνεκτικότητα του ελαφρού ύδατος είναι

$$P \leq 500 \text{ MPa για } 0^\circ \text{C} \leq t \leq 150^\circ \text{C}$$

$$P \leq 350 \text{ MPa για } 150^\circ \text{C} < t \leq 600^\circ \text{C}$$

$$P \leq 300 \text{ MPa για } 600^\circ \text{C} < t \leq 900^\circ \text{C}$$

### 3.3.5.2 Η θερμική αγωγιμότητα σύμφωνα με τους J.V. Sengers και J.T.R. Watson.

Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  του ελαφρού ύδατος προσφέρεται η σχέση<sup>9</sup>:

$$\lambda_r = \lambda_0(T_r) + \lambda_1(\rho_r) + \lambda_2(T_r \rho_r) \quad (3-35)$$

Όπου:

$$\lambda_0 = T_r^{0.5} \left[ \sum_{i=0}^3 a_i T_r^i \right] \quad (3-36)$$

---

15(4):1291, 1986.

<sup>9</sup> Βλέπε και Sengers J.V., Watson J.T.R., Journal of Physical Chemistry Reference Data, 15(4):1291, 1986.



και

$$\lambda_1 = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 \rho_r + \mathbf{b}_2 \exp \{ \mathbf{B}_1 (\rho_r + \mathbf{B}_2)^2 \} \quad (3-37)$$

$$\lambda_2 = (\mathbf{d}_1 T_r^{-1.0} + \mathbf{d}_2) \rho_r^{1.8} \exp [ \mathbf{C}_1 (1 - \rho_r)^{2.8} ] + \\ + \mathbf{d}_3 S \rho_r^0 \exp [ \mathbf{Q} (1 + \mathbf{Q})^{-1} (1 - \rho_r^{(1+\mathbf{Q})}) ] + \mathbf{d}_4 \exp (\mathbf{C}_2 T_r^{1.5} + \mathbf{C}_3 \rho_r^{-5}) \quad (3-38)$$

και

$$\mathbf{Q} = 2.0 + \mathbf{C}_5 \Delta T_r^{-0.6}$$

$$\mathbf{S} = 1/\Delta T_r \text{ για } T_r \geq 1$$

ή

$$\mathbf{S} = \mathbf{C}_6 (\Delta T_r)^{-0.6} \text{ για } T_r < 1$$

και τέλος

$$\Delta T_r = | T_r - 1.0 | + \mathbf{C}_4$$

και  $T_r$ ,  $\rho_r$ ,  $P_r$  σύμφωνα και με τα όσα αναφέρθηκαν στην αμέσως προηγούμενη παράγραφο.

Ακόμα:

$$\lambda_r = \lambda/\lambda^* \text{ και } \lambda^* = 1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Όπου είναι απαραίτητο η πυκνότητα  $\rho$  λαμβάνεται από την καταστατική εξίσωση για το ελαφρύ ύδωρ των Keyes F.G. et al. που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.2.

Οι συντελεστές της εξίσωσης (3-36) είναι:

$$a_0 = 0.0102811, a_1 = 0.0299621, a_2 = 0.0156146 \text{ και } a_3 = -0.00422464$$

Οι συντελεστές της εξίσωσης (3-37) είναι:

$$b_0 = -0.397070, b_1 = 0.400302, b_2 = 1.060000$$

και

$$B_1 = -0.171587, B_2 = 2.392190$$

Οι συντελεστές  $d_i$  και  $C_i$  της εξίσωσης (3-38) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-5.

Η περιοχή ισχύος της πιό πάνω εξίσωσης για τη θερμική αγωγιμότητα του ελαφρού ύδατος είναι

$$P \leq 100 \text{ MPa για } 0^\circ\text{C} \leq t \leq 500^\circ\text{C}$$

$$P \leq 70 \text{ MPa για } 500^\circ\text{C} < t \leq 650^\circ\text{C}$$

$$P \leq 40 \text{ MPa για } 650^\circ\text{C} < t \leq 800^\circ\text{C}$$

### 3.3.5.3 Η επιφανειακή τάση σύμφωνα με τον J. Straub και τους συνεργάτες του

Σύμφωνα και με τα αναφερόμενα στην αναφορά IAPS (1976) και στους Straub J. et al. (1980)<sup>10</sup>, η επιφανειακή τάση  $\sigma$  του ελαφρού ύδατος μπορεί να υπολογίζεται από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο με βάση την εξίσωση:

$$\sigma = \sigma_0 \tau^b (1 + b\tau) \quad (3-39)$$

$$\text{με } \tau = 1 - T/T^* \text{ όπου } T^* = 647.15 \text{ K K (IPTS 68)}$$

Οι τιμές των συντελεστών είναι

$$\sigma_0 = 0.2358 \text{ Nm}^{-1}$$

$$b = -0.625$$

---

<sup>10</sup> Blötte Straub J., Rosner N., Grigull U., Waerme- und Stoffuebertragung, 13:241, 1980.

μ = 1.256

Η περιογή ισχύος της προτεινόμενης εξίσωσης εκτείνεται για θερμοκρασίες από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο.

### **3.4 Το βαρύ ύδωρ ως ουσία μάλλον γνωστών ιδιοτήτων.**

#### **3.4.1 Γενικά για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος.**

Σε αντίθεση με ό,τι συνέβαινε για το ελαφρύ ύδωρ ήδη από το 1963, για το βαρύ ύδωρ δεν υπήρχαν, μέχρι και το 1984, Πίνακες Πλαιοίου. Αυτό συνέβαινε διότι μέχρι τότε η *Διεθνής Ένωση για τις Ιδιότητες του Υδρατμού (IAPS)* δεν είχε κάνει αποδεκτή καμία από τις παλαιότερα διατυπωμένες καταστατικές εξισώσεις σαν κατάλληλη για να περιγράψει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος, ούτε είχε αναγνωρίσει κάποια εξίσωση για τις ιδιότητες μεταφοράς του. Στο τέλος του 1982 έγιναν αποδεκτές οι εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς που προτάθηκαν από τους Matsunaga N. και Nagashima A., και στο 10<sup>ο</sup> *Διεθνές Συνέδριο για τις Ιδιότητες του Υδρατμού*<sup>11</sup> (10<sup>th</sup> ICPS, Moscow, USSR, 1984) αποφασίσθηκε τελικά ότι η καταστατική εξίσωση που είχε προταθεί από τους Hill P.G. et al. σε τεχνικές αναφορές και άρθρα τους, το 1981 και 1982 ικανοποιεί τις αναγκαίες προϋποθέσεις για να υιοθετηθεί ως πρότυπος τρόπος υπολογισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων της υπόψη ουσίας.

Η απουσία, λοιπόν, Πινάκων Πλαιοίου καθιστούσε δύσκολο τον εμπειριστατωμένο έλεγχο της ακρίβειας μιας προτεινόμενης καταστατικής εξίσωσης για το βαρύ ύδωρ. Οι ενδιαφερόμενοι για τέτοιους ελέγχους, όπως για παράδειγμα οι Ikeda M. et al., 1977, αξιοποιούσαν προς αυτήν την κατεύθυνση τους υπάρχοντες Πίνακες Πλαιοίου για το ελαφρύ ύδωρ<sup>11</sup> χρησιμοποιώντας την ακόλουθη λογική: Σε αντίστοιχες πιέσεις και θερμοκρασίες -ή ακόμα καλύτερα, σε αντίστοιχες ανηγμένες στο κρίσιμο σημείο πιέσεις και θερμοκρασίες- αναζητούνται όχι πια οι τιμές των ιδιοτήτων -αυτές θα είναι έτσι και αλλιώς πολύ διαφορετικές καθώς αναφέρονται στο ελαφρύ και όχι στο βαρύ ύδωρ- αλλά οι αντίστοιχες επιτρεπόμενες ανοχές. Λαμβάνοντας κανείς υπόψη αυτές τις ανοχές μπορεί και πάλι να συγκρίνει τα αποτελέσματα μιας υπό έλεγχο κ.ε.

---

<sup>11</sup> βλέπε για παράδειγμα τους πίνακες πλαιοίου που παρουσιάζονται από τον Schmidt E. et al., 1987.

με ομάδες πειραματικών αποτελεσμάτων, να εκτιμήσει τις αποκλίσεις τους και τέλος να τις συγκρίνει με τις ανοχές που βρέθηκαν από τους πίνακες πλαισίου. Αν οι αποκλίσεις βρίσκονται μέσα ή έστω αποδεκτά κοντά στα όρια που θέτουν οι αντίστοιχες ανοχές, αυτό σημαίνει σε γενικές γραμμές ότι η προτεινόμενη κ.ε. είναι επιτυχής. Η μόνη επιφύλαξη που μπορεί να υπάρχει σχετικά με τα παραπάνω είναι ότι οποιαδήποτε επίσημη υιοθέτηση Πινάκων Πλαισίου για το βαρύ ύδωρ, όπως οι πίνακες πλαισίου του 1984, είναι πιθανό για τις ίδιες πτήσεις και θερμοκρασίες να δίνουν διαφορετικές τιμές ιδιοτήτων και μικρότερες τιμές ανοχών. Η εύλογη αυτή σκέψη δεν επαληθεύθηκε ευτυχώς στην πράξη, πράγμα που αν γινόταν θα σήμαινε ότι πολλές προστάθειες για την κατασκευή κ.ε. εξισώσεων για το β.υ. όπως των Ikeda M. et al., 1977 ή του Ulrych G., 1981 κ.ά., ήταν στην ουσία μάταιες. Η εξήγηση βρίσκεται βέβαια στη μοριακή ομοιότητα του ελαφρού και του βαρέος ύδατος, η οποία και επιτρέπει τη χρησιμοποίηση τέτοιων τεχνικών ισχύει σε μεγάλο βαθμό<sup>12</sup> και η αρχή των αντιστοιχών καταστάσεων μεταξύ του ελαφρού και του βαρέος ύδατος.

Το βαρύ ύδωρ μπορεί πια σήμερα να χαρακτηριστεί ως ουσία μάλλον γνωστών ιδιοτήτων. Έχουν διατυπωθεί ήδη για αυτό επιτυχείς συσχετίσεις για τις θερμοδυναμικές του ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς οι περισσότερες από τις οποίες έχουν ήδη υιοθετηθεί από τη *Διεθνή Ένωση για τις Ιδιότητες του Υδραμίου (IAPS - International Association for the Properties of Steam)*. Δεν πρέπει να παραγνωρίζεται το γεγονός ότι αυτή η πρόοδος οφείλεται και στην ύπαρξη του συγγενούς φυσικά και μοριακά ελαφρού ύδατος για το οποίο ήταν από ενωρίτερα γνωστά πολλά πειραματικά δεδομένα και πολύ καλές εξισώσεις για τις ιδιότητες. Στη συνέχεια συνοψίζονται οι κυριότερες σχετικές εργασίες:

- Στη διατύπωση εξισώσεων κορεσμού διακρίνονται κυρίως οι εργασίες του Elliott J.N., 1963, των Tanishita I. et al., 1974 και των Hill P.G. και Macmillan R.D.C., 1979a; 1980.
- Στην τεχνητή συμπλήρωση των πειραματικών μετρήσεων με υπολογισμένα δεδομένα επιδίδονται επιτυχώς κυρίως οι Hill P.G. και MacMillan R.D.C., 1979a; 1980 και οι Hill P.G. et al., 1981; 1982.

---

<sup>12</sup> Όπως δείχνει κυρίως και η εργασία του Ulrych G., 1981.

- Στη χρησιμοποίηση της αρχής των αντιστοιχουσών καταστάσεων μεταξύ του ελαφρού και του βαρέος ύδατος, σε μεγάλη έκταση και με ικανοποιητικά αποτελέσματα, μπορεί να σταθεί κανείς στις προτάσεις των Lundqvist B. και Persson T., 1965 και του Ulrych G., 1981.
- Στη διατύπωση εξισώσεων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων για την ατμώδη φάση ξεχωρίζει η έρευνα των Lundqvist B. και Persson T., 1965, του Ulrych G., 1981 και των Hill P.G. et al., 1981; 1982.
- Στη διατύπωση εξισώσεων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων για την υγρή φάση αξιόλογες είναι οι εργασίες των Ikeda M. et al., 1977, του Ulrych G., 1981 και των Hill P.G. et al., 1981; 1982.
- Ενιαίο και εξαιρετικά θερμοδυναμικά συνεπές σύστημα εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος προτείνουν μόνο οι Hill P.G. και MacMillan R.D.C., 1979a; 1980 και οι Hill P.G. et al., 1981; 1982. Λιγότερη αλλά παρολαυτά ικανοποιητική θερμοδυναμική συνέπεια υπάρχει και στην εργασία του Ulrych G., 1981
- Πολύ καλής ακρίβειας είναι οι εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος που προτείνουν οι Matsunaga N. και Nagashima A., 1983a.

#### **3.4.2 Η καταστατική εξίσωση του P.G. Hill και των συνεργατών του για την υγρή φάση, την κατάσταση κορεσμού και την ατμώδη φάση.**

Ο Hill P.G. ανήκει στην ερευνητική ομάδα των Keyes F.G. et al. και αναζήτησε με τους συνεργάτες του μία καταστατική εξίσωση για το βαρύ ύδωρ<sup>13</sup> της μορφής  $\psi = \psi(\rho, T)$ , παρόμοια με αυτή που είχε αναπτυχθεί και για το ελαφρύ ύδωρ (βλέπε στην παράγραφο 3.3.2) αφού όπως είναι γνωστό οι θερμοδυναμικές ιδιότητες αυτών των δύο ουσιών δεν διαφέρουν σημαντικά.

Αυτή η καταστατική εξίσωση ισχύει τόσο στην υγρή όσο και στην ατμώδη φάση, από το τριπλό σημείο  $t$  ( $P_t = 0.006601 \text{ bar}$ ,  $T_t = 3.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) μέχρι πιέσεις περίπου 100 MPa και θερμοκρασίες 600  $^\circ\text{C}$ , και επιπλέον παρουσιάζει συνέχεια μεταξύ των

---

<sup>13</sup> Βλέπε Hill P.G. et al., AECL-7531, 1981; Journal of Physical Chemistry Reference Data, 11(1):1, 1982; Errata: 12(4):1065, 1983.

διαφορετικών φάσεων. Όμως, το μεγάλο πλεονέκτημα της προτεινόμενης καταστατικής εξίσωσης είναι η εξαιρετική φιλικότητά της προς τον χρήστη, ως απόρροια της υψηλής θερμοδυναμικής της συνέπειας, που επιτρέπει με πολύ εύκολες πράξεις (απλές παραγωγίες) τον υπολογισμό από αυτή των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος. Σημειώνεται ότι εάν η προτεινόμενη κ.ε. είχε τη μορφή  $P = P(\rho, T)$  -και όχι τη μορφή  $\psi = \psi(\rho, T)$ - θα ήταν εξαιρετικά πολυπλοκότερο να προσδιορισθούν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος, διότι τότε απαιτούνται πολλές ολοκληρώσεις. Ο υπολογισμός και μόνο των απαραίτητων σταθερών για τις αναγκαίες ολοκληρώσεις της κ.ε. της μορφής  $P = P(\rho, T)$  προκειμένου να διατυπωθούν σχέσεις για τις λοιπές θερμοδυναμικές ιδιότητες πολλαπλασιάζει σημαντικά τη δυσκολία<sup>14</sup>.

Η αντίστοιχη εξίσωση για το ελαφρύ ύδωρ είχε γίνει γνωστή, όπως ήδη αναφέρθηκε, πριν από αρκετά χρόνια (1968). Δυστυχώς, μόλις στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ανακοινώθηκαν πειραματικά δεδομένα για το β.υ., κυρίως αυτά για τον ειδικό όγκο  $v$  και την ενθαλπία  $h$  σε διάφορες καταστάσεις πίεσης και θερμοκρασίας, που ήταν ποσοτικά και ποιοτικά ικανά, ώστε να επιτρέπουν την κατασκευή μιας τέτοιας κ.ε. με αριθμητική επεξεργασία. Μάλιστα υπήρχαν ακόμα και τότε σοβαρές ελλείψεις, πράγμα που ανάγκασε τον Hill P.G. και τους συνεργάτες του να συμπληρώσουν το σύνολο των πειραματικών δεδομένων που χρησιμοποιούσαν με υπολογισμένα δεδομένα για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος σε κατάσταση κορεσμού<sup>15</sup>. Το επίπεδο της ακρίβειας που επιτεύχθηκε είναι από κάθε άποψη κατάλληλο για τη βιομηχανική χρήση, αλλά και για ερευνητικές εργασίες θερμοϋδραυλικής.

Η προτεινόμενη καταστατική εξίσωση έχει την μορφή:

$$\psi = \psi(\rho, T) = \psi_0(T) + RT \ln p + \rho Q(\rho, T) \quad (3-40)$$

στην οποία είναι:

$$Q = (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \left[ \sum_{i=1}^8 A_{ij}(\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \exp(-E\rho) * \sum_{i=9}^{10} A_{ij}\rho^{i-9} \right] \quad (3-41)$$

<sup>14</sup> Βλέπε για παράδειγμα και Lundqvist B. και Persson T., 1965 ή Ulrych G., 1981.

<sup>15</sup> Βλέπε και Hill P.G. και MacMillan R.D.C., 1979a, 1979b, 1980.

και

$$\psi_0(\mathbf{T}) = \sum_{i=1}^j C_i(\mathbf{T}/1000)^{i-1} + C_{j+1} \ln \mathbf{T} + C_{j+2} \mathbf{T}(\ln \mathbf{T})/1000 \quad (3-42)$$

$$R = 0.415147 \quad \text{kJ/(kgK)}$$

$$\tau = 1000/\mathbf{T}$$

$$j = 6$$

Οι μονάδες έχουν ως εξής:

$\psi$ ,  $\psi_0$  ελεύθερη εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg

(ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς  $\psi_h = 0$ )

T απόλυτη θερμοκρασία σε μονάδες K

$$\tau \quad 1000/\mathbf{T} \text{ σε } \text{K}^{-1}$$

$\rho$  πυκνότητα σε  $10^3 \text{ kg/m}^3$  (ισοδύναμα σε  $\text{g/cm}^3$ )

Οι σταθερές στο ανάπτυγμα διπλού αθροίσματος Q είναι:

$$\tau_c = 1.553$$

$$E = 4.3$$

$$\tau_{aj} = 1.553 (j = 1)$$

$$\rho_{aj} = 0.7 (j = 1)$$

$$\tau_{aj} = 2.53 (j > 1)$$

$$\rho_{aj} = 1.1 (j > 1)$$

Σε σχέση με τη σταθερή  $\tau_c$  της πιο πάνω κ.ε. πρέπει να γίνει η εξής παρατήρηση: Στην εργασία των Hill P.G. et al., 1981 αναφέρεται λανθασμένα ότι  $\tau_c = 1$ . Το λάθος έγινε αντιληπτό από τη στιγμή που επιδιώχθηκε, στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής, η υλοποίηση της προτεινόμενης καταστατικής εξίσωσης σε πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή με αποτέλεσμα να μην υπολογίζονται ορθά οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος. Με βιβλιογραφική έρευνα επιβεβαιώθηκε η ανακρίβεια αυτή και βρέθηκε η σωστή τιμή της σταθερής  $\tau_c$  στην εργασία των Hill P.G. et al., 1982.

Οι συντελεστές  $A_{ij}$  της εξίσωσης (3-41) παρατίθενται στον Πίνακα 3-6.

Οι συντελεστές C<sub>i</sub> της εξίσωσης (3-42) δίνονται από τον Πίνακα 3-7.

Η κατασκευή αυτής της καταστατικής εξίσωσης βασίστηκε σε μια τράπεζα πειραματικών δεδομένων για το βαρύ ύδωρ, που αποτελείται κυρίως από τις πειραματικές μετρήσεις ΡνΤ των Rivkin S.L. et al., 1962b, των Juza J. et al., 1966, των Keil G.S. et al., 1968b, των Tsedetberg N.V. et al., 1972, 1973 και των Alexandrov A.A. et al., 1976, βλέπε και το Διάγραμμα 3-2. Φυσικά αυτά δεν ήταν τα μοναδικά πειραματικά αποτελέσματα τα οποία χρησιμοποιήσαν οι Hill P.G. et al. Συγκεκριμένα αξιοποίησαν επιπλέον τις τιμές για την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση που δίνουν οι Friedman A.S. et al., 1954, επίσης τις τιμές για τον ειδικό όγκο των Emmet T.R. et al., 1975 καθώς και τον McLaurin G.E. et al., 1979. Χρησιμοποιήθηκαν ακόμα τα πειραματικά δεδομένα για την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση των Cockett A.H. et al., 1940 και των Rivkin S.L. et al., 1959b, 1963c, όπως αναλύονται από τον Rosta P.Z., 1971 και μετρήσεις για την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο των Amirhanov K.I. et al., 1975. Οπου ήταν αναγκαίο, έγινε και η μετατροπή των πειραματικών μετρήσεων από τη θερμοκρασιακή κλίμακα του 1948 (IPTS 48) στη νεότερη του 1968 (IPTS 68), όπως και η σχετική αναγωγή τους σε 100% καθαρό βαρύ ύδωρ. Στοιχεία της αριθμητικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων παρουσιάζονται από τους Friedman A.S. et al., 1954, τους Keyes F.G. et al., 1968 και βέβαια από τον ίδιο τον Hill P.G. και τους συνεργάτες του.

Η κ.ε. (3-40) των Hill P.G. et al. έτυχε ευνοϊκής υποδοχής από το 9<sup>ο</sup> "Διεθνές Συνέδριο για τις Ιδιότητες του Υδρατμού" (9<sup>th</sup> ICPS, Muenchen, Bundesrepublik Deutschland). Εκτιμήθηκε κυρίως η πολύ καλή ακρίβειά της, η πολύ ευρεία περιοχή ισχύος της καθώς και η εξαιρετική θερμοδυναμική συνέπειά της. Στο 10<sup>ο</sup> "Διεθνές Συνέδριο για τις Ιδιότητες του Υδρατμού" (10<sup>th</sup> ICPS, Moscow, USSR) ανακοινώθηκε η υιοθέτησή της, με μικρό περιορισμό της περιοχής ισχύος της και με διατύπωσή της σε ανηγμένη μορφή, από την "Διεθνή Ένωση για τις Ιδιότητες του Ατμού" (IAPS - International Association for the Properties of Steam) σαν η πρώτη -και μέχρι στιγμής (1989) μοναδική- τυποποίηση για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος, κάτω από τον τίτλο: "Η Καταστατική Εξίσωση της IAPS του 1984, για τις Θερμοδυναμικές Ιδιότητες του Βαρέος Υδάτος". Όπως είναι επομένως φυσικό, αυτή η καταστατική εξίσωση επλέχθηκε σαν η πιο κατάλληλη και χρησιμοποιείται στο υπολογιστικό μέρος της Διδακτορικής Διατριβής.



### 3.4.3 Σχέσεις για τον υπολογισμό των λοιπών θερμοδυναμικών ιδιοτήτων από την καταστατική εξίσωση του P.G. Hill και των συνεργατών του.

Κατ' αναλογία με όσα αναφέρονται στην § 3.3.2 και στην § 3.3.3 και δεδομένης της κοινής μαθηματικής μορφής των καταστατικών εξισώσεων του ελαφρού και του βαρέος ύδατος, είναι φανερό ότι η σχέση (3-3) και οι σχέσεις (3-6) έως και (3-23) που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος αντίστοιχα.

Επιπλέον σύμφωνα με τους Hill P.G. et al., 1982, η πίεση κορεσμού μπορεί να υπολογίζεται από τη συσχέτιση:

$$P_s(T) = P^* \exp \left[ (T^*/T) (n_1 \tau + n_2 \tau^{1.9} + n_4 \tau^2 + n_{11} \tau^{5.5} + n_{20} \tau^{10}) \right] \quad (3-43)$$

με  $\tau = 1000/T$  σε  $K^{-1}$  [βλέπε και εξίσωση (3-41)]

και  $P^* = 21.66$  MPa,  $T^* = 643.89$  K -οι ψευδοκρίσιμες τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας.

και  $n_1 = -7.81583$ ,  $n_2 = 17.6012$ ,  $n_4 = -18.1747$ ,  $n_{11} = -3.92488$ ,  $n_{20} = 4.19174$

Η συσχέτιση (3-43) ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$(\psi + P/\rho)_{fs} = (\psi + P/\rho)_{gs}$$

όπου οι δείκτες fs και gs δηλώνουν το κορεσμένο υγρό και τον κορεσμένο ατμό αντίστοιχα.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες που υπολογίζονται με βάση την κ.ε. των Hill P.G. et al., 1981 προκύπτουν, όπως φαίνεται από τα παραπάνω ως συνδυασμός παραγώγων της συνάρτησης Helmholtz  $\psi$ . Το μόνο μέγεθος πάντως που δεν μπορεί να υπολογισθεί εύκολα από την καταστατική εξίσωση είναι, όπως γίνεται φανερό, ο ειδικός όγκος  $v$  του βαρέος ύδατος. Η εξίσωση, όπως σχεδόν όλες οι κ.ε. κατηγορίας T-p είναι πεπλεγμένη ως προς τον ειδικό όγκο και πρέπει για τη λύση ως προς αυτόν να χρησιμοποιηθεί αριθμητική μέθοδος.

### 3.4.4 Οι συντελεστές αμοιβαίων δράσεων του βαρέος ύδατος.

Σύμφωνα με τους Hill P.G. και MacMillan R.D.C., 1988 οι συντελεστές αμοιβαίων δράσεων του βαρέος ύδατος

$B_2$  σε  $m^3 kg^{-1}$ ,  $B_3$  σε  $(m^3 kg^{-1})^2$  και  $B_4$  σε  $(m^3 kg^{-1})^3$

καθώς και οι παράγωγοί τους

$d\{B_2\tau\}/d\tau$ ,  $d\{B_3\tau^2\}/d\tau$  και  $d\{B_4\tau^3\}/d\tau$

είναι δυνατό να υπολογίζονται ως εξής:

$$B_2 = (M_{L.W.}/M_{H.W.}) B_{2L.W.} - \Delta B_2 / (M_{H.W.}) \quad (3-44)$$

$$B_3 = (M_{L.W.}/M_{H.W.}) B_{3L.W.} \quad (3-45)$$

$$B_4 = (M_{L.W.}/M_{H.W.}) B_{4L.W.} \quad (3-46)$$

$$d\{B_2\tau\}/d\tau = (M_{L.W.}/M_{H.W.}) \left[ d\{B_2\tau\}/d\tau \right]_{L.W.} + (M_{H.W.})^{-1} d\{\Delta B_2\tau\}/d\tau \quad (3-47)$$

$$d\{B_3\tau^2\}/d\tau = (M_{L.W.}/M_{H.W.}) \left[ d\{B_3\tau^2\}/d\tau \right]_{L.W.} \quad (3-48)$$

$$d\{B_4\tau^3\}/d\tau = (M_{L.W.}/M_{H.W.}) \left[ d\{B_4\tau^3\}/d\tau \right]_{L.W.} \quad (3-49)$$

όπου

$M_{L.W.} = 18.016 \text{ g mol}^{-1}$  το μοριακό βάρος του ελαφρού ύδατος.

$M_{H.W.} = 20.028 \text{ g mol}^{-1}$  το μοριακό βάρος του βαρέος ύδατος.

$\Delta B_2 = d_1 + d_2 T$ ,  $d_1 = 0.0063701361 \cdot 10^{-3}$ ,  $d_2 = -0.1019727 \cdot 10^{-7}$

και

$B_{2L.W.}$ ,  $B_{3L.W.}$ ,  $B_{4L.W.}$ ,  $\left[ d\{B_2\tau\}/d\tau \right]_{L.W.}$ ,  $\left[ d\{B_3\tau^2\}/d\tau \right]_{L.W.}$ ,  $\left[ d\{B_4\tau^3\}/d\tau \right]_{L.W.}$

οι ποσότητες που υπολογίζονται από τις σχέσεις (3-26) έως και (3-31).

### 3.4.5 Οι ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος.

Μετά τη δημοσίευση των μέχρι το 1963 γνωστών θερμοφυσικών ιδιοτήτων<sup>16</sup> και μέχρι το 1983 δεν υπήρξε άλλη συγκεντρωτική δημοσίευση για τις ιδιότητες του βαρέος ύδατος. Από το 1964 και μετά όμως δημοσιεύθηκαν μεμονωμένα πολλά πειραματικά αποτελέσματα για τις ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος. Οι Matsunaga N. και Nagashima A.<sup>17</sup> συγκεντρώνουν και παρουσιάζουν κριτικά στην εργασία τους τα περισσότερα από αυτά, και κάνουν μια συνολική ανασκόπηση της μέχρι το 1983 κατάστασης.

Το μεγάλο πλήθος των διαθέσιμων πειραματικών αποτελεσμάτων τόσο για τη δυναμική συνεκτικότητα όσο και για τη θερμική αγωγιμότητα του βαρέος ύδατος, αλλά και η κατάληξη σε επιτυχή και θερμοδυναμικά συνεπή καταστατική εξίσωση για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και αυτής της ουσίας<sup>18</sup> ήταν οι συνθήκες που οδήγησαν τους ερευνητές Matsunaga N. και Nagashima A. στη διατύπωση συσχετίσεων για τη συνεκτικότητα και τη θερμική αγωγιμότητα, ώστε να συμπληρωθεί το μοντέλο των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν οι καταλληλότερες και πιο αξιόπιστες πειραματικές τιμές, από την αριθμητική επεξεργασία των οποίων προέκυψαν αντίστοιχες εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος. Η εργασία αυτή των Matsunaga N. και Nagashima A. θεωρείται συνεισφορά της *Ιαπωνικής Εθνικής Επιτροπής για τις Ιδιότητες του Υδρατμού (Japanese National Committee for the Properties of Steam)* στην γενικότερη ερευνητική δουλειά της *Διεθνούς Ένωσης για τις Ιδιότητες του Υδρατμού (IAPS)*. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια οι προτεινόμενες σχέσεις έχουν μεγάλη περιοχή ισχύος και αρκετά καλή ακρίβεια και για αυτό το λόγο υιοθετήθηκαν και επίσημα από την Διεθνή Ένωση, μετά και από την εισήγηση της αντίστοιχης Ομάδας Εργασίας που τις έλεγξε και τις ενέκρινε<sup>19</sup>.

Σημειώνεται ότι τόσο η συνεκτικότητα όσο και η θερμική αγωγιμότητα δίνονται τελικά σαν συναρτήσεις της θερμοκρασίας και της πυκνότητας με σκοπό την πλήρη εξασφάλιση συμβατότητας με την καταστατική εξίσωση των Hill P.G. et al., 1981;

---

<sup>16</sup> Βλέπε και Kirillin V.A., 1963.

<sup>17</sup> Βλέπε και Matsunaga N., Nagashima A., Journal of Physical Chemistry Reference Data, 12(4):933, 1983a.

<sup>18</sup> Βλέπε και Hill P.G. et al., 1981; 1982.

<sup>19</sup> Βλέπε και Release of IAPS, 1982a; 1982b.

1982, η οποία έχει και αυτή επίσημα υιοθετηθεί από την IAPS -καταστατική εξίσωση κατηγορίας T-ρ. Αυτό το γεγονός περιορίζει την περιοχή ισχύος των συσχετίσεων μέχρι τη μέγιστη πίεση των 100 MPa, διότι αν θέλει κανείς να υπολογίσει τις ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος με ανεξάρτητες μεταβλητές την πίεση και τη θερμοκρασία πρέπει πρώτα να υπολογίσει την πυκνότητα από την καταστατική εξίσωση των Hill P.G. et al., 1981; 1982, πράγμα που είναι δυνατό μόνο μέχρι τα 100 MPa. Οι Matsunaga N. και Nagashima A. διαπίστωσαν όμως ότι οι συσχετίσεις τους αποδίδουν πολύ καλά τα πειραματικά δεδομένα των ιδιοτήτων μεταφοράς και σε υψηλότερες πιέσεις αρκεί να είναι δυνατό να υπολογίζεται η πυκνότητα του βαρέος ύδατος από άλλη καταστατική εξίσωση.

Όσο αφορά στην ιδιότητα της επιφανειακής τάσης η *Διεθνής Ένωση για τις Ιδιότητες του Υδραμιού (IAPS)* ανέθεσε τη συγκέντρωση και την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων και των θεωρητικών συμπερασμάτων για την επιφανειακή τάση τόσο του ελαφρού όσο και του βαρέος ύδατος σε σχετική Ομάδα Εργασίας υπό τη διεύθυνση του U. Griggill<sup>20</sup>. Η Ομάδα αυτή κατέληξε σε κατάλληλο Πίνακα Πλαισίου και απλή ημιπειρική σχέση για την επιφανειακή τάση του ελαφρού ύδατος με καλή ακρίβεια και ευρεία περιοχή ισχύος. Η σχέση αυτή και ο Πίνακας Πλαισίου υιοθετήθηκαν από την IAPS σαν Διεθνές Πρότυπο<sup>21</sup>. Η Ομάδα πρότεινε επίσης και μικρές τροποποιήσεις της σχέσεως ώστε να είναι δυνατόν να υπολογίζεται από αυτή και η επιφανειακή τάση του βαρέος ύδατος. Η προτεινόμενη ημιπειρική σχέση για την επιφανειακή τάση του βαρέος ύδατος δεν έχει γίνει μέχρι σήμερα (1999) ευρύτερα αποδεκτή καθώς βασίζεται μόνο στα πειραματικά δεδομένα που μείτρησε η επιστημονική ομάδα των Vargaftik N.B. et al., 1973b.

#### **3.4.5.1 Η συνεκτικότητα σύμφωνα με τους N. Matsunaga και A. Nagashima.**

Για τον υπολογισμό της δυναμικής συνεκτικότητας  $\eta$  του βαρέος ύδατος προσφέρεται η σχέση<sup>22</sup>:

---

<sup>20</sup> Βλέπε Straub J., Rosner N., Griggill U., Waerme- und Stoffuebertragung, 13:241, 1980.

<sup>21</sup> Πρόκειται για την ήδη αναφερθείσα συσχέτιση (3-39).

<sup>22</sup> Βλέπε και Matsunaga N., Nagashima A., Journal of Physical Chemistry Reference Data, 12(4):933, 1983a.

$$\eta = \eta_0(T_r) \exp \left\{ \rho_r \left[ \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^6 A_{ij} (T_r^{-1} - 1)^i (\rho_r - 1)^j \right] \right\} \quad (3-50)$$

όπου

$$\eta_0(T_r) = H T_r^{1/2} \left( \sum_{k=0}^3 B_k T_r^{-k} \right)^{-1} \quad (3-51)$$

και

$$T_r = T/T^*, \rho_r = \rho/\rho^*$$

η σε  $10^{-6}$  Pa s

όπου  $T^*$ ,  $\rho^*$ , είναι σταθερές που αντιπροσωπεύουν προσεγγιστικά τις τιμές της απόλυτης θερμοκρασίας και της πυκνότητας στο κρίσιμο σημείο αντίστοιχα -είναι δηλαδή οι ψευδοκρίσιμες τιμές, και έχουν ως εξής:

$$T^* = 643.89 \text{ K}, \rho^* = 358 \text{ kgm}^{-3}$$

Οι άλλες σταθερές έχουν ως εξής:

$$H = 55.2651 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$$

$$B_0 = 1.00000 \quad B_1 = 0.940695$$

$$B_2 = 0.578377 \quad B_3 = -0.202044$$

Οι σταθερές  $A_{ij}$  δίνονται στον Πίνακα 3-8.

Η περιοχή ισχύος της προτεινόμενης εξίσωσης για τη δυναμική συνεκτικότητα του βαρέος ύδατος ισχύει στο τετράγωνο που ορίζεται από τις πιέσεις:

$$0 \text{ MPa} \leq P \leq 100 \text{ MPa}$$

και τις θερμοκρασίες:

$$277 \text{ K (τριπλό σημείο)} \leq T \leq 775 \text{ K}$$

Εξάφρεση αποτελεί η μικρή περιοχή

$$0.99 < T_r < 1.005 \quad \text{και} \quad 0.9 < \rho_r < 1.1$$

στη γειτονιά του κρισίμου σημείου για την οποία δεν υπάρχουν αρκετά πειραματικά αποτελέσματα.

Οι Matsunaga N. και Nagashima A. συμπραίνουν, μετά από συγκρίσεις με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, ότι αυτή η διατύπωση [εξισώσεις (3-50) και (3-51)] για τη δυναμική συνεκτικότητα μπορεί να ισχύει και για πιέσεις μέχρι 200 MPa και για την ίδια θερμοκρασιακή περιοχή<sup>23</sup>, και ότι μπορεί, με μειωμένη ακρίβεια, να χρησιμοποιηθεί και σε υψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες, μέχρι και 1000 K. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να έχει κανείς μια εικόνα του πώς μεταβάλλεται η συνεκτικότητα του βαρέος ύδατος και σε εκείνες τις απομακρυσμένες περιοχές.

Οι αβεβαιότητες στον υπολογισμό της συνεκτικότητας διακρίνονται στο Διάγραμμα 3-3 και κυμαίνονται από ένα ελάχιστο  $\pm 1\%$  έως και ένα μέγιστο  $\pm 5\%$ . Η προτεινόμενη εξίσωση συμφωνεί ικανοποιητικά με τα πειραματικά δεδομένα από την επεξεργασία των οποίων προέκυψε.

Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αντλήθηκαν από τις πειραματικές εργασίες των ακόλουθων ερευνητών:

Για την υγρή φάση: Agayev N.A. et al., 1967; 1968; 1971; 1974, Selecki A. et al., 1970, Millero F.J. et al., 1971, Rivkin S.L. et al., 1972; 1974a; 1974b; 1976; 1977, Kinoshita H. et al., 1974; 1978, Kellomaeki A., 1975, Agayev N.A., 1979, Goncalves F.A., 1979

Για την ατιμώδη φάση: Rivkin S.L. et al., 1972; 1974a; 1974b; 1976; 1977, Kinoshita H. et al., 1974; 1978, Abe S. et al., 1978, Agayev N.A., 1979

Η πλειοψηφία των ερευνητών μέτρησαν τιμές για την κινηματική συνεκτικότητα του βαρέος ύδατος, τις οποίες μετέτρεψαν σε τιμές δυναμικής συνεκτικότητας πολλαπλασιάζοντας με τις αντίστοιχες πυκνότητες του βαρέος ύδατος για τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Οι ερευνητές αυτοί υποχρεώθηκαν να υπολογίσουν τις αναγκαίες για τους υπολογισμούς πυκνότητες από ποικίλες εξισώσεις μικρής κατά κανόνα αξιοπιστίας διότι μεταξύ του 1970 και του 1980 που διεξήχθησαν τα αξιολογότερα πειράματα εξακρίβωσης της συνεκτικότητας του βαρέος ύδατος δεν υπήρχε ακριβής καταστατική εξίσωση για

αυτό. Οι Matsunaga N. και Nagashima A. που χρησιμοποίησαν τέτοια δεδομένα για τη κινηματική συνεκτικότητα του βαρέος ύδατος με σκοπό τη δημιουργία συσχέτισης για τη δυναμική συνεκτικότητα φρόντισαν ιδιαίτερα να μετατρέψουν τα πειραματικά δεδομένα σε τιμές δυναμικής συνεκτικότητας πολυπλοκότητας με τις αντίστοιχες πυκνότητες του βαρέος ύδατος, όπως αυτές υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Hill P.G. et al., 1982 για το βαρύ ύδωρ, που ήδη παρουσιάστηκε στην § 3.4.2.

### 3.4.5.2 Η θερμική αγωγιμότητα σύμφωνα με τους N. Matsunaga και A. Nagashima.

Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  του βαρέος ύδατος προσφέρεται η σχέση<sup>24</sup>:

$$\lambda = \Lambda \left[ \lambda_0 + \Delta\lambda + \Delta\lambda_c + \Delta\lambda_L \right] \quad (3-52)$$

όπου

$$\lambda_0 = \sum_{i=0}^5 A_i T_r^i \quad (3-53)$$

$$\Delta\lambda = B_0 \left[ 1 - \exp(B_e \rho_r) \right] + \sum_{j=1}^4 B_j \rho_r^j \quad (3-54)$$

$$\Delta\lambda_c = C_1 f_1(T_r) f_2(\rho_r) \left\{ 1 + f_2^2(\rho_r) \left[ C_2 f_1^4(T_r) / f_3(T_r) + 3.5 f_2(\rho_r) / f_4(T_r) \right] \right\} \quad (3-55)$$

$$\Delta\lambda_L = D_1 f_1^{1,2}(T_r) \left\{ 1 - \exp \left[ -(\rho_r / 2.5)^{10} \right] \right\} \quad (3-56)$$

και

$$f_1(T_r) = \exp(C_{T1} T_r + C_{T2} T_r^2) \quad (3-57)$$

$$f_2(\rho_r) = \exp \left[ C_{R1} (\rho_r - 1)^2 \right] + C_{R2} \exp \left[ C_{R3} (\rho_r - \rho_{r1})^2 \right] \quad (3-58)$$

<sup>23</sup> Δηλαδή την: "277 K (τριπλό σημείο)  $\leq T \leq 775$  K".

<sup>24</sup> Βλέπε και Matsunaga N., Nagashima A., Journal of Physical Chemistry Reference Data, 12(4):933, 1983a.

$$f_3(T_r) = 1 + \exp[60(\tau - 1) + 20] \quad (3-59)$$

$$f_4(T_r) = 1 + \exp[100(\tau - 1) + 15] \quad (3-60)$$

ενώ

$$\tau = T_r / (|T_r - 1.1| + 1.1)$$

$$T_r = T / T^*, \rho_r = \rho / \rho^*$$

λ σε W/(mK)

όπου  $T^*$ ,  $\rho^*$ , είναι σταθερές που αντιπροσωπεύουν προσεγγιστικά τις τιμές της απόλυτης θερμοκρασίας και της πυκνότητας στο κρίσιμο σημείο αντίστοιχα -είναι δηλαδή οι ψευδοκρίσιμες τιμές, και έχουν ως εξής:

$$T^* = 643.89 \text{ K}, \rho^* = 358 \text{ kgm}^{-3}$$

Οι άλλες σταθερές δίνονται στον Πίνακα 3-9.

Η περιοχή ισχύος της προτεινόμενης εξίσωσης για τη θερμική αγωγιμότητα του βαρέος ύδατος ισχύει στο τετράγωνο που ορίζεται από τις πιέσεις:

$$0 \text{ MPa} \leq P \leq 100 \text{ MPa}$$

και τις θερμοκρασίες:

$$277 \text{ K (τριπλό σημείο)} \leq T \leq 825 \text{ K}$$

Εξάιρεση αποτελεί η μικρή περιοχή:

$$0.100 < T_r < 1.005 \text{ και } 0.8 < \rho_r < 1.2$$

στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου για την οποία δεν υπάρχουν αρκετά πειραματικά αποτελέσματα.

Οι Matsunaga N. και Nagashima A. συμπεραίνουν, μετά από συγκρίσεις με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, ότι αυτή η εξίσωση μπορεί να ισχύει και για



πίεσεις μέχρι 250 MPa και για την ίδια θερμοκρασιακή περιοχή<sup>25</sup>. Σε αυτές τις μεγάλες πιέσεις βέβαια μειώνεται κατά τη ακρίβεια της.

Οι αβεβαιότητες στον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας διακρίνονται στο Διάγραμμα 3-4 και κυμαίνονται από ένα ελάχιστο  $\pm 2\%$  έως και ένα μέγιστο  $\pm 10\%$ .

Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αντλήθηκαν από τις πειραματικές εργασίες των ακόλουθων ερευνητών:

Για την υψηλή φάση: Le Neindre B. et al., 1968; 1976, Yata J. et al., 1979.

Για την ατμώδη φάση: Bury P., 1968, Vargafik N.B. et al., 1973a, Zainullin M.M. et al., 1973, Tarzimanov A.A. et al., 1974.

### **3.4.5.3 Σχόλια για τις εξισώσεις για τη συνεκτικότητα και τη θερμική αγωγιμότητα.**

Το πειραματικό υλικό το οποίο αφορά στις ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος, και που αναλύθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην εργασία των Matsunaga N. και Nagashima A., είναι πραγματικά εντυπωσιακό. Πρόκειται για τα αποτελέσματα εντατικής έρευνας μέσα σε μία περίοδο περίπου 50 ετών από την ανακάλυψη του βαρέος ύδατος το 1932. Παρόλο όμως που είναι φανερό ότι οι προτεινόμενες συσχετίσεις αναπαριστούν τα μέχρι το 1983 πειραματικά δεδομένα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, είναι αναγκαίο να επισημανθούν οι σχετικά υψηλές αποκλίσεις των υπολογιζόμενων τιμών σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις. Μάλιστα διακρίνεται στα Διαγράμματα 3-3 και 3-4 ότι οι αποκλίσεις που παρουσιάζει η συσχέτιση για τη θερμική αγωγιμότητα είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες της συσχέτισης για την δυναμική συνεκτικότητα. Πρέπει να επισημανθεί επίσης η καθαρά εμπειρική μορφή της συσχέτισης για τη θερμική αγωγιμότητα. Αντίθετα η εξίσωση για τη συνεκτικότητα αντέχει σε σχηματική θεωρητική εξήγηση. Αυτό οφείλεται στο ότι ακόμα και τα καλύτερα σημερινά πειραματικά δεδομένα περιέχουν εσωτερικές ασυνέπειες σε σημείο που για μια περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών να εμφανίζονται μέχρι και αντίθετες συμπεριφορές όσο αφορά στις ιδιότητες μεταφοράς. Το πρόβλημα είναι εντονότερο για τις πειραματικές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας.

---

<sup>25</sup> δηλαδή την: "277 K (τριπλό σημείο)  $\leq T \leq 825$  K"

Προς το παρόν θεωρείται πολύ δύσκολο να εξηγηθεί με επιστημονικό τρόπο η συμπεριφορά των ιδιοτήτων μεταφοράς του βαρέος ύδατος γύρω από το κρίσιμο σημείο.

Οι Matsumaga N. και Nagashima A. διαπίστωσαν εξάλλου ότι διάφορες θεωρητικές μέθοδοι πρόβλεψης των ιδιοτήτων μεταφοράς, όπως για παράδειγμα η αρχή των αντιστοιχουσών καταστάσεων<sup>26</sup>, σαν βάση για αντίστοιχες συσχετίσεις για το βαρύ ύδωρ ή έστω ως μέσο για να εξηγηθούν αν είναι δυνατό οι ασυμφωνίες ανάμεσα στα διάφορα πειραματικά δεδομένα, αποδείχθηκαν ανεπαρκείς. Οι ερευνητές πιστεύουν ότι χρειάζονται πρόσθετες πειραματικές μελέτες για τη συνεκτικότητα στις υψηλές πιέσεις και για τη θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασίες μικρότερες από 40 °C, και βέβαια γενικά στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου.

#### **3.4.5.4 Η επιφανειακή τάση του βαρέος ύδατος σύμφωνα με τον J. Straub και τους συνεργάτες του.**

Ο J. Straub και οι συνεργάτες του ανέλαβαν να διατυπώσουν συνοπτικά και περιεκτικά στην εργασία τους<sup>27</sup>:

- τον τρόπο με τον οποίο έγινε η επεξεργασία των πειραματικών τιμών ώστε να επιτευχθεί η κατάσφραξη ενός αποδεκτού Πίνακα Πλαισίου για την επιφανειακή τάση του ελαφρού ύδατος,
- τη θεωρητική βάση και τα πειραματικά αποτελέσματα στα οποία στηρίχθηκε η δημιουργία των εξισώσεων για την επιφανειακή τάση του ελαφρού και του βαρέος ύδατος, και
- τις τροποποιήσεις της ημιεμπειρικής σχέσεως για την επιφανειακή τάση του ελαφρού ύδατος ώστε αυτή να αναπαράγει και την επιφανειακή τάση του βαρέος ύδατος.

Συγκεκριμένα οι Straub J. et al. προτείνουν για το βαρύ ύδωρ:

$$\sigma = \sigma_0 \tau^b (1 + b\tau) \quad (3-61)$$

$$\text{με } \tau = 1 - T/T^* \quad \text{όπου } T^* = 644.65 \text{ K (IPTS 68)}$$

Οι τιμές των συντελεστών είναι:

---

<sup>26</sup> Βλέπε και Πετρόπουλος Ν.Π., 1991, Παράρτημα II.

<sup>27</sup> Βλέπε Straub J., Rosner N., Grigull U., Waerme- und Stoffuebertragung, 13:241, 1980.

$$\sigma_0 = 245.3 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

$$b = -0.663$$

$$\mu = 1.27$$

Η περιοχή ισχύος της προτεινόμενης εξίσωσης εκτείνεται για θερμοκρασίες από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο.

Η εξίσωση (3-61) για την επιφανειακή τάση του βαρέος ύδατος διαφέρει από την αντίστοιχη (3-39) για το ελαφρύ ύδωρ μόνο στις τιμές των συντελεστών της. Για να μπορέσει κανείς να αξιολογήσει σωστά την πρώτη εξίσωση (3-61) πρέπει να εξετάσει το πόσο ακριβής είναι η δεύτερη (3-39). Διαπιστώθηκε<sup>28</sup> ότι οι τιμές που δίνει για την επιφανειακή τάση του ελαφρού ύδατος η αντίστοιχη εξίσωση (3-39) αποκλίνουν από τα πειραματικά αποτελέσματα το πολύ κατά  $0.02 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$  (0.1%) μέχρι τη θερμοκρασία των  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  και μόνο για υψηλότερες θερμοκρασίες της τάξης των  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  μεγαλώνουν και φθάνουν μέχρι  $0.07 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$  (0.5%).

Όπως εξάλλου εισάγεται από τους ίδιους τους Straub J. et al., (1980), η μέση τετραγωνική απόκλιση:

$$\Delta\sigma = \left[ \sum^n (\sigma_{εξ} - \sigma_{περ})^2 / (n - 1) \right]^{1/2}$$

όπου

$\sigma_{εξ}$  η υπολογιζόμενη τιμή

$\sigma_{περ}$  η μετρούμενη τιμή

n ο αριθμός των διαθέσιμων πειραματικών τιμών από το τριπλό ως το κρίσιμο σημείο παίρνει για την εξίσωση της επιφανειακής τάσης του ελαφρού ύδατος την τιμή  $0.06 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ .

Η συμπεριφορά της προτεινόμενης εξίσωσης (3-61) για την επιφανειακή τάση του βαρέος ύδατος αναμένεται να είναι ανάλογη με εκείνη της εξίσωσης (3-39) για το

---

<sup>28</sup> Βλέπε Straub J., Rosner N., Grigull U., Waerme- und Stoffuebertragung, 13:241, 1980.

ελαφρύ ύδωρ, δεδομένου ότι μεγάλο μέρος των πειραματικών δεδομένων για την επιφανειακή τάση του ε.υ. παράχθηκε από τους ίδιους ερευνητές που έδωσαν και το μοναδικό σύνολο πειραματικών τιμών για την επιφανειακή τάση του β.υ. Το μέγεθος Δσ παίρνει για την περίπτωση του β.υ. την αυξημένη τιμή  $0.16 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ . Η αύξηση αυτή δεν είναι αφύσικη και οφείλεται στο ότι ο αριθμός των μετρήσεων για την επιφανειακή τάση του β.υ. είναι πολύ περιορισμένος.

Οι Straub J. et al. επιχείρησαν να παρουσιάσουν πέρα από την προηγούμενη συσχέτιση και Πίνακα Πλαισίου για την επιφανειακή τάση του βαρέος ύδατος παρόλα τα λίγα σχετικά πειραματικά δεδομένα. Η εργασία τους αυτή τελικά δεν υιοθετήθηκε επίσημα από την *Διεθνή Ένωση για τις Ιδιότητες του Υδάτινου (IAPS)* και δεν αποτελεί ως εκ τούτου σχετικό Διεθνές Πρότυπο για το βαρύ ύδωρ μολονότι είναι η μοναδική μέχρι σήμερα (1999) εμπειριστατωμένη παρουσίαση. Αναμένονται και άλλα νεότερα πειραματικά δεδομένα για την επιφανειακή τάση του β.υ. ώστε να αμβλυνθεί η αβεβαιότητα που υπάρχει στις πειραματικές τιμές<sup>29</sup> πάνω από τους  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Η προτεινόμενη συσχέτιση πάντως προτιμάται από το πολυώνυμο προσαρμογής που κατασκευάστηκε<sup>30</sup> από τον Ulrych G., 1981 κυρίως διότι επδέχεται θεωρητικής ερμηνείας και διότι θεωρείται τόσο επιτυχημένη όσο και η αντίστοιχη συσχέτιση και πάλι των Staub J. et al. για την επιφανειακή τάση του ελαφρού ύδατος· υπενθυμίζεται ότι η τελευταία αποτελεί Διεθνές Πρότυπο.

Σημειώνεται ότι παρόλο που στο υπολογιστικό μέρος της Διδακτορικής Διατριβής η συσχέτιση χρησιμοποιείται για όλη την περιοχή ισχύος της (θερμοκρασίες από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο) πρέπει να είναι κανείς επιφυλακτικός όσο αφορά στις τιμές που υπολογίζονται για την επιφανειακή τάση σε θερμοκρασίες πάνω από  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Οι τιμές αυτές θεωρούνται μάλλον ενδεικτικές και όχι αποδεκτά ακριβείς.

### **3.5 Το Νάτριο ως ουσία μερικά γνωστών ιδιοτήτων.**

Τα πρόσφατα χρόνια σημαντική ερευνητική προσπάθεια εστιάστηκε σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υγρών μετάλλων, και ιδιαίτερα του Νατρίου και των

---

<sup>29</sup> Βλέπε και Ulrych G., 1981.

<sup>30</sup> Βλέπε και Πετρόπουλος Ν.Π. 1981, § 5.7.

κρυστάτων Νατρίου – Καλίου. Η αιτία ήταν φυσικά η χρήση αυτών των μετάλλων ως ψυκτικά μέσα στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος. Η χρήση των υγρών μετάλλων στους ΠΑΙ εξυπηρέτησε την ανάγκη της απομάκρυνσης μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας σε χαμηλές ταχύτητες ροής χωρίς να παρατηρούνται σημαντικές πτώσεις της θερμοκρασίας. Τα υγρά μέταλλα έχουν σημαντικές ιδιότητες που διευκολύνουν προς αυτή την κατεύθυνση, όπως πίεση υγρής φάσης που δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, χαμηλή πίεση ατμών, υψηλό σημείο βρασμού και μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, πράγμα που επιτρέπει τη λειτουργία των ΠΑΙ σε πιέσεις περιβάλλοντος με υψηλές θερμοκρασίες και νετρονικές ροές. Επιπλέον δεν ραδιολύονται. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι η χαμηλή τους ειδική θερμοχωρητικότητα, σε σχέση με το νερό, και το ότι όλα - εκτός από τον Υδράργυρο, οποίος βεβαίως δεν χρησιμοποιείται στην Πυρηνική Τεχνολογία- είναι στερεά στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Δεδομένης όμως της υψηλής θερμικής τους αγωγιμότητας εξασφαλίζεται με τη χρήση των υγρών μετάλλων εξασφαλίζεται ο επιθυμητός ρυθμός στην παραγωγή της θερμότητας από τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου. Έχει αποδειχθεί ότι το Νάτριο και τα κράματα Νατρίου - Καλίου είναι τα υγρά μέταλλα που προσφέρονται περισσότερο για τους ΠΑΙ, τόσο για αντιδραστήρες θερμικών νετρονίων, όσο και για αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων. Ειδικά για τους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (FBR - Fast Breeder Reactors), η χρήση υγρών μετάλλων ως ΨΜ επιβάλλεται, δεδομένου ότι το νερό έχει, όπως είναι γνωστό, ισχυρές επιβραδυντικές ιδιότητες.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σήμερα (1995) διαθέσιμες<sup>31</sup> συσχετίσεις για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του Na στις καταστάσεις κορεσμένου υγρού και ατμού. Παρουσιάζονται ακόμα συσχετίσεις για τη θερμική αγωγιμότητα, τη δυναμική συνεκτικότητα και την επιφανειακή τάση της υγρής φάσης. Πρόκειται για ένα σύνολο διατυπώσεων που περιλαμβάνει σχέσεις που προκύπτουν από θεωρητικούς συλλογισμούς, σχέσεις που στην ουσία βασίζονται σε γενικές ή γενικευμένες εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες καθώς και πολύ λίγες ειδικές εξισώσεις για περιορισμένο αριθμό θερμοφυσικών ιδιοτήτων. Η απουσία αξιόπιστων συσχετίσεων, οι οποίες να αποδίδουν τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου σε όλη την περιοχή θερμοκρασιών και πιέσεων της υγρής και της ατμώδους φάσης, πέρα από τις καταστάσεις κορεσμού καθώς και η μεγάλη αβεβαιότητα με την οποία υπολογίζονται

---

<sup>31</sup> Βλέπε και Fink J.K. και Leibowitz L., 1995.

από τις σημερινές διαθέσιμες συσχετίσεις -στην περιοχή για την οποία ισχύουν- αυτές οι θερμοφυσικές ιδιότητες, οδηγούν στην κατάταξη του Νατρίου ως "ουσία μερικά γνωστών ιδιοτήτων" με την έννοια που διαπραγματευθήκαμε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της Διδακτορικής Διατριβής.

### **3.5.1 Σχέσεις για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Na σύμφωνα με τους J.K. Fink και L. Leibowitz.**

#### **3.5.1.1 Εισαγωγή.**

Οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995 χρησιμοποίησαν όλα τα μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990, διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου, προκειμένου να διατυπώσουν εξισώσεις για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού. Για το σκοπό αυτό δέχθηκαν ότι τα καταστατικά μεγέθη στο κρίσιμο σημείο έχουν τις ακόλουθες τιμές:

κρίσιμη θερμοκρασία  $T^* = 2503.7 \text{ K}$

κρίσιμη πυκνότητα  $\rho^* = 219 \text{ kgm}^{-3}$

κρίσιμη πίεση  $P^* = 25.64 \text{ MPa}$

Επιπλέον δέχθηκαν ότι η θερμοκρασία βρασμού του υγρού Νατρίου υπό ατμοσφαιρική πίεση είναι:

$$T_s(1 \text{ atm}) = T_s(0.1013 \text{ MPa}) = T_s(1.013 \text{ bar}) = 1154.7 \text{ K}$$

και ότι το σημείο τήξεως είναι:

$$T_m = 371 \text{ K}$$

Οι εξισώσεις που διατυπώθηκαν αφορούν κατά κύριο λόγο στις θερμοδυναμικές ιδιότητες πυκνότητα, ενθαλπία και ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και υπό σταθερό όγκο για το κορεσμένο υγρό και τον κορεσμένο ατμό του Νατρίου. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για την ευκολότερη διάτυπωση αυτών των εξισώσεων παρουσιάζονται και εξισώσεις για άλλες θερμοδυναμικές ιδιότητες όπως η

ταχύτητα του ήχου στο υγρό Νάτριο, η ισόθλιπη διαστολικότητα, η ισοθερμοκρασιακή συμπεριστατικότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής. Για την εξίσωση κορεσμού και τις εξισώσεις για τη θερμική αγωγιμότητα την δυναμική συνεκτικότητα του υγρού Νατρίου καθώς και για την εμφανειακή τάση οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995 δεν προχωρούν σε δικές τους διατυπώσεις αλλά κάνουν δεκτές τις διατυπώσεις άλλων ερευνητών.

Όλες οι προτεινόμενες διατυπώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες εξετάζονται κριτικά σε σύγκριση με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και με άλλες υπάρχουσες διατυπώσεις· για τις άλλες διατυπώσεις δικαιολογείται πλήρως η(οι) αιτία(ες) για τις οποίες δεν προτιμώνται τελικά. Με βάση αυτή την κριτική εξέταση μπορεί κανείς να δεχθεί ότι υπάρχουν δύο σχετικά διακριτές περιοχές θερμοκρασιών για τις οποίες διαφέρει σημαντικά η αβεβαιότητα με την οποία υπολογίζονται οι θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου. Οι μεγαλύτερες τιμές αβεβαιότητας παρατηρούνται γενικά στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου  $T^*$  και του σημείου τήξεως  $T_m$ . Συγκεκριμένα έχουμε:

#### **Αβεβαιότητες υπολογισμών για την περιοχή θερμοκρασιών:**

##### **371 K $\leq$ T $\leq$ 2000 K**

###### Κορεσμένο υγρό

- πυκνότητα 0.3 - 14%
- ενθαλπία 1 - 2%
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση 2 - 20%
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο 5 - 40%

###### Κορεσμένος ατμός

- πυκνότητα 15 - 25%
- ενθαλπία 1 - 4%
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση 35 - 50%
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο 35 - 75%

#### **Αβεβαιότητες υπολογισμών για την περιοχή θερμοκρασιών:**

##### **2000 K $\leq$ T $\leq$ 2503.7 K**

### Κορεσμένο υγρό

- πυκνότητα 14 - 26%
- ενθαλπία 10 - 12 %
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση 30 - 50%
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο 65 -90%

### Κορεσμένες ατμός

- πυκνότητα 16 -27%
- ενθαλπία 10 - 12 %
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση 50 - 65%
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο 45 -65%

Επισημαίνεται ότι με την παραδοχή του ασυμπίεστου υγρού, οι εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του κορεσμένου υγρού μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον προσεγγιστικό υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου στην υγρή φάση.

### **3.5.1.2 Εξίσωση κορεσμού και θερμότητα ατμοποίησης.**

Προτείνεται ότι η καταλληλότερη εξίσωση κορεσμού για το Νάτριο είναι αυτή που διαμορφώθηκε από τους Browning P. και Potter P.E., 1985, σύμφωνα με την οποία η πίεση κορεσμού Ps συνδέεται με την θερμοκρασία με την ακόλουθη συσχέτιση:

$$\ln P_s = a + bT^{-1} + c \ln T \quad (3-62)$$

όπου:

$$a = 11.9463, b = -12633.7 \text{ και } c = -0.4672$$

και Ps σε MPa , T σε K.

Η αβεβαιότητα με την οποία υπολογίζεται η πίεση κορεσμού για διάφορες θερμοκρασίες φθάνει το 25% στη γειτονιά του σημείου τήξεως Tm, μειώνεται περί το 9% στη γειτονιά των 600 K και για μεγαλύτερες θερμοκρασίες κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5%.



Φανερό είναι ότι η ποσότητα  $dP_s/dT$ , η οποία είναι αναγκαία, όπως θα δούμε στη συνέχεια, για τον υπολογισμό και άλλων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_s = dP_s/dT = (-bT^{-2} + cT^{-1}) \exp(a + bT^{-1} + c \ln T) \quad (3-63)$$

$\gamma_s$  σε MPaK<sup>-1</sup>.

Η συσχέτιση από την οποία είναι δυνατό να υπολογίζεται η θερμοκρασία κορεσμού ως συνάρτηση της πίεσης προτάθηκε από τους Dunn F.E. et al., 1987 και είναι η ακόλουθη:

$$T_s = 2C \left[ -B + (B^2 + 4AC - 4C \ln P)^{0.5} \right]^{-1} \quad (3-64)$$

όπου:

$A = 7.8130$ ,  $B = 11209$  και  $C = 5.2490 \cdot 10^5$

και  $T_s$  σε K,  $P$  σε MPa.

Προτείνεται ότι η θερμότητα ατμοποίησης σε kJ/kg πρέπει να υπολογίζεται από τη συσχέτιση:

$$\Delta h_g = h_{gs} - h_s = 393.37(1 - T/T^*) + 4398.6(1 - T/T^*)^{0.29302} \quad (3-65)$$

η οποία ισχύει για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 2503.7 \text{ K}$$

Η αβεβαιότητα των υπολογισμών της θερμότητας ατμοποίησης αυξάνεται από περίπου 1% στη γειτονιά του σημείου τήξεως  $T_m$  έως περίπου 10% στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου  $T^*$ .

### 3.5.1.3 Θερμοδυναμικές ιδιότητες του κορεσμένου υγρού.

Πυκνότητα σε kgm<sup>-3</sup>

Η πυκνότητα του κορεσμένου υγρού υπολογίζεται από τη συσχέτιση:

$$\rho_{ls} = \rho^* + f(1 - T/T^*) + g(1 - T/T^*)^h \quad (3-66)$$

όπου:

$\rho^* = 219 \text{ kgm}^{-3}$  η κρίσιμη πυκνότητα,  $f = 275.32$ ,  $g = 511.58$  και  $h = 0.5$

Ισόθλιπτη διαστολικότητα σε  $\text{K}^{-1}$

Η ισόθλιπτη διαστολικότητα του κορεσμένου υγρού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_{is} = - (1/\rho_{is})(d\rho_{is}/dT) \quad (3-67)$$

ή ισοδύναμα από την:

$$\alpha_{is} = \left[ -f/T^* - gh(1 - T/T^*)^{b-1} (1/T^*) \right] / \rho_{is} \quad (3-68)$$

Αδιαβατική συμπεστικότητα σε  $\text{MPa}^{-1}$

Η αδιαβατική συμπεστικότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k_A = k_{A,m} (1 + \theta b^{-1}) (1 - \theta)^{-1} \quad (3-69)$$

με

$$\theta = (T - T_m) (T^* - T_m)^{-1} \quad (3-70)$$

και

$k_{A,m} = 1.717 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ , η ισοθερμοκρασιακή συμπεστικότητα στο σημείο τήξεως

$b = 3.2682$

Ισοθερμοκρασιακή συμπεστικότητα σε  $\text{MPa}^{-1}$

Η ισοθερμοκρασιακή συμπεστικότητα του κορεσμένου υγρού υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$k_{Tis} = 1000 \cdot \left\{ k_A c_{is} / 1000 + (T/\rho_{is}) \alpha_{is} \left[ \alpha_{is} + k_A (d\rho_{is}/dT) \right] \right\} \times \\ \times \left\{ c_{is} - 1000 \cdot (T/\rho_{is}) (d\rho_{is}/dT) \left[ \alpha_{is} + k_A (d\rho_{is}/dT) \right] \right\}^{-1} \quad (3-71)$$

*Ο παράγων "1000." χρησιμοποιείται ώστε όλοι οι όροι των αθροισμάτων που συγκροτούν την πιό πάνω σχέση να έχουν τις ίδιες μονάδες. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος παράγων απουσιάζει από την πρωτότυπη σχέση για την ισοθερμοκρασιακή συμπεριφορά που δίνουν οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995.*

Συντελεστής θερμικής διαστολής σε K<sup>-1</sup>

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του κορεσμένου υγρού υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$\alpha_{p1s} = \alpha_{1s} + k_{T1s} \gamma_s \quad (3-72)$$

Ενθαλπία σε kJ/kg

Η ενθαλπία του κορεσμένου υγρού υπολογίζεται ως διαφορά από την ενθαλπία του στερεού Νάτριου στη θερμοκρασία των 298.15 K.

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 2000 \text{ K}$$

η ενθαλπία του κορεσμένου υγρού προκύπτει από την ακόλουθη συσχέτιση:

$$\begin{aligned} h_{1s}(T) - h_{1s0}(298.15) = & - 365.77 + 1.6582 T - 4.2375 \times 10^{-4} T^2 + \\ & + 1.4847 \times 10^{-7} T^3 + 2992.6 T^{-1} \end{aligned} \quad (3-73)$$

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$2000 \text{ K} \leq T \leq 2503.7 \text{ K}$$

η ενθαλπία του κορεσμένου υγρού προκύπτει από την ακόλουθη συσχέτιση:

$$\begin{aligned} h_{1s}(T) - h_{1s0}(298.15) = & 2128.4 + 0.86496 T - 196.685 (1 - T/T^*) - \\ & - 2199.3 (1 - T/T^*)^{0.29302} \end{aligned} \quad (3-74)$$

Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό συνθήκες κορεσμού σε kJ/(kgK)

Η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό συνθήκες κορεσμού για το κορεσμένο υγρό υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$c_{1s} = (dh_{1s}/dT) - (dP_s/dT)(1/\rho_{1s}) \quad (3-75)$$

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 2000 \text{ K}$$

$$c_{1s} = 1.6582 - 8.475 \times 10^{-4} T + 4.4541 \times 10^{-7} T^2 - 2992.6 T^{-2} -$$

$$-1000.(-bT^{-2} + cT^{-1}) \exp(a + bT^{-1} + c \ln T)/\rho_{1s} \quad (3-76)$$

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$2000 \text{ K} \leq T \leq 2503.7 \text{ K}$$

$$c_{1s} = 0.86496 + 196.685/T^* + (644.43886/T^*)(1 - T/T^*)^{-0.70698} -$$

$$-1000.(-bT^{-2} + cT^{-1}) \exp(a + bT^{-1} + c \ln T)/\rho_{1s} \quad (3-77)$$

Ο παράγων "1000." χρησιμοποιείται ώστε όλοι οι όροι των αθροισμάτων που συγκροτούν τις δύο πιεσάκια σχέσεις να έχουν τις ίδιες μονάδες. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος παράγων απουσιάζει από τις πρωτότυπες σχέσεις για την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό συνθήκες κορεσμού που δίνουν οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995.

Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση σε kJ/(kgK)

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 2503.7 \text{ K}$$

η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του κορεσμένου υγρού προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$c_{pis} = c_{1s} + 1000. T \alpha_{pis} f_s(1/\rho_{1s}) \quad (3-78)$$

Ο παράγων "1000." χρησιμοποιείται ώστε όλοι οι όροι των αθροισμάτων που συγκροτούν την πιεσάκια σχέση να έχουν τις ίδιες μονάδες. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος παράγων απουσιάζει από την πρωτότυπη σχέση για την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση που δίνουν οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995.

Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σε kJ/(kgK)

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 2503.7 \text{ K}$$

η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο του κορεσμένου υγρού προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$c_{vis} = c_{pis} k_A k_{Tis}^{-1} \quad (3-79)$$

Ταχύτητα του ήχου σε ms<sup>-1</sup>

Η ταχύτητα του ήχου στο κορεσμένο υγρό υπολογίζεται από τις δύο ακόλουθες εξισώσεις:

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 1773 \text{ K}$$

ισχύει:

$$a_{is} = 2660.7 - 0.37667 T - 9.0356 \cdot 10^{-5} T^2 \quad (3-80)$$

Η ταχύτητα του ήχου σε αυτή την περιοχή θερμοκρασιών υπολογίζεται με αβεβαιότητα 1- 1.5%.

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$1773 \text{ K} < T \leq 2503.7 \text{ K}$$

ισχύει:

$$a_{is} = 1000 \cdot (k_{A,PIs})^{-0.5} \quad (3-81)$$

*Ο παράγον "1000." χρησιμοποιείται ώστε η ταχύτητα του ήχου να υπολογίζεται σε ms<sup>-1</sup>. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος παράγον αποσιάζει από την πρωτότυπη σχέση για την ταχύτητα του ήχου που δίνουν οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995.*

Η ταχύτητα του ήχου σε αυτή την περιοχή θερμοκρασιών υπολογίζεται με αβεβαιότητα 10 - 25%.

Εντροπία σε  $\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

Σύμφωνα με τους Fink J.K. και Leibowitz L., 1981 η εντροπία του κορεσμένου υγρού υπολογίζεται από τις ακόλουθες συσχετίσεις:

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 1644.26 \text{ K}$$

ισχύει:

$$s_{1s} = f(T) = -5.90356 + 1.51103 \ln(T) - 5.73462 \cdot 10^{-4} T + 1.57165 \cdot 10^{-7} T^2 - 3425.81 T^{-2} \quad (3-82)$$

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$1644.26 \text{ K} \leq T \leq 2500 \text{ K}$$

$$s_{1s} = f(T_m) + \int_{T_m}^T (c_{1s}/T) dT \quad (3-83)$$

Η αβεβαιότητα στον υπολογισμό της εντροπίας εκτιμάται περί το 0.5% για την περιοχή θερμοκρασιών από το σημείο τήξεως μέχρι τους 1644 K. Για την περιοχή θερμοκρασιών από τους 1644 K μέχρι το κρίσιμο σημείο η εντροπία υπολογίζεται με αβεβαιότητα 20 - 70%.

### 3.5.1.4 Θερμοδυναμικές ιδιότητες του κορεσμένου ατμού.

Πυκνότητα σε  $\text{kgm}^{-3}$

Η πυκνότητα του κορεσμένου ατμού υπολογίζεται από τη συσχέτιση:

$$\rho_{gs} = \left\{ \left[ 393.37 (1 - T/T^*) + 4398.6 (1 - T/T^*)^{0.29302} \right] (T\gamma_s)^{-1} + 1/\rho_{1s} \right\}^{-1} \quad (3-84)$$

Ισόθλιπτη διαστολικότητα σε  $\text{K}^{-1}$

Η ισόθλιπτη διαστολικότητα του κορεσμένου ατμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_{gs} = -(1/\rho_{gs}) (d\rho_{gs}/dT) \quad (3-85)$$

Ισοθερμοκρασιακή συμπεριεστικότητα σε MPa<sup>-1</sup>

Η ισοθερμοκρασιακή συμπεριεστικότητα του κορεσμένου ατμού μπορεί να υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$k_{Tgs} = \alpha_{pgs}/\gamma_v \quad (3-86)$$

Συντελεστής θερμικής διαστολής σε K<sup>-1</sup>

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του κορεσμένου ατμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_{pgs} = \alpha_{gs} [1 - \gamma_v/\gamma_v]^{-1} \quad (3-87)$$

$\gamma_v$  σε MPaK<sup>-1</sup>.

Είναι:

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 1600 \text{ K}$$

$$\gamma_v = (-bT^{-2} + cT^{-1} + d + 2eT) \exp(a + bT^{-1} + c \ln T + dT + eT^2) \quad (3-88)$$

με

$$a = 8.35307, b = -12905.6, c = -0.45824, d = 2.0949 \cdot 10^{-3} \text{ και } e = -5.0786 \cdot 10^{-7}$$

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$1600 \text{ K} \leq T \leq 2500 \text{ K}$$

$$\gamma_v = A + B(T^*-T)^{0.5} + C(T^*-T) \quad (3-89)$$

$$\text{με } A = 4.6893 \cdot 10^{-2}, B = -2.5696 \cdot 10^{-3} \text{ και } C = 3.5628 \cdot 10^{-5}$$

Η πομπάνω σχέση για το  $\gamma_v$  δίνεται από τους Fink J.K και Leibowitz L., 1981 και θεωρείται ορθότερη από τη σχέση για το  $\gamma_v$  που δίνεται από τους Fink J.K και Leibowitz L., 1995, και η οποία έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\gamma_v = A + B(1 - T/T^*)^{0.5} + C(1 - T/T^*) \quad (3-90)$$

Όπως διαπιστώθηκε στο υπολογιστικό μέρος αυτής της Δ.Δ. η χρήση της σχέσης (3-89) για τον υπολογισμό του  $\gamma_v$  οδηγεί σε λάθος αποτελέσματα για τους υπολογισμούς του συντελεστή θερμικής διαστολής  $\beta_{pgs}$ .

Ενθαλπία σε kJ/kg

Η ενθαλπία του κορεσμένου ατμού υπολογίζεται ως διαφορά από την ενθαλπία του στερεού Νατρίου στη θερμοκρασία των 298.15 K.

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

**371 K ≤ T ≤ 2000 K**

η ενθαλπία του κορεσμένου ατμού προκύπτει από την ακόλουθη συσχέτιση:

$$\begin{aligned} h_{gs}(T) - h_{so}(298.15) = & -365.77 + 1.6582 T - 4.2375 \cdot 10^{-4} T^2 + \\ & + 1.4847 \cdot 10^{-7} T^3 + 2992.6 T^{-1} + 393.37(1 - T/T^*) \\ & + 4398.6 (1 - T/T^*)^{0.29302} \end{aligned} \quad (3-91)$$

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

**2000 K ≤ T ≤ 2503.7 K**

η ενθαλπία του κορεσμένου ατμού προκύπτει από την ακόλουθη συσχέτιση:

$$\begin{aligned} h_{gs}(T) - h_{so}(298.15) = & 2128.4 + 0.86496 T + 196.685 (1 - T/T^*) + \\ & + 2199.3 (1 - T/T^*)^{0.29302} \end{aligned} \quad (3-92)$$

Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό συνθήκες κορεσμού σε kJ/(kgK)

Η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό συνθήκες κορεσμού για τον κορεσμένο ατμό υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$c_{gs} = (dh_{gs}/dT) - 1000 \cdot (dPs/dT)(1/\rho_{gs}) \quad (3-93)$$

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

**371 K ≤ T ≤ 2000 K**



$$\begin{aligned} c_{gs} = & 1.6582 - 8.475 \cdot 10^{-4} T + 4.4541 \cdot 10^{-7} T^2 - 2992.6 T^{-2} - 393.37/T^* - \\ & - (1288.877772/T^*)(1 - T/T^*)^{-0.70968} - 1000 \cdot (-bT^{-2} + cT^{-1}) \times \\ & \times \exp(a + bT^{-1} + c \ln T)(1/\rho_{gs}) \end{aligned} \quad (3-94)$$

Για την περιοχή θερμοκρασιών:

$$2000 \text{ K} < T \leq 2503.7 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} c_{gs} = & 0.86496 - 196.685/T^* - (644.43886/T^*)(1 - T/T^*)^{-0.70698} - \\ & - 1000 \cdot (-bT^{-2} + cT^{-1}) \exp(a + bT^{-1} + c \ln T)(1/\rho_{gs}) \end{aligned} \quad (3-95)$$

*Ο παράγων "1000." χρησιμοποιείται ώστε όλοι οι όροι των αθροισμάτων που συγκροτούν τις τρεις πιολάνω σχέσεις να έχουν τις ίδιες μονάδες. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος παράγων αποσιιάζει από τις πρωτότυπες σχέσεις για την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό συνθήκες κορεσμού που δίνουν οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995.*

Ειςιδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση σε kJ/(kgK)

Η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση του κορεσμένου ατμού δίνεται από την εξίσωση:

$$c_{pgs} = c_{gs} + 1000 \cdot T \alpha_{pgs} \gamma_s / \rho_{gs} \quad (3-96)$$

*Ο παράγων "1000." χρησιμοποιείται ώστε όλοι οι όροι των αθροισμάτων που συγκροτούν την πιολάνω σχέση να έχουν τις ίδιες μονάδες. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος παράγων αποσιιάζει από την πρωτότυπη σχέση για την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση που δίνουν οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995.*

Ειςιδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σε kJ/(kgK)

Η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο του κορεσμένου ατμού δίνεται από την εξίσωση:

$$c_{vgs} = c_{pgs} - 1000 \cdot T \alpha_{pgs} \gamma_s / \rho_{gs} \quad (3-97)$$

*Ο παράγων "1000." χρησιμοποιείται ώστε όλοι οι όροι των αθροισμάτων που συγκροτούν την πιπάνω σχέση να έχουν τις ίδιες μονάδες. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος παράγων απορροφάται από την πρωτότυπη σχέση για την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο που δίνουν οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995.*

Εντροπία σε  $\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$

Σύμφωνα με τους Fink J.K. και Leibowitz L., 1981 η εντροπία του κορεσμένου ατμού υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$s_{gs} = s_{ls} + \Delta H_g/T \quad (3-98)$$

όπου  $\Delta H_g$  είναι η θερμότητα ατμοποίησης του Νατρίου όπως αυτή υπολογίζεται από αντίστοιχη συσχέτιση που δίνουν οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995:

$$\Delta H_g = 393.37 (1 - T/T^*) + 4398.6 (1 - T/T^*)^{0.29302} \quad (3-99)$$

### 3.5.1.5 Ιδιότητες μεταφοράς.

Θερμική αγωγιμότητα του υγρού σε  $W/(mK)$

Η θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$  του υγρού Νατρίου δίνεται από την συσχέτιση που προτείνουν οι Cook J.G. και Fritsch G., 1985, η οποία έχει την ακόλουθη πολωνομική μορφή:

$$\lambda = 124.67 - 0.11381T + 5.5226 \cdot 10^{-5} T^2 - 1.1842 \cdot 10^{-8} T^3 \quad (3-100)$$

και μπορεί να χρησιμοποιείται για υπολογισμούς στην περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 2503.7 \text{ K}$$

Η αβεβαιότητα των υπολογισμών κυμαίνεται μεταξύ 5 - 15%.

Δυναμική συνεκτικότητα του υγρού σε Pas

Η δυναμική συνεκτικότητα  $\eta$  του υγρού Νατρίου δίνεται από τη συσχέτιση που προτείνουν οι Shpil'rain E. et al., 1985, ως εξής:

$$\eta = \exp (-6.4406 - 0.3958 \ln T + 556.835T^{-1}) \quad (3-101)$$

και μπορεί να χρησιμοποιείται για υπολογισμούς στην περιοχή θερμοκρασιών:

$$371 \text{ K} \leq T \leq 2503.7 \text{ K}$$

Η αβεβαιότητα των υπολογισμών κυμαίνεται μεταξύ 3 - 10%, για την περιοχή θερμοκρασιών από  $371 \text{ K} \leq T \leq 2000 \text{ K}$ , και μεταξύ 10 -12% για την περιοχή θερμοκρασιών  $2000 \text{ K} \leq T \leq 2503.7 \text{ K}$ .

Επιφανειακή τάση σε  $\text{Nm}^{-1}$

Οι Fink J.K. και Leibowitz L., 1995 προτείνουν να χρησιμοποιείται για την επιφανειακή τάση η ακόλουθη συσχέτιση:

$$\sigma = \sigma_0 (1 - T/T^*)^n \quad (3-102)$$

με  $\sigma_0 = 240.5 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$  και  $n = 1.126$

Η συσχέτιση αυτή προέρχεται από την ανάλυση που έκανε ο Goldman J.H, 1984 βασιζόμενος στα μέχρι τότε διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα και υπολογίζει την επιφανειακή τάση με αβεβαιότητα 11 - 12%.

## Πίνακες του Κεφαλαίου

Πίνακας 3-1: Συντελεστές  $A_{ij}$  της εξίσωσης (3-4).

$i, j$	$A_{ij}$	$i, j$	$A_{ij}$
1, 1	29.492937	10, 3	-733.96848
2, 1	-132.13917	1, 4	-0.1564104
3, 1	274.64632	2, 4	-0.72546108
4, 1	-360.93828	3, 4	-9.2734289
5, 1	342.18431	4, 4	4.3125840
6, 1	-244.50042	9, 4	6.7874983
7, 1	155.18535	10, 4	10.401717
8, 1	5.9728487	1, 5	-6.3972405
9, 1	-410.30848	2, 5	26.409282
10, 1	-416.05860	3, 5	-47.740374
1, 2	-5.1985860	4, 5	56.323130
2, 2	7.7779182	9, 5	186.87317
3, 2	-33.301902	10, 5	645.81880
4, 2	-16.254622	1, 6	-3.9661401
5, 2	-177.31074	2, 6	15.453061
6, 2	127.48742	3, 6	-29.142470
7, 2	137.46153	4, 6	29.568796
8, 2	155.97836	9, 6	79.847970

9, 2	337.31180	10, 6	399.17570
10, 2	-209.88866	1, 7	-0.69048554
1, 3	6.8335354	2, 7	2.7407416
2, 3	-26.149751	3, 7	-5.1028070
3, 3	65.326396	4, 7	3.9636085
4, 3	-26.181978	9, 7	13.041253
9, 3	-137.46618	10, 7	71.531353

**Πίνακας 3-2 :** Συντελεστές  $C_i$  της εξίσωσης (3-5).

$C_1 = 1855.3865$	$C_4 = 46.174$
$C_2 = 3278.642$	$C_5 = -1021.17$
$C_3 = -379.03$	

**Πίνακας 3-3 :** Συντελεστές  $k_i$  της εξίσωσης (3-23).

$k_1 = -7.691234564$	$\times 10^0$	$k_6 = 4.167117320$	$\times 10^0$
$k_2 = -2.608023696$	$\times 10^1$	$k_7 = 2.097506760$	$\times 10^1$
$k_3 = -1.681706546$	$\times 10^2$	$k_8 = 10^9$	
$k_4 = 6.423285504$	$\times 10^1$	$k_9 = 6$	
$k_5 = -1.189646225$	$\times 10^2$		

**Πίνακας 3-4: Συντελεστές  $H_{ij}$  της εξίσωσης (3-34).**

Οι συντελεστές  $H_{ij}$  που δεν δίνονται στον πιο πάνω πίνακα έχουν τιμή 0.

i	j	$H_{ij}$
0	0	0.5132047
1	0	0.3205656
4	0	-0.7782567
5	0	0.1885447
0	1	0.2151778
1	1	0.7317883
2	1	1.241044
3	1	1.476783
0	2	-0.2818107
1	2	-1.070786
2	2	-1.263184
0	3	0.1778064
1	3	0.4605040
2	3	0.2340379
3	3	-0.4924179
0	4	-0.04176610
3	4	0.1600435
1	5	-0.01578386
3	6	-0.003629481

**Πίνακας 3-5: Συντελεστές  $d_i$  και  $C_i$  της εξίσωσης (3-38).**

$d_1 = 0.0701309$	$C_1 = 0.642857$
$d_2 = 0.0118520$	$C_2 = -4.11717$
$d_3 = 0.00169937$	$C_3 = -6.17937$
$d_4 = -1.02$	$C_4 = 0.00308976$
	$C_5 = 0.00822994$
	$C_6 = 10.0932$

**Πίνακας 3-6: Συντελεστές  $A_{ij}$  της εξίσωσης (3-41).**

$i, j$	$A_{ij}$	$i, j$	$A_{ij}$
1, 1	73.13848592	10, 3	-998.64982710
2, 1	285.20415917	1, 4	2.66566642
3, 1	535.71659288	2, 4	-9.19657655
4, 1	-649.81000614	3, 4	15.13096920
5, 1	574.63280680	4, 4	-7.24860975
6, 1	-387.92157774	9, 4	-46.83904320
7, 1	206.34569512	10, 4	227.34793319
8, 1	-79.89428513	1, 5	-6.73408249
9, 1	-996.36169097	2, 5	24.03602093
10, 1	766.27290006	3, 5	-41.08079830
1, 2	24.74108348	4, 5	45.39111005
2, 2	-105.57317181	9, 5	139.21659329
3, 2	200.87302906	10, 5	566.02305152
4, 2	-235.18776440	1, 6	-5.24802962
5, 2	224.56976938	2, 6	18.52690633
6, 2	-40.09924297	3, 6	-31.42397369
7, 2	128.77154771	4, 6	26.43208802
8, 2	-28.40907978	9, 6	96.31411481
9, 2	-1389.08003142	10, 6	453.20280933

10, 2	1672.09705556	1, 7	-1.17583447
1, 3	11.64775625	2, 7	4.13816432
2, 3	-42.51820251	3, 7	-6.55842224
3, 3	72.45541064	4, 7	4.75774631
4, 3	-82.55391089	9, 7	19.39184297
9, 3	-267.85482520	10, 7	103.56819758

**Πίνακας 3-7: Συντελεστές  $C_i$  της εξίσωσης (3-42).**

$C_1 = 1866.73$	$C_5 = 100.1333$
$C_2 = 4661.9$	$C_6 = -13.135$
$C_3 = 64.605$	$C_7 = 0.32684$
$C_4 = -284.8833$	$C_8 = -1211.253$

**Πίνακας 3-8: Συντελεστές  $A_{ij}$  της εξίσωσης (3-50).**

$i$	$j$	$A_{ij}$	$i$	$j$	$A_{ij}$
0	0	0.4864192	3	0	0.8716056
0	1	0.3509007	3	1	1.353448
0	2	-0.2847572	3	2	0.0
0	3	0.07013759	3	3	-0.4857462
0	4	0.01641220	3	4	0.1607171
0	5	-0.01163815	3	5	0.0
0	6	0.0	3	6	-0.003886659
1	0	-0.2448372	4	0	-1.051126
1	1	1.315436	4	1	0.0



1 2	-1.037026	4 2	0.0
1 3	0.4660127	4 3	0.0
1 4	-0.02884911	4 4	0.0
1 5	-0.008239587	4 5	0.0
1 6	0.0	4 6	0.0
2 0	-0.8702035	5 0	0.3458395
2 1	1.297752	5 1	0.0
2 2	-1.287846	5 2	-0.02148229
2 3	0.2292075	5 3	0.0
2 4	0.0	5 4	-0.009603846
2 5	0.0	5 5	0.004559914
2 6	0.0	5 6	0.0

**Πίνακας 3-9:** Συντελεστές για τις εξισώσεις (3-52) έως και (3-60).

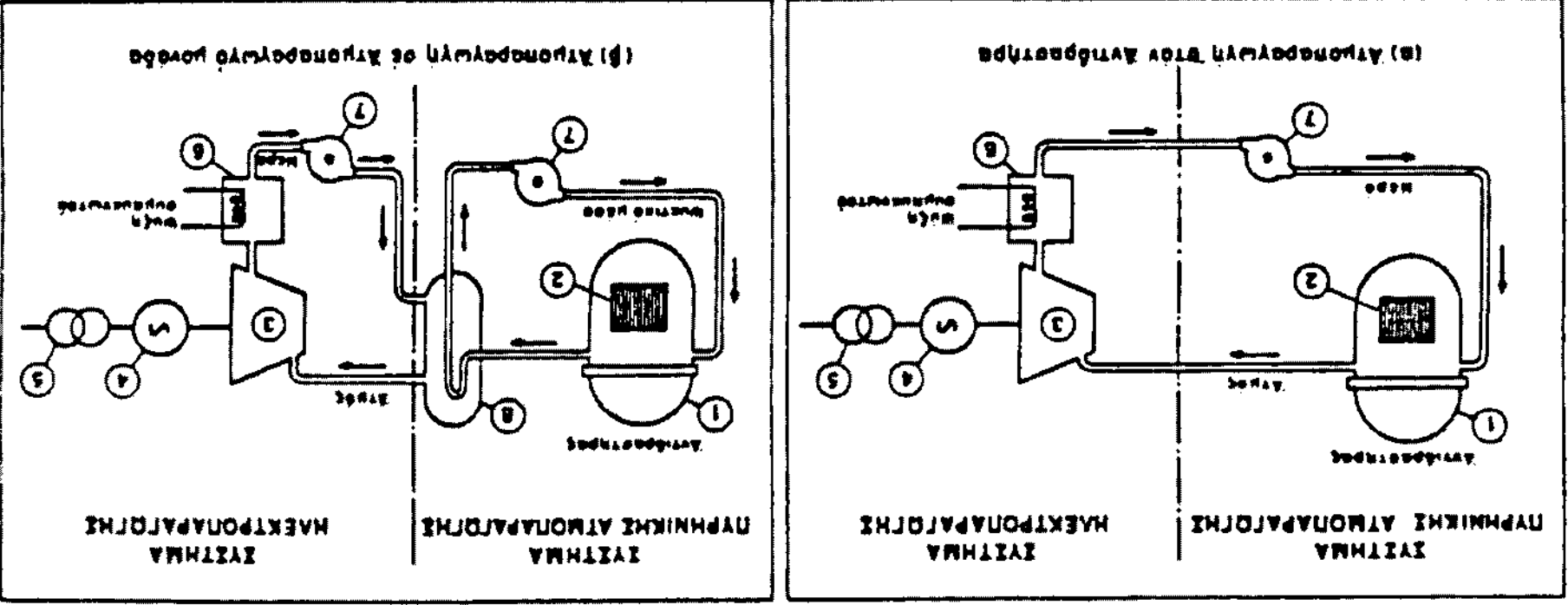
$\Lambda$	$= 0.742128 \times 10^{-3}$	$W/(mK)$
$A_0$	$= 1.00000$	$C_1 = 0.354296 \times 10^5$
$A_1$	$= 37.32223$	$C_2 = 0.500000 \times 10^{10}$
$A_2$	$= 22.5485$	
$A_3$	$= 13.0465$	$C_{T1} = 0.144847$
$A_4$	$= 0.0$	$C_{T2} = -5.64493$
$A_5$	$= -2.60735$	$C_{R1} = -2.80000$
$B_e$	$= -2.50600$	$C_{R2} = -0.080738543$
$B_0$	$= -167.310$	$C_{R3} = -17.9430$
$B_1$	$= 483.656$	
$B_2$	$= -191.039$	$\rho_{r1} = 0.125698$

$$B_3 = 73.0358$$

$$B_4 = -7.57467$$

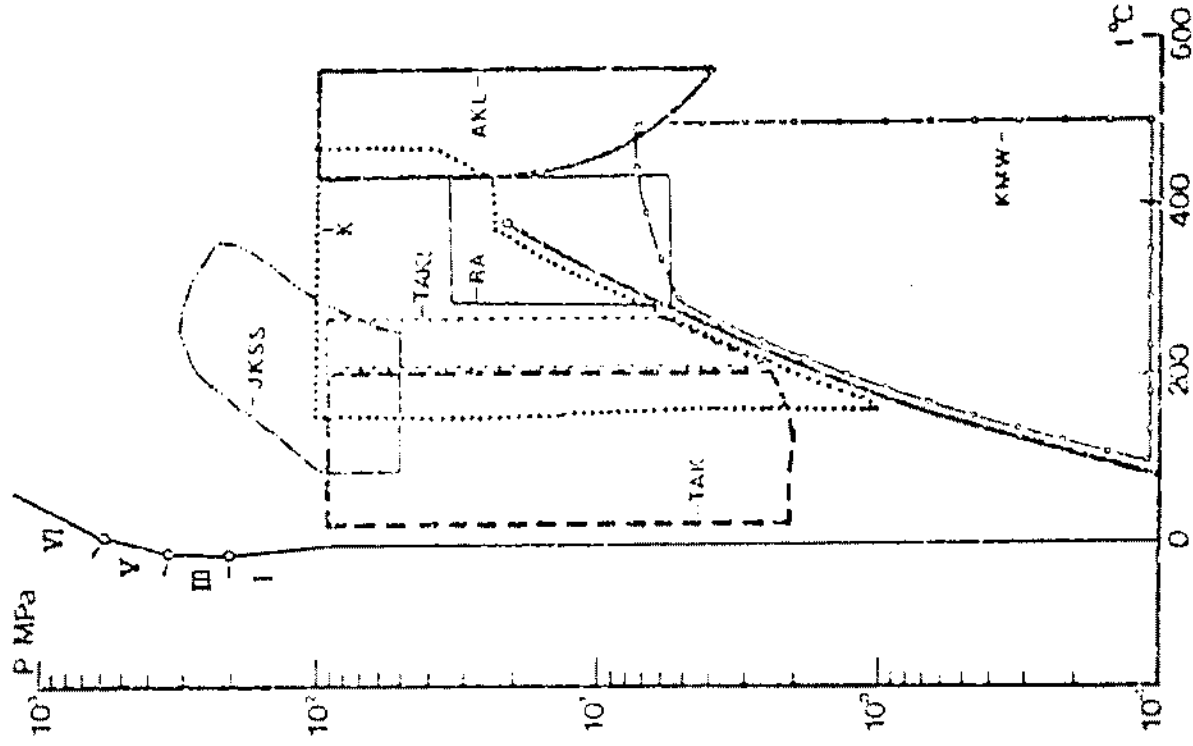
$$D_1 = -741.112$$

### Διαγράμματα του Κεφαλαίου



- 1. Δοχείο Πίεσης
  - 2. Πυρήνας του Αεθραστήρα
  - 3. Τροβιάς
  - 4. Έναρτηρα
  - 5. Μετασηματιστής Ανυψώσεως της Πάσης
  - 6. Σχηματιστής
  - 7. Αεραία
  - 8. Μορδα Απορροφώσης
2. Πυρήνας του Αεθραστήρα - Πυρήνας Καύσης - Ροβόι Ρυθίσεως κ.λπ.)

Διάγραμμα 3-1 : Βασική συγκρότηση Πυρήνολεκτρικού Σταθμού Παραγωγής



Διάγραμμα 3-2 : Κοριότερες πηγές δεδομένων ΡνΤ για το βαρύ ύδωρ.

TAK: Tsederberg et al., 1972

TAKL: Tsederberg et al., 1973

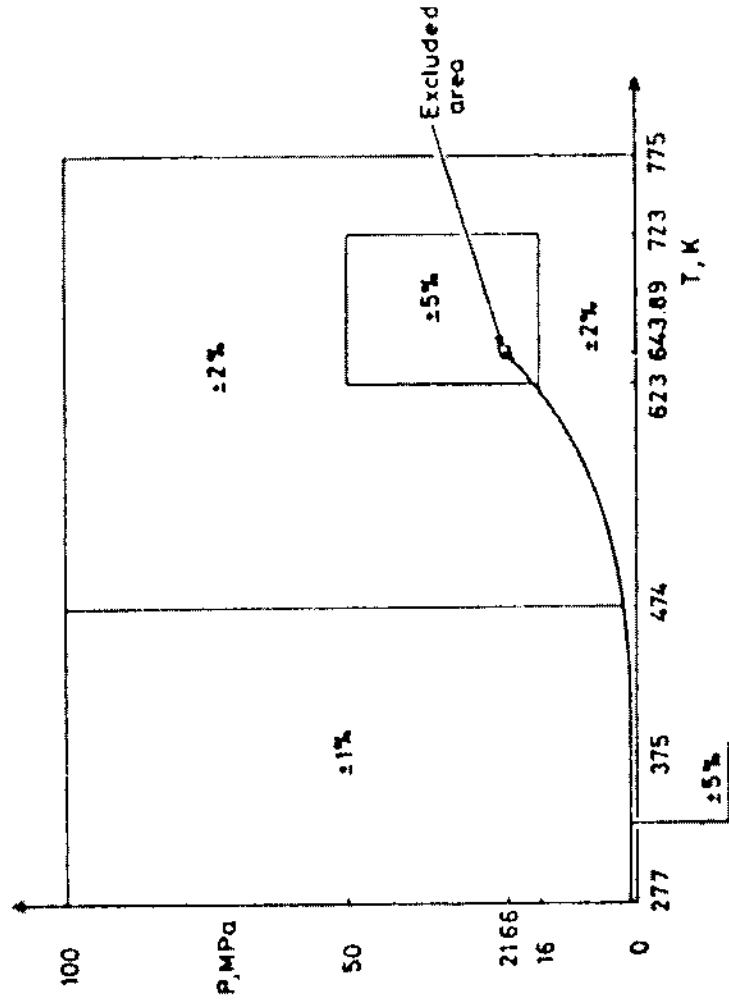
JKSS: Juza et al., 1966

K: Kell et al., 1979

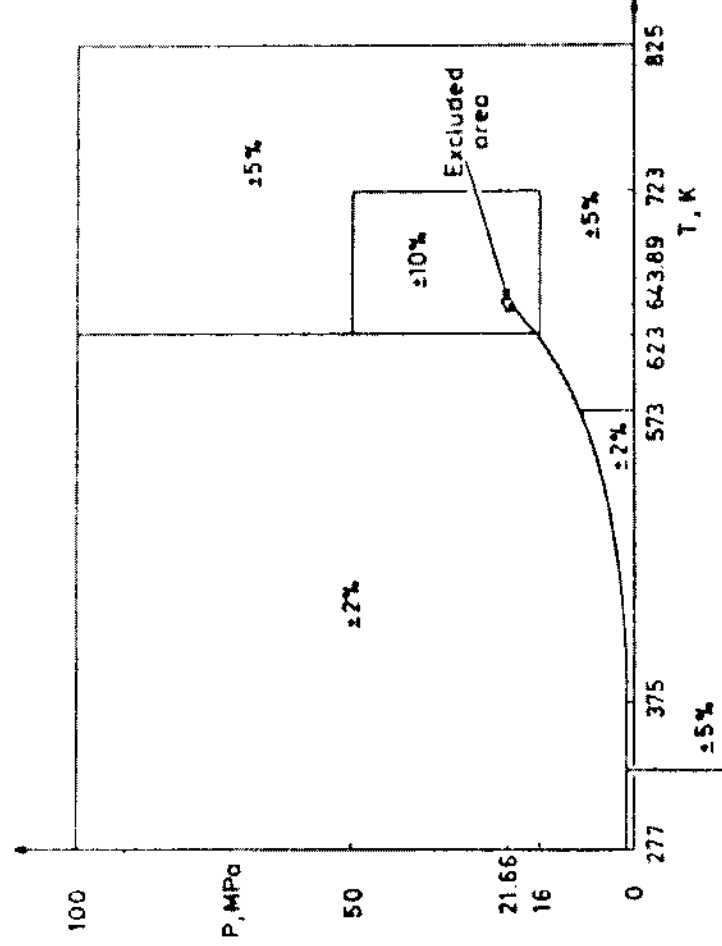
RA: Rivkin and Ahkundov et al., 1962

AKL: Alexandrov A.A., 1976

KMW: Kell et al., 1968



Διάγραμμα 3-3 : Αβεβαιότητα της συσχέτισης για τη δυναμική συνεκτικότητα του βαρέος ύδατος.



Διάγραμμα 3-4 : Αβεβαιότητα της συσχέτισης για τη θερμική αγωγιμότητα του βαρέος ύδατος.

## 4. ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΛΑΦΡΟΥ ΥΔΑΤΟΣ

### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

4. ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΛΑΦΡΟΥ ΥΔΑΤΟΣ.....	4-i
4.1 Εισαγωγή.....	4-1
4.2 Το πρόβλημα του αριθμητικού υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος.....	4-4
4.2.1 Οι απόλυτα απαραίτητες σχέσεις.....	4-5
4.2.2 Άλλες δευτερεύουσες αλλά αναγκαίες σχέσεις.....	4-6
4.3 Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες.....	4-11
4.4 Το πρόβλημα του υπολογισμού της πυκνότητας.....	4-13
4.4.1 Γενικά.....	4-13
4.4.2 Προτεινόμενες αριθμητικές μέθοδοι.....	4-14
4.4.2.1 Μέθοδος Newton – Raphson.....	4-15
4.4.2.2 Μέθοδος Newton – Raphson.....	4-16
4.4.3 Ακολουθούμενη αριθμητική μέθοδος.....	4-17
4.4.4 Μέθοδος για τον προσδιορισμό της αρχικής προσέγγισης της πυκνότητας.....	4-18
4.4.4.1 Υπολογισμός της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος σύμφωνα με την διατύπωση IFC-1967.....	4-20
4.4.4.2 Δυσκολίες στον υπολογισμό της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος σύμφωνα με την διατύπωση IFC-1967.....	4-24
4.5 Υπολογισμός της θερμοκρασίας κορεσμού.....	4-27
4.6 Ο αριθμητικός κώδικας LIGHT_WASP.....	4-29
4.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά του κώδικα.....	4-31
4.6.2 Οδηγίες χρήσεως του κώδικα.....	4-33
4.6.3 Αντιμετώπιση λαθών (troubleshooting).....	4-36
4.7 Τα υποπρογράμματα του κώδικα.....	4-37
4.7.1 Υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου.....	4-37
4.7.1.1 Υπορουτίνα LIGHT_WASP(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS).....	4-37
4.7.1.2 Υπορουτίνα CHECKPT(TS,JR,IS).....	4-38

4.7.1.3	Συνάρτηση FPS(TS).....	4-38
4.7.1.4	Συνάρτηση PRL(TR).....	4-38
4.7.2	Υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού.....	4-39
4.7.2.1	Συνάρτηση FTS(PP).....	4-39
4.7.2.2	Συνάρτηση DFPS(TS).....	4-39
4.7.3	Υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου.....	4-39
4.7.3.1	Υπορουτίνα DENSF(DF).....	4-40
4.7.3.2	Υπορουτίνα DENS(DG).....	4-40
4.7.3.3	Υπορουτίνα SVLWL(DL).....	4-40
4.7.3.4	Συνάρτηση FPR4(X4).....	4-40
4.7.3.5	Συνάρτηση DFPR4(X4).....	4-41
4.7.3.6	Υπορουτίνα SVLWV(DV).....	4-41
4.7.3.7	Συνάρτηση FPR3(X3).....	4-41
4.7.3.8	Συνάρτηση DFPR3(X3).....	4-41
4.7.3.9	Συνάρτηση FP(DD).....	4-41
4.7.3.10	Συνάρτηση DFDP(DD).....	4-42
4.7.3.11	Υπορουτίνα QMUST.....	4-42
4.7.4	Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.....	4-42
4.7.4.1	Υπορουτίνα TOTAL(JP,U,H,S,B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4, CP,CV,IBM,JTC,GAMMA,A,MU,K,PRANDTL,SIGMA).....	4-42
4.7.4.2	Υπορουτίνα ENERGY(U).....	4-43
4.7.4.3	Υπορουτίνα ENTHALPY(H).....	4-43
4.7.4.4	Υπορουτίνα ENTROPY(S).....	4-43
4.7.4.5	Υπορουτίνα SHP(CP).....	4-43
4.7.4.6	Υπορουτίνα SHV(CV).....	4-43
4.7.4.7	Υπορουτίνα SHR_SOVE(GAMMA,A).....	4-43
4.7.4.8	Υπορουτίνα IBM_JTC(IBM,JTC).....	4-44
4.7.5	Υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς.....	4-44
4.7.5.1	Υπορουτίνα VISCOSITY(MU).....	4-44
4.7.5.2	Υπορουτίνα CONDUCTIVE(K).....	4-44
4.7.5.3	Υπορουτίνα TENSION(SIGMA).....	4-44
4.7.6	Υποπρογράμματα μαθηματικών υπολογισμών.....	4-44
4.7.6.1	Υπορουτίνα SOLVE(F,DF,EPS,NDEC,X,ITMAX,IER).....	4-44
4.7.7	Άλλα επικουρικά υποπρογράμματα.....	4-45
4.7.7.1	Υποπρόγραμμα δεδομένων CONSTANTS.....	4-45

4.7.7.2	Κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE και συγκριτικά αποτελέσματα.....	4-45
4.8	Λειτουργία του κώδικα LIGHT_WASP.....	4-46
4.9	Μορφολογικά χαρακτηριστικά των υποπρογραμμάτων του κώδικα. ....	4-54
4.9.1	Βαθμός αλληλεξάρτησης των υποπρογραμμάτων.....	4-54
4.9.2	Ανεξάρτητα υποπρογράμματα. ....	4-56
4.9.3	Μετρίως εξηρητημένα υποπρογράμματα.....	4-57
4.9.4	Πλήρως εξηρητημένα υποπρογράμματα.....	4-58
4.10	Η δομική ευελιξία του κώδικα.....	4-58





# ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΛΑΦΡΟΥ ΥΔΑΤΟΣ

### 4.1 Εισαγωγή.

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά ο κώδικας ηλεκτρονικού υπολογιστή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος. Στα πλαίσια του αναπτυχθέντος κώδικα οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ε.υ. υπολογίζονται για δεδομένη πίεση P και θερμοκρασία T, πράγμα που ειδικά εξυπηρετεί σε προβλήματα Θερμοϋδραυλικής Ανάλυσης Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος. Αρχικά αναφέρονται συνοπτικά οι σχέσεις εκείνες που θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες, και ακριβείς για τη σύνταξη του κώδικα, και οι οποίες παρουσιάσθηκαν ήδη στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Στη συνέχεια διατυπώνεται η κοινή περιοχή ισχύος όλων των χρησιμοποιούμενων σχέσεων. Κατ' ακολουθία αυτή θεωρείται και η περιοχή ισχύος του κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος. Σημαντικό μέρος του Κεφαλαίου καταλαμβάνει ακολούθως η διεξοδική ανάπτυξη του πρωτεύοντος προβλήματος του υπολογισμού της πυκνότητας δεδομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας από την πεπλεγμένη ως προς την πυκνότητα καταστατική εξίσωση του ε.υ. που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί. Καλύπτεται επιπλέον και το πρόβλημα του ακριβούς υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού, αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού, από την πεπλεγμένη ως προς τη θερμοκρασία εξίσωση κορεσμού. Τέλος ειδικές παράγραφοι αφιερώνονται στην διεξοδική και λεπτομερή περιγραφή του κώδικα.

Ο κώδικας συντάχθηκε σε γλώσσα FORTRAN 77, κάτω από το Λειτουργικό Σύστημα UNIX HP-UX 7.05 B, το οποίο υποστηρίζεται από τον super-mini H/Y του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας HP 9000/380. Για τη συγκρότηση του κώδικα ακολουθήθηκαν αρχές δομημένου προγραμματισμού, προκειμένου να εξασφαλίζεται α) ευκολία στη χρήση, β) ευκολία στην τροποποίηση γ) ευκολία στη μετατροπή του κώδικα προκειμένου να μπορεί να εφαρμόζεται για άλλη έκδοση της γλώσσας

FORTAN ή/και για άλλο λειτουργικό σύστημα ή/και σε άλλο τύπου ηλεκτρονικό υπολογιστή, και τέλος δ) συμβατότητα στον τρόπο ανάπτυξης και στον τρόπο λειτουργίας με τον αντίστοιχο κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέως ύδατος, τα χαρακτηριστικά του οποίου θα παρουσιασθούν στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Σημειώνεται ότι αντίστοιχοι εμπορικοί κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος είναι σήμερα διαθέσιμοι στην αγορά. Για παράδειγμα αναφέρονται οι κώδικες της εταιρείας λογισμικού *Chemicalogic*<sup>1</sup> και οι κώδικες της εταιρείας λογισμικού *Techware Engineering Applications Inc.*<sup>2</sup>, οι οποίοι προσφέρονται σε τιμές που κυμαίνονται από περίπου 200 USD έως περίπου 500 USD για μεμονωμένους χρήστες (single user). Το κόστος αυτών των κωδικών κλιμακώνεται προς τα άνω ανάλογα με το πλήθος των χρηστών που είναι δυνατό να τους χρησιμοποιεί ταυτόχρονα μέσα από ένα δίκτυο ηλεκτρονικών υπολογιστών (network users) και φθάνει περί τα 13000 USD σε περίπτωση που ο κώδικας είναι διαθέσιμος μέσω του Internet (WWW site implementation), σε όσους επιθυμούν να τον χρησιμοποιήσουν. Επιπλέον, σημειώνεται ότι πέρα από τους εμπορικά διαθέσιμους κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, υπάρχουν και κώδικες οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στο κοινό είτε δωρεάν, είτε με πολύ μικρό κόστος. Η διάθεσή τους γίνεται κυρίως μέσω του Internet<sup>3</sup>. Οι περισσότεροι από τους κώδικες αυτούς είναι κατασκευασμένοι για να εργάζονται σε τύπου IBM συμβατούς προσωπικούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές (IBM compatible PC).

Παρόλαυτά αυτοί οι διαθέσιμοι κώδικες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους σκοπούς της Διδακτορικής Διατριβής, κυρίως διότι δεν έχουν τις δυνατότητες να υπολογίζουν όλες τις θερμοφυσικές ιδιότητες που είναι αναγκαίες για τους υπολογισμούς θερμοδυναμικής ανάλυσης των ΠΑΙ. Επιπλέον οι κώδικες αυτοί δεν διατίθενται συνήθως σε πηγαίο κώδικα (source code), πράγμα που σημαίνει ότι ο χρήστης α) δεν έχει τη δυνατότητα να κάνει τροποποιήσεις που θα τον διευκολύνουν για την επίλυση προβλημάτων θερμοδυναμικής ανάλυσης στους ΠΑΙ και β) δεν έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει τους κώδικες προκειμένου αυτοί να παρέχουν αποτελέσματα όταν τρέχουν κάτω από άλλο λειτουργικό σύστημα ή/και σε

---

<sup>1</sup> <http://www.chemicalogic.com/>

<sup>2</sup> <http://www.techwareeng.com/>

<sup>3</sup> <http://www.mecheng.asme.org/database/THERMO/>

ηλεκτρονικό υπολογιστή διαφορετικού τύπου, από το λειτουργικό σύστημα και τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον οποίο σχεδιάσθηκαν.

Υπάρχουν βέβαια εξαιρέσεις κώδικων, που δημιουργήθηκαν στο διάστημα 1970 - 1985, οι οποίοι διατίθενται και σε πηγαίο κώδικα, είτε σε ηλεκτρονική μορφή, είτε σε μορφή εκτυλώσεων. Ενδεικτικά αναφέρονται ο κώδικας των Hendricks R.C. et al., 1973, ο κώδικας των Haag L. et al., 1984, και όσοι κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος συμπεριλαμβάνονται στη σχετική βάση δεδομένων του ΟΟΣΑ<sup>4</sup>. Αυτοί οι κώδικες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τους σκοπούς της Διδακτορικής Διατριβής, πλην όμως, οι περισσότεροι, παρουσιάζουν όλα ή μερικά από τα εξής ειδικά μειονεκτήματα: α) δεν υπολογίζουν όλες τις αναγκαίες θερμοφυσικές ιδιότητες, β) έχουν συνταχθεί σε παλαιές εκδόσεις της γλώσσας FORTRAN και γ) δεν χρησιμοποιούν σύγχρονες εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες.

Επιστημαίνεται ότι κανένας από τους διαθέσιμους κώδικες δεν έχει την κατάλληλη μορφή ώστε να συνεργάζεται με την υλοποίηση σε κώδικα των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος<sup>5</sup>, οι οποίες και παρουσιάσθηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Η συμβατότητα στον τρόπο ανάπτυξης και λειτουργίας ενός κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος και ενός κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος (βλέπε και το επόμενο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο) είναι απαραίτητη προϋπόθεση στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ, προκειμένου να είναι δυνατό να επιτευχθεί η σύγκριση της θερμοϋδραυλικής συμπεριφοράς των δύο αυτών ψυκτικών. Εξάιρεση αποτελεί ο κώδικας των Hendricks R.C. et al., 1973, στον οποίο υλοποιούνται αρκετές από τις εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, που επίσης παρουσιάσθηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, με τρόπο παρόμοιο με εκείνο που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος. Πρέπει να σημειωθεί ότι διατίθεται και ο κώδικας για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος του Φωτιάδη Γ., 1982, ο οποίος αναπτύχθηκε στα πλαίσια Διπλωματικής Εργασίας στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Ο κώδικας αυτός αναπαράγει τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος με ακριβή τρόπο βασιζόμενος στη διατύπωση IFC-1967.

---

<sup>4</sup> <http://www.nea.fr/html/dbprog/>

<sup>5</sup> Βλέπε και 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Όλα τα υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης  $\Delta\Delta$  παρατίθενται στο Παράρτημα Ι του παρόντος.

## 4.2 Το πρόβλημα του αριθμητικού υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος.

Με βάση τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύχθηκε, στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής, κώδικας για τον αριθμητικό υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος. Ο κώδικας ονομάστηκε **LIGHT\_WASP (LIGHT Water And Steam Properties)** και κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετεί πολύπλοκους υπολογισμούς που αφορούν στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος, οι οποίοι εργάζονται με ελαφρύ ύδωρ. Ο κώδικας αυτός δέχεται σαν είσοδο την πίεση σε bar και την θερμοκρασία σε μονάδες K. Στην περίπτωση που ζητείται να υπολογισθούν ιδιότητες για μία κατάσταση κορεσμού αρκεί ο κώδικας να δεχθεί ως είσοδο μόνο την πίεση ή μόνο τη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα που παρέχει ο κώδικας είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν ένα μέρος ή και το σύνολο των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων μεταφοράς του ελαφρού ύδατος ανάλογα με τις ανάγκες και τις επιλογές του χρήστη.

Τέσσερα είναι τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν προκειμένου για την υλοποίηση των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος στον κώδικα **LIGHT\_WASP**, στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής:

1. Οι συσχετίσεις και γενικά οι εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες, που παρουσιάστηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, δεν είναι αρκετές για να συγκροτήσουν τον κώδικα που ζητείται. Αυτό συμβαίνει διότι οι σχέσεις αυτές περιλαμβάνουν και όρους παραγώγων των οποίων η αναλυτική μορφή είναι άγνωστη και ως εκ τούτου πρέπει να υπολογισθεί. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό οι άγνωστες παράγωγοι πρέπει να προσεγγισθούν με αριθμητικό τρόπο.
2. Πρέπει να διατυπωθεί η κοινή περιοχή ισχύος πιέσεων και θερμοκρασιών, όλων των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, η οποία κατ'

ακολουθία είναι η περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών για την οποία ισχύει ο κώδικας.

3. Τόσο η καταστατική εξίσωση όσο και σχεδόν όλες οι εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, οι οποίες χρησιμοποιούνται στον κώδικα δέχονται ως είσοδο την θερμοκρασία  $T$  και την πυκνότητα  $\rho$ . Στα προβλήματα όμως θερμοϋδραυλικής ανάλυσης των ΠΑΙ εξυπηρετεί όταν οι θερμοφυσικές ιδιότητες υπολογίζονται σε συνάρτηση με την πίεση  $P$  και τη θερμοκρασία  $T$ . Προκύπτει λοιπόν πρόβλημα αριθμητικής επίλυσης της χρησιμοποιούμενης καταστατικής εξίσωσης<sup>6</sup> της μορφής  $P = P(\rho, T)$  για το ελαφρύ ύδωρ, ως προς την πυκνότητα  $\rho$ , δεδομένης της πίεσης  $P$  και της θερμοκρασίας  $T$  προκειμένου να καταστεί δυνατόν να υπολογίζονται οι υπόλοιπες θερμοφυσικές ιδιότητες.

4. Στην περίπτωση που ζητείται να υπολογισθούν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος στην κατάσταση κορεσμού και το μόνο σχετικό δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού  $P_s$ , τότε πρέπει να επιλυθεί η εξίσωση κορεσμού<sup>7</sup>  $P_s = P_s(T_s)$ , ως προς τη θερμοκρασία κορεσμού  $T_s$ , προκειμένου να υπολογισθεί ακριβώς το ζεύγος πίεσης και θερμοκρασίας για το οποίο πρέπει να γίνουν οι υπολογισμοί των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος από τον κώδικα.

#### **4.2.1 Οι απόλυτα απαραίτητες σχέσεις.**

Στην παρουσίαση που έγινε στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο επισημάνθηκαν οι καταλληλότερες σχέσεις και συσχετίσεις που επελέγησαν να χρησιμοποιηθούν στο υπολογιστικό μέρος αυτής της Διδακτορικής Διατριβής σε ό,τι αφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος. Οι σχέσεις αυτές ορίζονται ως οι **απόλυτα απαραίτητες σχέσεις** για την κατασκευή του κώδικα, και εννοείται ότι χωρίς αυτές δεν μπορεί να γίνει δυνατή η ανάπτυξή του. Συγκεκριμένα στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν σχέσεις για τις ακόλουθες θερμοφυσικές ιδιότητες (§§ 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4 και 3.3.5–αριθμημένες σχέσεις):

- ελεύθερη εσωτερική ενέργεια  $\psi$  σε kJ/kg
- ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς  $\psi_0$  σε kJ/kg

---

<sup>6</sup> Εξίσωση (3-3), § 3.3.2.

<sup>7</sup> Εξίσωση (3-23) § 3.3.3.

- πίεση  $P$  σε MPa
- πίεση κορεσμού  $P_s = P_s(T_s)$  σε MPa (συνάρτηση της θερμοκρασίας κορεσμού)
- ειδική εσωτερική ενέργεια  $u$  σε kJ/kg
- ειδική εντροπία  $s$  σε kJ/(kgK)
- ειδική ενθαλπία  $h$  σε kJ/kg
- ειδική θερμοχωρητικότητα  $c_p$  σε kJ/(kgK)
- ειδική θερμοχωρητικότητα  $c_v$  σε kJ/(kgK)
- συντελεστής ισεντροπικής μεταβολής  $\gamma$
- συντελεστής Joule-Thomson  $\mu$  σε K/MPa
- ισοθερμοκρασιακή συμπιεστικότητα  $\kappa_T$  σε MPa<sup>-1</sup>
- ταχύτητα του ήχου  $a$  σε m/s
- δυναμική συνεκτικότητα  $\eta$  σε Pas
- θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$  σε W/(mK)
- επιφανειακή τάση  $\sigma$  σε N/m

#### 4.2.2 Άλλες δευτερεύουσες αλλά αναγκαίες σχέσεις.

Οι απόλυτα απαραίτητες σχέσεις περιλαμβάνουν και όρους παραγώγων για τις οποίες πρέπει να βρεθεί τρόπος υπολογισμού. Το σύνολο αυτών των άγνωστων όρων οι οποίοι είναι αναγκαίοι στους υπολογισμούς<sup>8</sup> έχουν ως εξής:

$$(\partial Q/\partial p)_T, d(\psi_0 T)/dT, (\partial Q/\partial T)_p, d\psi_0/dT, (\partial h/\partial T)_p, (\partial h/\partial T)_T, (\partial P/\partial T)_p, (\partial P/\partial p)_T \text{ και } (\partial u/\partial T)_p$$

Για τον υπολογισμό των αγνώστων αυτών παραγώγων μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε αριθμητικές μέθοδοι, είτε να καταβληθεί προσπάθεια ώστε να διατυπωθούν κλειστές μορφές εξισώσεων με βάση τις εξισώσεις για τις ποσότητες  $Q$ ,  $\psi_0$ ,  $h$ ,  $P$  και  $u$ . Η χρήση αριθμητικών μεθόδων προϋποθέτει κόστος προγραμματιστικής προσπάθειας και χρόνου ηλεκτρονικού υπολογιστή, πράγμα που δεν εξυπηρετεί την ταχύτητα των υπολογισμών. Οι κλειστές μορφές εξισώσεων για τον υπολογισμό αυτών των παραγώγων συνεπάγονται πολύπλοκες διατυπώσεις δεδομένου του συνθέτου των εξισώσεων για το διπλό άθροισμα<sup>9</sup>  $Q$ , για την ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς  $\psi_0$ , για την ενθαλπία  $h$  και τέλος για την πίεση  $P$  και

<sup>8</sup> Βλέπε και §§ 3.3.2, 3.3.3 και 3.3.4.

<sup>9</sup> Σχέση (3-4) στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

την εσωτερική ενέργεια υ. Στα πλαίσια της παρούσης  $\Delta\Delta$  οι διατυπώσεις αυτές προτιμώνται έναντι των αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού, διότι όχι μόνο εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ταχύτητα υπολογισμών αλλά απαλλάσσουν και το συντάκτη του κώδικα από αναγκάιους ενδεδειγμένους ελέγχους της ποιότητας της παραγωγής. Οι διατυπώσεις αυτές για τις άγνωστες παραγώγους ονομάζονται **δευτερεύουσες αλλά αναγκάιες σχέσεις**.

Έχοντας υπόψη τις πρωτότυπες εξισώσεις για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες<sup>10</sup> προκύπτει:

$$(\partial P/\partial \rho)_\tau = (1000R/\tau) \left[ 1 + 2\rho Q + 4\rho^2(\partial Q/\partial \rho)_\tau + \rho^3(\partial^2 Q/\partial \rho^2)_\tau \right] \quad (4-1)$$

$$(\partial P/\partial \tau)_\rho = (-1000/\tau^2)\rho R \left[ 1 + \rho Q + \rho^2(\partial Q/\partial \rho)_\tau \right] + (1000/\tau^2) \times \\ \times R\rho\tau \left\{ \rho \left[ \rho(\partial^2 Q/\partial \tau \partial \rho) + (\partial Q/\partial \tau)_\rho \right] \right\} \quad (4-2)$$

Φανερό είναι εξάλλου ότι:

$$(\partial P/\partial \tau)_\rho = -(\partial P/\partial \tau)_\rho (\tau^2/1000) \quad (4-3)$$

αφού  $\tau = 1000/\Gamma$

Λόγως:

$$(\partial h/\partial \tau)_\rho = -T(d^2\psi_o/d\Gamma^2) + R \left\{ 1 + \rho Q + \rho^2(\partial Q/\partial \rho)_\tau - \tau\rho(\partial Q/\partial \tau)_\rho - \right. \\ \left. - \tau\rho^2 \left[ \partial^2 Q/(\partial \tau \partial \rho) \right] - \rho\tau^2(\partial Q/\partial \tau^2)_\rho \right\} \quad (4-4)$$

$$(\partial h/\partial \rho)_\tau = (1000R/\tau) \left\{ Q + \tau \left[ (\partial Q/\partial \tau)_\rho + \rho \partial^2 Q/(\partial \rho \partial \tau) \right] + \right. \\ \left. + \rho \left[ 3(\partial Q/\partial \rho)_\tau + \rho(\partial^2 Q/\partial \rho^2)_\tau \right] \right\} \quad (4-5)$$

---

<sup>10</sup> Βλέπε και §§ 3.3.2, 3.3.3 και 3.3.4.



Επίσης:

$$(\partial u / \partial T)_p = - \left[ R p \tau^2 (\partial^2 Q / \partial \tau^2)_p + T (d^2 \psi_0 / dT^2) \right] \quad (4-6)$$

Το συμπέρασμα της παραπάνω ανάλυσεως είναι ότι τελικά οι απαραίτητοι για τους υπολογισμούς άγνωστοι όροι των εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες μειώνονται σημαντικά σε αριθμό και πολυπλοκότητα. Συνοπτικά είναι οι ακόλουθοι:

**α. Παράγωγοι της ποσότητας  $\psi_0$**

[ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς σε kJ/kg, σχέση (3-5)]

$$d\psi_0/dT, d(\psi_0\tau)/d\tau \text{ και } d^2\psi_0/dT^2$$

**β. Παράγωγοι του διπλού αθροίσματος  $Q$**

[κύρια συνάρτηση αναδρομής για την προσρμογή στα πειραματικά δεδομένα για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες, σχέση (3-4)]

$$(\partial Q / \partial \tau)_p, (\partial Q / \partial p)_\tau, (\partial^2 Q / \partial \tau^2)_p, (\partial^2 Q / \partial p^2)_\tau \text{ και } \partial^2 Q / (\partial \tau \partial p)$$

Είναι φανερό ότι υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού "κλειστών" μορφών εξισώσεων που να δίνουν τις προς υπολογισμό παραγώγους χάρη στην πολυωνυμική μορφή που έχουν στο μεγαλύτερο μέρος τους οι αναλυτικές σχέσεις για τις ποσότητες  $Q$  και  $\psi$ .

Για τις παραγώγους της ποσότητας  $Q$  οι Hendricks R.C. et al., 1973 παρέχουν τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} (\partial Q / \partial \tau)_p = & \left\{ \sum_{j=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \left[ \sum_{i=1}^8 A_{ij}(\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \exp(-E\rho)(A_{9j} + A_{10j}\rho) \right] \right\} + \\ & + (\tau - \tau_c) \left\{ \sum_{j=3}^7 (j-2)(\tau - \tau_{aj})^{j-3} \left[ \sum_{i=1}^8 A_{ij}(\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \exp(-E\rho)(A_{9j} + A_{10j}\rho) \right] \right\} \quad (4-7) \end{aligned}$$

$$(\partial Q / \partial p)_\tau = \sum_{i=1}^8 (i-1)A_{i1}(\rho - \rho_{a1})^{i-2} + \exp(-E\rho) \left[ -E(A_{9,1} + A_{10,1}\rho) + A_{10,1} \right] +$$

$i=2$

$$\begin{aligned}
 & + (\tau - \tau_c) \left\{ \sum_{j=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \left[ \sum_{i=2}^8 (i-1) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \exp(-E\rho) (-A_{9j} + A_{10j}\rho) E + A_{10j} \right] \right\} \quad (4-8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \partial^2 Q / (\partial\rho\partial\tau) = & \sum_{i=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{i-2} \left[ \sum_{i=2}^8 (i-1) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-2} + \exp(-E\rho) \times \right. \\
 & \times (-EA_{9j} - E\rho A_{10j} + A_{10j}) \left. \right] + \\
 & + (\tau - \tau_c) \left\{ \sum_{j=3}^7 (j-2) (\tau - \tau_{aj})^{j-3} \left[ \sum_{i=2}^8 (i-1) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \exp(-E\rho) (-EA_{9j} - EA_{10j}\rho + A_{10j}) \right] \right\} \quad (4-9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\partial^2 Q / \partial\rho^2)_\tau = & \sum_{i=3}^8 A_{i1} (i-1) (i-2) (\rho - \rho_{aj})^{i-3} + \exp(-E\rho) \times \\
 & \times \left\{ \left[ -EA_{9,1} + A_{10,1}(2 - E\rho) \right] (-E) \right\} + \\
 & + (\tau - \tau_c) \left\{ \sum_{j=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \left\{ \sum_{i=3}^8 A_{ij} (i-1) (i-2) (\rho - \rho_{aj})^{i-3} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \exp(-E\rho) \left[ -EA_{9j} + A_{10j}(2 - E\rho) \right] (-E) \right\} \right\} \quad (4-10)
 \end{aligned}$$

$$(\partial^2 Q / \partial\tau^2)_\rho = 2 \left\{ \sum_{j=3}^7 (j-2) (\tau - \tau_{aj})^{j-3} \left[ \sum_{i=1}^8 A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \exp(-E\rho) \right] \times \right.$$

$$\times (A_{9j} + A_{10j}p) \Big] \Big\} + (\tau - \tau_e) \left\{ \sum_{j=4}^7 (j-2)(j-3)(\tau - \tau_{aj})^{j-1} \times \right. \\ \left. \times \left[ \sum_{i=1}^8 A_{ij}(\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \exp(-E\rho) (A_{9j} + A_{10j}p) \right] \right\} \quad (4-11)$$

Για τις παραγωγούς της ποσότητας  $\psi_0$ , που υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3-5), αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της Διδάκτορικής Διατριβής οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$d\psi_0/dT = 10^{-3} \sum_{i=2}^j (i-1)C_i(T/1000)^{i-2} + C_{j+1}(1/T) + 10^{-3}C_{j+2}(\ln T + 1) \quad (4-12)$$

με  $j=3$  [σημειώνεται: στην περίπτωση βαρέος ύδατος  $j=6$ , σχέση (3-42)]

Ακόμα:

$$d(\psi_0\tau)/d\tau = -(T^2/1000)d(\psi_0\tau)/dT \quad (4-13)$$

αφού  $\tau = 1000/T$

Δηλαδή:

$$d(\psi_0\tau)/d\tau = -(T^2/1000) \left[ \psi_0 d\tau/dT + \tau d\psi_0/dT \right] \quad (4-14)$$

$$d(\psi_0\tau)/d\tau = -(T^2/1000) \left[ (-1000/T^2)\psi_0 + (1000/T)d\psi_0/dT \right] \quad (4-15)$$

$$d(\psi_0\tau)/d\tau = \psi_0 - Td\psi_0/dT \quad (4-16)$$

και

$$d^2\psi_0/dT^2 = 10^{-6} \sum_{i=3}^j (i-1)(i-2)C_i(T/1000)^{i-3} - C_{j+1}(1/T^2) + \\ + (C_{j+2}/1000)(1/T) \quad (4-17)$$

με  $j=3$  [σημειώνεται: στην περίπτωση βαρέος ύδατος  $j=6$ , σχέση (3-42)]

### 4.3 Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες.

Αναφέρθηκε ήδη ότι οι καταλληλότερες σχέσεις και συσχετίσεις που επελέγησαν να χρησιμοποιηθούν στο υπολογιστικό μέρος αυτής της Δοκτορικής Διατριβής σε ό,τι αφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος αναπτύχθηκαν από τους<sup>11</sup>:

- Keyes F.G. et al, 1968  
(καταστατική εξίσωση και θερμοδυναμικές ιδιότητες)
- Sengers J.V. και Watson J.T.R., 1986  
(δυναμική συνεκτικότητα και θερμική αγωγιμότητα)
- Schmidt E. και Griggall U., 1987  
(εξίσωση κορεσμού) και
- Straub J. et al., 1980  
(επιφανειακή τάση)

Στις σχετικές παραγράφους του 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, παρουσιάστηκαν επίσης οι αντίστοιχες περιοχές πιέσεων και θερμοκρασιών για τις οποίες ισχύουν οι χρησιμοποιούμενες συσχετίσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος.

Από τη μελέτη των σχετικών δεδομένων προκύπτει ότι:

Η ελάχιστη κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων συσχετίσεων σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος μπορεί να οριστεί ως η περιοχή ισχύος της καταστατικής εξίσωσης των Keyes F.G. et al., 1968 -από την οποία προκύπτουν όπως αναφέρθηκε και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες:

- Πιέσεις: 0 - 1000 bar
- Θερμοκρασίες: 0 -1500 °C

Αυτή η περιοχή ισχύος, πρέπει περαιτέρω να περιορισθεί ώστε να αποκλεισθεί μια μικρή περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών στη γειτονιά του κρισίμου σημείου, όπου οι καταστατικές εξισώσεις αυτού του τύπου δεν αναπαράγουν με ακρίβεια τις θερμοδυναμικές ιδιότητες. Για την αντίστοιχου τύπου νεότερη και ακριβέστερη

---

<sup>11</sup> Βλέπε στις §§ 3.3.2, 3.3.3 και 3.3.4.

καταστατική εξίσωση για το ελαφρύ ύδωρ που παρουσιάζουν οι Kestin J. και Sengers J.V., 1986, η *Διεθνής Ένωση για τις Ιδιότητες του Νερού και του Ατμού (IAPWS)* ορίζει ότι η αποκλειόμενη περιοχή είναι:

$$|T - T^*| \leq 1 \text{ K}, \quad |\rho/\rho^* - 1| \leq 0.3$$

Δεδομένου ότι η χρησιμοποιούμενη καταστατική εξίσωση είναι παλαιότερη από εκείνη των Kestin J. και Sengers J.V., 1986, καθώς επίσης ότι για την αναπαραγωγή των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος με ακρίβεια βιομηχανικής χρήσης στις περιοχές πιέσεων και θερμοκρασιών που λειτουργούν οι Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Ισχύος, οι θερμοφυσικές ιδιότητες στη γειτονιά του κρισίμου σημείου δεν ενδιαφέρουν, δεχόμαστε ότι η αποκλειόμενη περιοχή μπορεί να είναι:

$$|T - T^*| \leq 10 \text{ K}, \quad |\rho/\rho^* - 1| \leq 0.3$$

Επιπλέον, για την αντίστοιχου τύπου νεότερη και ακριβέστερη καταστατική εξίσωση για το ελαφρύ ύδωρ που παρουσιάζουν οι Kestin J. και Sengers J.V., 1986, η *Διεθνής Ένωση για τις Ιδιότητες του Νερού και του Ατμού (IAPWS)* δέχεται ως μέγιστη θερμοκρασία ισχύος τους 1000 °C· η μέγιστη αυτή θερμοκρασία πρέπει να γίνει δεκτή και για την εδώ χρησιμοποιούμενη καταστατική εξίσωση των Keyes F.G. et al., 1968.

Ανακεφαλαιώνοντας έχουμε:

Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων συσχετίσεων σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος μπορεί να ορισθεί ως

- Πιέσεις: 0 - 1000 bar
- Θερμοκρασίες: 0 - 1000 °C

Εξαιρείται μικρή περιοχή στη γειτονιά του κρισίμου σημείου, ως εξής:

$$|T - T^*| \leq 10 \text{ K}, \quad |\rho/\rho^* - 1| \leq 0.3$$

Η εξίσωση κορεσμού και η συσχέτιση για την επιφανειακή τάση ισχύουν φυσικά μόνο για καταστάσεις κορεσμού από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο (εξαιρείται η αποκλειόμενη περιοχή στη γειτονιά του τελευταίου).

Το κρίσιμο σημείο ορίζεται για τις εξισώσεις αυτές, με τις ψευδοκρίσιμες τιμές της πίεσης, της θερμοκρασίας και της πυκνότητας, ως εξής:

- ψευδοκρίσιμη πίεση  $P^* = 221.15 \text{ bar}$
- ψευδοκρίσιμη θερμοκρασία  $T^* = 647.27 \text{ K}$  και
- ψευδοκρίσιμη πυκνότητα  $\rho^* = 317.763 \text{ kg/m}^3$

Λόγω επιφύλαξεων που εκφράζονται για την ακρίβεια της συσχέτισως για την επιφανειακή τάση του ελαφρού ύδατος, που προτείνεται από τους Straub J. et al., 1980, στο αντίστοιχο σημείο του κώδικα χρησιμοποιείται η τιμή για τη θερμοκρασία στο κρίσιμο σημείο που δίνουν οι ίδιοι οι δημιουργοί της συσχέτισης. Δηλαδή:

$$T^* = 647.15 \text{ K}$$

Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες εξυπηρετεί σε θερμοδυναμικούς υπολογισμούς για την περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών στην οποία εργάζονται υπό κανονικές συνθήκες οι Πυρηνικοί Αντδραστήρες Ισχύος. Σημειώνεται ότι ειδικά σε ότι αφορά τους συντελεστές αμοιβαίων δράσεων του ατμού του ελαφρού ύδατος<sup>12</sup> καθώς και τις παραγώγους τους ως προς τη θερμοκρασία<sup>13</sup>, οι υπολογισμοί του κώδικα ισχύουν μόνο για ατμό και για θερμοκρασίες ανάμεσα στο τριπλό σημείο και στους 300 °C.

#### 4.4 Το πρόβλημα του υπολογισμού της πυκνότητας.

##### 4.4.1 Γενικά.

Για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων μεταφοράς του ελαφρού ύδατος από το σύνολο των σχέσεων που παρουσιάσθηκαν

---

<sup>12</sup> Βλέπε τις σχέσεις (3-26), (3-27) και (3-28).

<sup>13</sup> Βλέπε τις σχέσεις (3-29), (3-30) και (3-31).

προηγούμενα στο 3<sup>ο</sup> και στο παρόν Κεφάλαιο, αρκεί να είναι γνωστή η πυκνότητα  $\rho$  και η θερμοκρασία  $T$ , να διατίθενται δηλαδή καταστατικές εξισώσεις κατηγορίας  $T$ - $\rho$  και εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς, οι οποίες δέχονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές την πυκνότητα και τη θερμοκρασία. Το ζητούμενο όμως εδώ είναι να μπορούν να υπολογισθούν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ε.υ. αν είναι γνωστά η πίεση  $P$  και η θερμοκρασία  $T$ , πράγμα που ειδικά εξυπηρετεί σε κώδικες θερμοϋδραυλικής ανάλυσης Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος. Με δεδομένες λοιπόν την πίεση και τη θερμοκρασία πρέπει με κάποιο τρόπο να προσδιορίζεται η αντίστοιχη πυκνότητα έτσι ώστε να μπορεί να διαμορφωθεί το απαραίτητο ζεύγος εισόδου πυκνότητας - θερμοκρασίας, το οποίο επιτρέπει τελικά τον εύκολο υπολογισμό όλων των ιδιοτήτων. Για τη διαδικασία αυτή προσφέρεται μόνο η σχέση  $(3-3)^{14}$ . Πρόκειται βέβαια για μία συνάρτηση της μορφής  $P = P(T, \rho)$ , η οποία είναι πεπλεγμένη ως προς την πυκνότητα. Αυτό αποκλείει κάθε συμβατική προσπάθεια για την αναλυτική της επίλυση ως προς  $\rho$ . Πρέπει να καταφύγει κανείς λοιπόν σε κάποια από τις γνωστές αριθμητικές μεθόδους επίλυσεως τέτοιων προβλημάτων. Η εφαρμογή μιας αριθμητικής μεθόδου προϋποθέτει επιπλέον την ύπαρξη καλής αρχικής προσέγγισης της τιμής της πυκνότητας που ζητείται να υπολογισθεί. Η διαπραγμάτευση των θεμάτων αυτών γίνεται στις παραγράφους που ακολουθούν.

#### **4.4.2 Προτεινόμενες αριθμητικές μέθοδοι.**

Σύμφωνα με τους Hendricks R.C. et al., 1973<sup>15</sup>, οι αριθμητικές μέθοδοι που είναι κατάλληλες να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό της αριθμητικής επίλυσης της καταστατικής εξίσωσης (3-3), της μορφής  $P = P(T, \rho)$  ως προς την πυκνότητα  $\rho$ , είναι η μέθοδος της διχοτομήσεως και η μέθοδος Newton - Raphson. Θα γίνει στη συνέχεια μια συνοπτική καταγραφή του τρόπου με τον οποίο μπορούν να εφαρμοσθούν αυτές οι δύο αριθμητικές μέθοδοι.

---

<sup>14</sup> Βλέπε και § 3.3.2.

<sup>15</sup> Βλέπε και Keyes F.G. et al., 1968.

#### 4.4.2.1 Μέθοδος διχοτομήσεως.

Σύμφωνα και με τα όσα αναφέρονται από τους Hendicks R.C. et al., 1973 η μέθοδος διχοτομήσεως<sup>16</sup> προσφέρεται για την επίλυση της καταστατικής εξίσωσης (3-3), της μορφής  $P = P(T, \rho)$ , ως προς την πυκνότητα με δεδομένη την πίεση P και την θερμοκρασία T για πιέσεις μεγαλύτερες από την κρίσιμη πίεση P\* (υπερκρίσιμες πιέσεις), για όλες τις θερμοκρασίες της περιοχής θερμοκρασιών για την οποία γενικά ισχύει ο κώδικας τους αλλά και ο κώδικας LIGHT\_WASP. Προκειμένου να εφαρμοσθεί η μέθοδος αυτή είναι, όπως είναι γνωστό, απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι η ζητούμενη λύση εγκλωβίζεται, σε ένα μικρό διάστημα (a,b). Οι τιμές που πρέπει να πάρουν τα άκρα a και b του διαστήματος αυτού εξαρτώνται από τις τις θερμοκρασίες για τις οποίες ζητείται η λύση. Σύμφωνα με τους Hendricks R.C. et al., 1973 μπορούν να διακριθούν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

##### a. $T < T^*$ (υποκρίσιμες θερμοκρασίες).

- Av  $100^\circ\text{C} \leq t \leq 180^\circ\text{C}$  τότε:

$$a = 1010.7054 \text{ kg/m}^3 \text{ και } b = b(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 \quad t \text{ σε } ^\circ\text{C}$$

όπου

$$a_0 = 1.0220277 \times 10^0 \quad a_1 = -0.69617325 \times 10^{-3}$$

$$a_2 = 0.54390571 \times 10^{-5} \quad a_3 = -0.52277795 \times 10^{-7}$$

$$a_4 = 0.12476711 \times 10^{-9}$$

- Av  $t < 100^\circ\text{C}$

$$a = 1045.5 \text{ kg/m}^3 \text{ και } b = b(40^\circ\text{C})$$

- Av  $t > 180^\circ\text{C}$

$$a = 1010.7054 \text{ kg/m}^3 \text{ και } b = \rho^*$$

---

<sup>16</sup> Με τον τρόπο που αυτή περιγράφεται στα εγχειρίδια αριθμητικής ανάλυσης, βλέπε π.χ. και Μπακόπουλος Α., 1983.



### ***β. $T > T^*$ (υπερκρίσιμες θερμοκρασίες)***

Τότε:

$$a = 3 \rho^* \text{ και } b = 0.$$

#### **4.4.2.2 Μέθοδος Newton – Raphson.**

Η μέθοδος Newton - Raphson<sup>17</sup> κρίθηκε κατάλληλη από τους Hendricks R.C. et al. για την επίλυση της καταστατικής εξίσωσης (3-3), της μορφής  $P = P(T, \rho)$ , ως προς την πυκνότητα με δεδομένη την πίεση  $P$  και την θερμοκρασία  $T$  για πιέσεις μικρότερες από την κρίσιμη πίεση  $P^*$ , (υποκρίσιμες πιέσεις), για όλες τις θερμοκρασίες της περιοχής θερμοκρασιών για την οποία γενικά ισχύει ο κώδικας τους αλλά και ο κώδικας LIGHT\_WASP. Για τους αναγκαίους υπολογισμούς απαιτείται, όπως είναι γνωστό, μία αρχική εκτίμηση της ζητούμενης τιμής. Η αρχική αυτή εκτίμηση είναι διαφορετική για διαφορετικές περιοχές θερμοκρασιών. Συγκεκριμένα οι Hendricks R.C. et al. προτείνουν:

#### ***α. Δόση για το υπόψυκτο και το κορεσμένο υγρό.***

Συστήνονται οι ακόλουθες αρχικές εκτιμήσεις της πυκνότητας:

$t$ σε °C	$\rho$ σε kg/m <sup>3</sup>
$t < 100$	1001.001
$t < 160$	961.538
$t < 220$	907.441
$t < 240$	847.4576
$t < 300$	822.368
$t < t_c$	718.54566

---

<sup>17</sup> Με τον τρόπο που αυτή περιγράφεται στα εγχειρίδια αριθμητικής ανάλυσης, βλέπε π.χ. και Μπακόπουλος Α., 1983.

### **β. Λύση για τον υπέρθερμο και τον κορεσμένο ατμό.**

Για τον υπέρθερμο ατμό χρησιμοποιείται η ακόλουθη αρχική εκτίμηση της πυκνότητας:

$$\rho = P/t/R \text{ σε kg/m}^3$$

Για τον κορεσμένο ατμό η αρχική εκτίμηση της πυκνότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$t^*/t > 0.985 \quad \rho = 0.65 \rho^*$$

$$t^*/t > 0.995 \quad \rho = 0.75 \rho^*$$

$$t^*/t > 0.999 \quad \rho = 0.85 \rho^*$$

$$t^*/t > 0.9995 \quad \rho = 0.90 \rho^*$$

#### **4.4.3 Ακολουθούμενη αριθμητική μέθοδος.**

Για την περίπτωση του κώδικα LIGHT\_WASP επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά η μέθοδος Newton - Raphson, προκειμένου να επιλυθεί η καταστατική εξίσωση (3-3) της μορφής  $P = P(T, \rho)$  ως προς την πυκνότητα. Οι λόγοι για τους οποίους έγινε αυτή η επιλογή έχουν ως εξής:

A. Η απλότητα του αριθμητικού κώδικα για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος -καθώς και η απλότητα οποιουδήποτε κώδικα γενικά - εξασφαλίζεται περισσότερο, με την χρησιμοποίηση όσο το δυνατόν λιγότερων υπορουτινών μαθηματικής φύσεως.

B. Η χρησιμοποίηση αποκλειστικά της μεθόδου διχοτομήσεως έναντι της μεθόδου Newton - Raphson δεν είναι αντιμετώπιση που εξασφαλίζει τη ζητούμενη απλότητα. Αυτό κυρίως συμβαίνει διότι για να υπολογισθεί η λύση για την πυκνότητα πρέπει αυτή να εγκλωβισθεί με βεβαιότητα σε ένα μικρό διάστημα, του οποίου τα άκρα να είναι με τέτοιο τρόπο επιλεγμένα ώστε μέσα σε αυτό να υφίσταται μία το πολύ λύση που επιπλέον να έχει φυσική σημασία<sup>18</sup>. Είναι αναγκαίο δηλαδή για τη μέθοδο

---

<sup>18</sup> Είναι πιθανό μία ρίζα της επιλυόμενης εξίσωσης  $P = P(T, \rho)$  να μην έχει φυσική σημασία ή να αντιπροσωπεύει κάποια μετασταθή κατάσταση για την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος.

διχοτομήσεως να εκτιμηθούν με επιτυχία δύο τιμές που να αντιπροσωπεύουν τα άκρα του διαστήματος εγκλωβισμού της λύσεως, σε αντίθεση με τη μέθοδο Newton - Raphson που απαιτεί για την εύρεση της λύσης μία επιτυχή αρχική προσέγγισή της. Για την εφαρμογή βέβαια της αριθμητικής διαδικασίας Newton - Raphson απαιτείται και ο προσδιορισμός της παραγώγου της επλυόμενης συναρτήσεως ως προς την μεταβλητή για την οποία η συνάρτηση αυτή είναι πεπλεγμένη -ως προς αυτή τη μεταβλητή ζητείται βέβαια και η λύση της συναρτήσεως. Αυτό δεν αποτελεί για την περίπτωση μας μειονέκτημα της μεθόδου Newton - Raphson διότι η παράγωγος της συνάρτησης  $P = P(T, \rho)$  ως προς την πυκνότητα μπορεί να διατυπωθεί με αναλυτική εξίσωση (σχέση 4-1) της οποίας η υλοποίηση στον κώδικα δεν παρουσιάζει καμία προγραμματιστική δυσκολία.

Γ. Η χρησιμοποίηση ενός συνδυασμού της μεθόδου διχοτομήσεως και της μεθόδου Newton - Raphson κατά τον τρόπο που συστήνουν οι Hendricks R.C. et al., 1973 παρουσιάζει, πέρα από τα προβλήματα πολυπλοκότητας, και προβλήματα εφαρμογής καθώς, συγκεκριμένα, δεν κατέστη δυνατόν να εξακριβωθεί στα πλαίσια αυτής της  $\Delta\Delta$  αν η συλλογιστική των Hendricks R.C. et al. και των συνεργατών του μπορεί να εξυπηρετήσει τον υπολογισμό της πυκνότητας με ακρίβεια, δεδομένου ότι ο σχετικός κώδικας των Hendricks R.C. et al. δεν κρίθηκε σκόπιμο να υλοποιηθεί στα υπολογιστικά συστήματα για τα οποία αναπτύχθηκε ο κώδικας LIGHT\_WASP, δεδομένου ότι ήταν διαθέσιμος σε μορφή εκτύπωσης και μόνο.

Η χρησιμοποίηση της μεθόδου Newton-Raphson, όπως ακολουθήθηκε εδώ, εξασφάλισε τον ακριβή υπολογισμό της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος, δεδομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας.

#### **4.4.4 Μέθοδος για τον προσδιορισμό της αρχικής προσέγγισης της πυκνότητας.**

Το κυριότερο σημείο που ενδιαφέρει μετά την επιλογή της αριθμητικής μεθόδου Newton - Raphson ως της καταλληλότερης για την αριθμητική επίλυση της καταστατικής εξίσωσης (3-3) ως προς την πυκνότητα, είναι ο τρόπος με τον οποίο θα εξασφαλισθεί η απαίτηση της μεθόδου για μία καλή αρχική προσέγγιση της ζητούμενης λύσης. Ενδιαφέρει λοιπόν να βρεθεί τρόπος να υπολογισθεί μία τιμή της πυκνότητας  $\rho$  του ελαφρού ύδατος από τη δεδομένη πίεση  $P$  και θερμοκρασία  $T$ , η

οποία να είναι αρκετά κοντά στην πραγματική, για να χρησιμοποιηθεί ως τέτοια προσέγγιση. Τέτοιες δυνατότητες υπάρχουν πολλές, αλλά προκειμένου για την επλογή εκείνης, η οποία χρησιμοποιήθηκε στο υπολογιστικό μέρος αυτής της Διδακτορικής Διατριβής ακολουθήθηκαν τα ακόλουθα κριτήρια:

1. Να μην χρησιμοποιηθούν εξισώσεις και συσχετίσεις με μειωμένη αξιοπιστία και περιορισμένη περιοχή ισχύος.
2. Να υπάρχει δυνατότητα για την προσέγγιση της πυκνότητας τόσο στην υγρή, όσο και στην ατμώδη και την υπερκρίσιμη φάση του ελαφρού ύδατος και σε ένα πεδίο θερμοκρασιών και πιέσεων τουλάχιστον ίσης έκτασης με την κοινή περιοχή ισχύος της καταστατικής εξίσωσης και των εξισώσεων για τις ιδιότητες μεταφοράς του ελαφρού ύδατος, που προτείνουν οι Keyes F.G. et al., 1968 και οι Sengers J.V. και Watson J.T.R. et al., 1986 αντίστοιχα.
3. Η προσέγγιση της πυκνότητας να γίνεται με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια.
4. Η προσέγγιση να γίνεται με τη χρησιμοποίηση σχέσεων που παρουσιάζουν συνέχεια στις τιμές στα όρια μεταξύ των διαφόρων φάσεων και ειδικότερα στο όριο μεταξύ της υγρής και της υπερκρίσιμης και στο όριο μεταξύ της ατμώδους και της υπερκρίσιμης φάσης.

Σύμφωνα με αυτά τα κριτήρια η προσέγγιση για την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος στην υγρή και την ατμώδη φάση επιλέχθηκε να υπολογισθεί σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση του Schmidt E., 1969 για το ελαφρύ ύδωρ (διατύπωση για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος IFC-1967). Πρόκειται για σύνολο συσχετίσεων που συγκροτούν καταστατική εξίσωση υψηλής θερμοδυναμικής συνέπειας -συνάρτηση Gibbs  $G = G(P,T)$ , δηλαδή καταστατική εξίσωση κατηγορίας P-T, από τις οποίες συσχετίσεις παράγονται εύκολα συναρτήσεις που υπολογίζουν την πυκνότητα (ισοδύναμα τον ειδικό όγκο του ε.υ.).

Στη συνέχεια θα παρουσιασθούν οι συσχετίσεις υπολογισμού της αρχικής προσέγγισης της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος από την καταστατική εξίσωση της τυποποίησης IFC-1967, καθώς και οι διάφορες δυσκολίες που αντιμετώπισθηκαν για την υπολογιστική υλοποίησή τους.

Σημειώνεται ότι ένα σημαντικό πλεονέκτημα από τον υπολογισμό της αρχικής προσέγγισης της πυκνότητας σύμφωνα με την διατύπωση IFC-1967 για το ελαφρύ

ύδρω, είναι η δυνατότητα που παρέχεται από τις διαθέσιμες συσχετίσεις να προσδιορίζονται με μικρές τροποποιήσεις και αρχικές προσεγγίσεις για την πυκνότητα του βαρέος ύδατος με βάση την αρχή των αντιστοιχουσών καταστάσεων. Αυτό εξυπηρετεί και την ανάπτυξη του αριθμητικού κώδικα για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος.

#### **4.4.4.1 Υπολογισμός της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος σύμφωνα με την διατύπωση IFC-1967.**

Κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθούν σε αυτό το σημείο εκείνες οι συσχετίσεις από την διατύπωση IFC-1967 για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, από τις οποίες είναι δυνατόν να υπολογισθεί η πυκνότητά του. Η παρουσίαση αυτή γίνεται με συνοπτικό τρόπο. Τα κύρια σημεία της διατύπωσης IFC-1967 που ενδιαφέρουν έχουν ως εξής:

Η συνολική περιοχή ισχύος της τυποποίησης IFC-1967 καλύπτει την περιοχή πιέσεων  $0 \leq P \leq 1000 \text{ bar}$  και την περιοχή θερμοκρασιών  $0 \leq T \leq 1073.15 \text{ K}$ . Οι ψευδοκρίσιμες τιμές για τα καταστατικά μεγέθη πίεσως, θερμοκρασίας και ειδικού όγκου στο κρίσιμο σημείο είναι:  $P^* = 221.2 \text{ bar}$ ,  $T^* = 647.3 \text{ K}$  και  $v^* = 0.00317 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ .

Η συνολική περιοχή ισχύος της διατύπωσης διαχωρίζεται σε έξι υποπεριοχές, οι οποίες καθορίζονται στον Πίνακα 4-1 και απεικονίζονται στα Διαγράμματα 4-1 και 4-2.

Για την ευκολότερη κατανόηση του διαστήματος των πιέσεων και των θερμοκρασιών που καλύπτουν οι υποπεριοχές που εμφανίζονται στον Πίνακα 4-1 και στα Διαγράμματα 4-1 και 4-2, διευκρινίζονται τα εξής:

- Η **υποπεριοχή 1** περιγράφει την υγρή φάση και ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης μακριά από το κρίσιμο σημείο.
- Η **υποπεριοχή 2** περιγράφει την ατμώδη φάση και ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης μακριά από το κρίσιμο σημείο.
- Η **υποπεριοχή 3** καλύπτει την ατμώδη φάση και ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης γύρω και πάνω από το κρίσιμο σημείο.

- Η **υποπεριοχή 4** καλύπτει την υγρή φάση και ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης για πιέσεις γύρω και πάνω από το κρίσιμο σημείο και για θερμοκρασίες στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου.
- Η **υποπεριοχή 5** αντιπροσωπεύει καταστάσεις κορεσμού στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου.
- Η **υποπεριοχή 6** αντιπροσωπεύει καταστάσεις κορεσμού μακριά από το κρίσιμο σημείο.

Επιπλέον οι σταθερές  $T_{r1}$ ,  $T_{r2}$ ,  $T_{r3}$  και  $P_{r2}$  παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$T_{r1} = 9.626911787 \times 10^{-1}$$

$$T_{r2} = 1.333462073$$

$$T_{r3} = T_{\max}/T^*, \quad T_{\max} = 1073.15 \text{ K, } \text{άρα } T_{r3} = 1.657886606$$

$$P_{r2} = P_{\max}/P^*, \quad P_{\max} = 1000 \text{ bar, } \text{άρα } P_{r2} = 4.616805171$$

Ακόμα είναι:

$P_{r1} = P_{rs}(T_{r1})$ ,  $P_{rs} = P_{rs}(T_r)$  και  $P_{r1L} = P_{r1L}(T_r)$ , όπου  $P_{rs}(T_r)$  και  $P_{r1L}(T_r)$  είναι συναρτήσεις της πίεσης ως προς την ανηγμένη θερμοκρασία η αναλυτική μορφή των οποίων θα παρουσιασθεί στη συνέχεια.

Σύμφωνα με την τυποποίηση IFC-1967:

**α. Ο ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος για την υποπεριοχή 1 και το κορεσμένο υγρό της υποπεριοχής 6 δίνεται από τη σχέση:**

$$\begin{aligned} v_{r1} = v/v^* = & A_{11}a_5Z^{5/17} + \left\{ A_{12} + A_{13}T_r + A_{14}T_r + A_{15}(a^6 - T_r)^{10} + \right. \\ & \left. + A_{16}(a_7 + T_r^{19})^{-1} \right\} - (a_8 + T_r^{11})^{-1}(A_{17} + 2A_{18}P_r + 3A_{19}P_r^2) - \\ & - A_{20}T_r^{18}(a_9 + T_r^2) \left\{ -3(a_{10} + P_r)^{-4} + a_{11} \right\} + 3A_{21}(a_{12} - T_r)P_r + \\ & + 4A_{22}T_r^{-20}P_r \end{aligned} \quad (4-18)$$

όπου

$$Z = Y + (a_3 Y^2 - 2a_4 T_r + 2a_5 P_r)^{1/2} \quad (4-19)$$

$$Y = 1 - a_1 T_r^2 - a_2 T_r^{-6} \quad (4-20)$$

Οι σταθερές A και a παίρνουν τις τιμές που εμφανίζονται στον Πίνακα 4-2.

**β. Ο ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού όδατος για την υποπεριοχή 2 και τον κορεσμένο ατμό της υποπεριοχής 6 δίνεται από τη συσχέτιση:**

$$v_{r2} = v/V^* = IT_r/P_r - \sum_{\mu=1}^5 \mu P_r^{\mu-1} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{z(\mu,\nu)} - \\ - \sum_{\mu=6}^8 \left\{ (\mu-2) P_r^{1-\mu} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{z(\mu,\nu)} / \left[ P_r^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu\lambda} X^{x(\mu,\lambda)} \right]^2 \right\} + \\ + 11(P_r/P_{rL})^{10} \sum_{\nu=0}^6 B_{9\nu} X^\nu \quad (4-21)$$

όπου

$$I = R [T^*/(P^*V^*)] \quad (4-22)$$

και

$$X = \exp[b(1 - T_r)] \quad (4-23)$$

$$P_{rL} = P_{rL}(T_r) = [(T_{r2} - T_r)P_{r1} + (T_r - T_{r1})P_{r2} - L(T_{r2} - T_r)(T_r - T_{r1})] / (T_{r2} - T_{r1}) \quad (4-24)$$

ενώ είναι:

$$L = 7.160997524$$

Η συνάρτηση  $P_{rL}$  είναι η εξίσωση για το όριο μεταξύ των υποπεριοχών 2 και 3 (ανηγμένη πίεση κατά μήκος του ορίου των υποπεριοχών 2 και 3). Οι σταθερές B και b παίρνουν τις τιμές που εμφανίζονται στον Πίνακα 4-3. Οι σταθερές  $n(\mu)$ ,  $z(\mu,\nu)$ ,  $l(\mu)$  και  $x(\mu,\lambda)$  παίρνουν τις τιμές που εμφανίζονται στον Πίνακα 4-4.

γ. Ο ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος για την υποπεριοχή 3 και τον κορεσμένο αιμό της υποπεριοχής 5 δίνεται από τη συσχέτιση:

$$\begin{aligned}
 P_{r3} = P/P^* = & - \left\{ C_{01} + \sum_{v=2}^{11} (1-v)C_{0v}V_r^{-v} + C_{012}V_r^{-1} \right\} - \\
 & - \left\{ C_{11} + \sum_{v=2}^6 (1-v)C_{1v}V_r^{-v} + C_{17}V_r^{-1} \right\} (T_r - 1) - \\
 & - \left\{ C_{21} + \sum_{v=2}^7 (1-v)C_{2v}V_r^{-v} + C_{28}V_r^{-1} \right\} (T_r - 1)^2 - \\
 & - \left\{ C_{31} + \sum_{v=2}^9 (1-v)C_{3v}V_r^{-v} + C_{310}V_r^{-1} \right\} (T_r - 1)^3 + \\
 & + 5C_{41}V_r^{-6}T_r^{-23}(T_r - 1) - 6V_r^{-5} \sum_{v=0}^4 C_{6v}T_r^{-2-2v}
 \end{aligned} \tag{4-25}$$

Οι σταθερές C παίρνουν τις τιμές που εμφανίζονται στον Πίνακα 4-5.

δ. Ο ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος για την υποπεριοχή 4 και το κορεσμένο υγρό της υποπεριοχής 5 δίνεται από τη συσχέτιση:

$$P_{r4} = P/P^* = P_{r3} + \sum_{\mu=3}^4 \sum_{v=1}^5 (v-1)D_{\mu v}y^{\mu}V_r^{-v} - y^{32} \sum_{v=1}^3 (v-1)D_{5v}V_r^{-v-2} \tag{4-26}$$

Όπου

$$y = (1 - T_r)/(1 - T_{r1}) \tag{4-27}$$

Οι σταθερές D παίρνουν τις τιμές που εμφανίζονται στον Πίνακα 4-6.

Από τις σχέσεις (4-18), (4-21), (4-25) και (4-26), μπορεί να υπολογισθεί η πυκνότητα του ελαφρού ύδατος με βάση τον ανηγμένο ειδικό όγκο από τη σχέση:

$$\rho = (V_r V^*)^{-1}$$



Η συνάρτηση  $P_{rs}$  είναι η εξίσωση για την καμπύλη κορεσμού του ελαφρού ύδατος (αηγημένη πίεση κορεσμού σαν συνάρτηση της αηγημένης θερμοκρασίας) και έχει την ακόλουθη μορφή

$$P_{rs}(T_r) = P_s(T)/P_c = \exp \left\{ \left[ \sum_{v=1}^5 k_v(1 - T_r)^v \right] / \left[ T_r + k_6(1 - T_r) \right] T_r + \right. \\ \left. + k_7(1 - T_r)^2 T_r \right] - (1 - T_r) / \left[ k_8(1 - T_r)^2 + k_9 \right] \right\} \quad (4-28)$$

με

$$k_1 = -7.691234564 \quad \times 10^0 \quad k_6 = 4.167117320 \quad \times 10^0$$

$$k_2 = -2.608023696 \quad \times 10^1 \quad k_7 = 2.097506760 \quad \times 10^1$$

$$k_3 = -1.681706546 \quad \times 10^2 \quad k_8 = 10^9$$

$$k_4 = 6.423285504 \quad \times 10^1 \quad k_9 = 6$$

$$k_5 = -1.189646225 \quad \times 10^2$$

[Πρόκειται βέβαια για τη σχέση (3-23) που παρουσιάσθηκε ήδη στο Κεφάλαιο 3].

#### 4.4.4.2 Δυσκολίες στον υπολογισμό της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος σύμφωνα με την διατύπωση IFC-1967.

Έχοντας υπόψη τις συσχετίσεις για τον υπολογισμό της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος σύμφωνα με τη διατύπωση IFC-1967, όπως αυτές αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, διαπιστώνεται ότι η ζητούμενη αρχική προσέγγιση για τον υπολογισμό της πυκνότητας μπορεί να προσδιορισθεί άμεσα μόνο για τις υποπεριοχές 1, 2 και 6. Για τις υποπεριοχές 3, 4 και 5 ο προσδιορισμός της αρχικής προσέγγισης της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος είναι δύσκολος καθώς οι διαθέσιμες συσχετίσεις για τον υπολογισμό της είναι σχέσεις πεπλεγμένες ακριβώς ως προς τη ζητούμενη αρχική προσέγγιση [εξισώσεις (4-25) και (4-26)]. Παρόλο που οι υποπεριοχές 3, 4 και 5 καλύπτουν περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών πλησίον του κρίσιμου σημείου, η οποία δεν έχει σχέση με την περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών που εργάζονται οι ΠΑΙ που χρησιμοποιούν ελαφρύ ύδαρ, η λύση των πεπλεγμένων αυτών σχέσεων

είναι απαραίτητη για την ορθή λειτουργία του κώδικα LIGHT\_WASP. με βάση αυτές τις σχέσεις είναι δυνατό να υπολογίζεται από την κ.ε. (3-3) η πυκνότητα του ελαφρού ύδατος στη γειτονιά του κρισίμου σημείου, ώστε να γίνεται έλεγχος αν αυτή η πυκνότητα εμπίπτει στην αποκλειόμενη περιοχή ισχύος της εν λόγω καταστατικής εξίσωσης<sup>19</sup> και ως εκ τούτου ο χρήστης να έχει τη δυνατότητα πλήρους εκμεταλλεύσεως των δυνατοτήτων υπολογισμού που του παρέχουν οι υλοποιημένες εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες για όλη την κοινή περιοχή ισχύος τους.

Είναι φανερό ότι για τις υποπεριοχές 3, 4 και 5 η αρχική προσέγγιση της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος δίνεται με πεπελεγμένο τρόπο σε μία συσχέτιση της μορφής  $P = P(T, \rho)$ . Η λύση της συσχέτισης ως προς την αρχική εκτίμηση της πυκνότητας μπορεί να γίνει με τη χρήση μιας αριθμητικής μεθόδου. Η αριθμητική μέθοδος που προτιμήθηκε για την επίλυση των εξισώσεων (4-25) και (4-26) είναι και εδώ η μέθοδος Newton - Raphson.

Οι τιμές εκκινήσεως με τις οποίες τροφοδοτήθηκε η μέθοδος Newton – Raphson με σκοπό να καταλήξει στον προσδιορισμό της αρχικής προσέγγισης για την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 3, 4 και 5 λήφθηκαν ως εξής:

- Ελεγκτάθηκε η ισχύς της συσχέτισης για τις υποπεριοχές 1 και 6 [εξίσωση (4-18)] στις πιέσεις και τις θερμοκρασίες που καλύπτει η συσχέτιση για τις υποπεριοχές 4 και 5 [εξίσωση (4-26)]. Υπολογίσθηκε έτσι μία τιμή ανηγμένου ειδικού όγκου, που είναι καλή τιμή εκκίνησης για τη λύση της εξίσωσης (4-26) ως προς τη ζητούμενη αρχική προσέγγιση της πυκνότητας.

και

- Ελεγκτάθηκε η ισχύς της συσχέτισης για τις υποπεριοχές 2 και 6 [εξίσωση (4-21)] στις πιέσεις και τις θερμοκρασίες που καλύπτει η συσχέτιση για τις υποπεριοχές 3 και 5 [εξίσωση (4-25)]. Υπολογίσθηκε έτσι μία τιμή ανηγμένου ειδικού όγκου, που είναι καλή τιμή εκκίνησης για τη λύση της εξίσωσης (4-25) ως προς την αρχική προσέγγιση της πυκνότητας. Υπάρχουν πάντως περιοχές πιέσεων και θερμοκρασιών για τις οποίες η εξίσωση (4-21) δίνει αρνητικές ή άλλες εντελώς αδύνατες τιμές για τον ειδικό όγκο. Σε τέτοια περίπτωση αντί για την (4-21)

---

<sup>19</sup> Βλέπε και § 4.3.

χρησιμοποιείται στον κώδικα η καταστατική εξίσωση τελείου αερίου από την οποία προκύπτει μία τιμή ανηγμένου ειδικού όγκου, που είναι ικανοποιητική τιμή εκκίνησης για τη λύση της εξίσωσης (4-25) ως προς τη ζητούμενη αρχική προσέγγιση της πυκνότητας.

Οι παράγωγοι των πεπλεγμένων ως προς την πυκνότητα συσχετίσεων (4-25) και (4-26), οι οποίες είναι αναγκαίες για την εφαρμογή της μεθόδου Newton - Raphson, είναι δυνατόν να υπολογισθούν από αναλυτικές σχέσεις, οι οποίες αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσης  $\Delta\Delta$ , ως εξής:

$$\begin{aligned}
 (\partial P_{r3}/\partial v_r)_{T_r} = & - \left\{ \sum_{v=2}^{11} (v^2 - v) C_{0v} v_r^{v-1} - C_{012} v_r^{-2} \right\} - \\
 & - \left\{ \sum_{v=2}^6 (v^2 - v) C_{1v} v_r^{v-1} - C_{17} v_r^{-2} \right\} (T_r - 1) - \\
 & - \left\{ \sum_{v=2}^7 (v^2 - v) C_{2v} v_r^{v-1} - C_{28} v_r^{-2} \right\} (T_r - 1)^2 - \\
 & - \left\{ \sum_{v=2}^9 (v^2 - v) C_{3v} v_r^{v-1} - C_{310} v_r^{-2} \right\} (T_r - 1)^3 - \\
 & - 30 C_{41} v_r^{-7} T_r^{-23} (T_r - 1) - 30 v_r^{-4} \sum_{v=0}^4 C_{6v} T_r^{-2-v}
 \end{aligned} \tag{4-29}$$

Ακόμα:

$$\begin{aligned}
 (\partial P_{r4}/\partial v_r)_{T_r} = & (\partial P_{r3}/\partial v_r)_{T_r} - \sum_{\mu=3}^4 \sum_{v=1}^5 v(v-1) D_{\mu v} v_r^{v-1} - \\
 & - y^{32} \sum_{v=1}^3 (v-1)(v-2) D_{5v} v_r^{v3}
 \end{aligned} \tag{4-30}$$

#### 4.5 Υπολογισμός της θερμοκρασίας κορεσμού.

Στην περίπτωση που ζητείται να υπολογισθούν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος στην κατάσταση κορεσμού και το μόνο σχετικό δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού  $P_s$ , τότε πρέπει να επιλυθεί η εξίσωση κορεσμού<sup>20</sup>  $P_s = P_s(T_s)$ , ως προς τη θερμοκρασία κορεσμού  $T_s$ , προκειμένου να υπολογισθεί ακριβώς το ζεύγος πίεσης και θερμοκρασίας για το οποίο πρέπει να γίνουν οι υπολογισμοί των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος από τον κώδικα.

Για την λύση της εξίσωσης αυτής ως προς τη θερμοκρασία χρησιμοποιείται και πάλι η αριθμητική μέθοδος Newton - Raphson. Η απαραίτητη για τη μέθοδο παράγωγος ως προς τη θερμοκρασία της χρησιμοποιούμενης εξίσωσης κορεσμού δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} dP_s(T)/dT = P_s \exp \left\{ \left[ \sum_{v=1}^5 k_v (1 - T_r)^v \right] / \left[ T_r + k_6 (1 - T_r) T_r + \right. \right. \\ \left. \left. + k_7 (1 - T_r)^2 T_r \right] - (1 - T_r) / \left[ k_8 (1 - T_r)^2 + k_9 \right] \right\} \times \\ \times \left\{ A + B T_r^{-1} \left[ 1 + k_6 (1 - T_r) + k_7 (1 - T_r)^2 \right]^2 + C \right\} \end{aligned} \quad (4-31)$$

όπου οι σταθερές  $k_i$  δίνονται τόσο στο Κεφάλαιο 3 (σχέση 3-23) όσο και στο παρόν Κεφάλαιο (σχέση 4-28) και

$$\begin{aligned} A = -T_r^{-2} \sum_{v=1}^5 k_v (1 - T_r)^v \left[ 1 + k_6 (1 - T_r) + k_7 (1 - T_r)^2 \right]^{-1} \\ B = - \left[ 1 + k_6 (1 - T_r) + k_7 (1 - T_r)^2 \right] \sum_{v=1}^5 v k_v (1 - T_r)^{v-1} + \left[ k_6 + 2k_7 (1 - T_r) \right] \sum_{v=1}^5 k_v (1 - T_r)^v \\ C = \left\{ - \left[ k_8 (1 - T_r)^2 + k_9 \right] + 2k_8 (1 - T_r)^2 \right\} \left[ k_8 (1 - T_r)^2 + k_9 \right]^{-2} \end{aligned}$$

---

<sup>20</sup> Εξίσωση (3-23) § 3.3.3.

Όσο για την επίσης απαραίτητη αρχική τιμή της θερμοκρασίας κορεσμού που χρειάζεται η Newton - Raphson όταν εκκινεί, αυτή δίνεται ως συνάρτηση της πίεσης κορεσμού από κατάλληλη συσχέτιση η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης  $\Delta\Delta$  και έχει ως εξής:

$$T_s = a + b P_s^c \quad (4-32)$$

με

$$a = 219.88851$$

$$b = 146.70687$$

$$c = 0.19753$$

Τα χαρακτηριστικά αυτής της συσχέτισης, μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως:

Αριθμητική μέθοδος ανάλυσης αναδρομής που χρησιμοποιήθηκε:

#### *Αλγόριθμος Levenberg - Marquadt*

Συντελεστής πολλαπλής συσχέτισεως: **0.999**

Συντελεστής RMS: **0.9%**

Κατά την ανάπτυξη αυτής της συσχέτισης λήφθηκαν υπόψη και αναγκαίοι περιορισμοί που αφορούν στη με μικρό σφάλμα αναπαραγωγή των συνθηκών κορεσμού στο τριπλό και το κρίσιμο σημείο του ελαφρού ύδατος. Με βάση αυτούς τους περιορισμούς, οι οποίοι αφορούν στην εκτίμηση της αρχικής τιμής, προέκυψε ότι:

- Η υπολογιζόμενη αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας κορεσμού στο κρίσιμο σημείο αποκλίνει από την ψευδοκρίσιμη τιμή κατά **0.2%**.
- Η υπολογιζόμενη αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας κορεσμού στο τριπλό σημείο αποκλίνει από την πραγματική τιμή κατά **0.05%**. επισημαίνεται ότι η

πραγματική θερμοκρασία στο τριπλό σημείο είναι  $T_1 = 273.15 \text{ K}$  -για πίεση  $P_1 = 0.006 \text{ bar}$  -.

- Η μέγιστη απόκλιση της υπολογιζόμενης αρχικής εκτίμησης της θερμοκρασίας κορεσμού από την πραγματική τιμή φθάνει το **2%**.
- Η ελάχιστη απόκλιση της υπολογιζόμενης αρχικής εκτίμησης της θερμοκρασίας κορεσμού από την πραγματική τιμή φθάνει το **0.001%**.

Για τη δημιουργία της συσχέτισης αυτής με βάση τον αλγόριθμο Levenberg - Marquadt, χρησιμοποιήθηκαν περί τις 120 τιμές ζευγών πιέσεως κορεσμού - θερμοκρασίας κορεσμού ( $P_s, T_s$ ), τα οποία αναπαράχθηκαν με τυχαίο τρόπο χρησιμοποιώντας την εξίσωση κορεσμού (3-23). Η τυχειότητα της αναπαραγωγής εξασφαλίστηκε με κατάλληλη χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Λήφθηκε μέριμνα ώστε τα ζεύγη ( $P_s, T_s$ ) των οποίων η παραγωγή έγινε με αυτόν τον τρόπο, να καλύπτουν όσο το δυνατό με την ίδια πυκνότητα όλο το εύρος των πιέσεων και θερμοκρασιών κορεσμού του ελαφρού ύδατος από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο.

Η συσχέτιση της μορφής  $T_s = T_s(P_s)$  είναι κατάλληλη ώστε να τροφοδοτήσει την χρησιμοποιούμενη αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson με την απαιτούμενη αρχική τιμή της θερμοκρασίας κορεσμού με σκοπό να επιτευχθεί ο εύκολος και γρήγορος υπολογισμός-της από την εξίσωση κορεσμού (3-23). Επισημαίνεται ότι η συσχέτιση (4-32) έχει τη μορφή αντίστοιχων συσχετίσεων, οι οποίες παρουσιάστηκαν από τον Garland W.J. και τους συνεργάτες του<sup>21</sup> το διάστημα 1988 - 1992.

#### **4.6 Ο αριθμητικός κώδικας LIGHT\_WASP.**

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται η αναλυτική παρουσίαση του αριθμητικού κώδικα με το όνομα LIGHT\_WASP (LIGHT Water And Steam Properties), ο οποίος κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσης  $\Delta\Delta$ , με σκοπό να εξυπηρετήσει υπολογισμούς για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του ελαφρού ύδατος σε επίπεδο ακρίβειας κατάλληλο για βιομηχανική

---

<sup>21</sup> Βλέπε και Garland W.J. και Hoskins J.D., 1988, Garland W.J. και Hand B.J., 1989, Garland W.J. et al., 1992.

χρήση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για υπολογισμούς σε προβλήματα θερμοϋδραυλικής ανάλυσης Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος. Ο κώδικας LIGHT\_WASP συντάχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στον κώδικα αυτόν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες υπολογίζονται με βάση την καταστατική εξίσωση που ανέπτυξαν οι Keyes F.G. et al., 1968. Οι κυριότερες από τις ιδιότητες μεταφοράς υπολογίζονται από τις συσχετίσεις που παρουσιάζουν οι Sengers J.V. και Watson J.T.R., 1986. Το σύνολο των αναγκαίων συσχετίσεων και των άλλων εξισώσεων που υλοποιούνται προγραμματιστικά παρουσιάστηκαν ήδη με λεπτομέρεια τόσο στο 3<sup>ο</sup> όσο και στο παρόν Κεφάλαιο. Η περιοχή ισχύος του κώδικα LIGHT\_WASP εκτείνεται για θερμοκρασίες από το τριπλό σημείο μέχρι 1000 °C και για πιέσεις από 0 έως 1000 bar (εξαιρείται πολύ μικρή περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών γύρω από το κρίσιμο σημείο -βλέπε και την κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων στην προηγούμενη παράγραφο 4.3).

Ο κώδικας δέχεται ως είσοδο την πίεση ή/και την θερμοκρασία. Η έξοδος παρέχει τις τιμή του ειδικού όγκου, της ενθαλπίας, της εντροπίας, των ειδικών θερμοχωρητικότητων υπό σταθερή πίεση και υπό σταθερό όγκο, της ταχύτητας του ήχου, της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας, του συντελεστή Joule - Thomson, της συνεκτικότητας, της θερμικής αγωγιμότητας και της επιφανειακής τάσης.

Αν ο χρήστης του κώδικα επιθυμεί τις ιδιότητες του ελαφρού ύδατος σε κατάσταση κορεσμού για μια πίεση P, πρέπει να θέσει στην είσοδο όπου θερμοκρασία T την τιμή 0 (μηδέν). Αντίστροφα αν ο χρήστης επιθυμεί το ίδιο για μια θερμοκρασία T, πρέπει να θέσει στην είσοδο όπου πίεση P την τιμή 0 (μηδέν).

Ακολουθεί μια διεξοδική παρουσίαση των γενικών χαρακτηριστικών του κώδικα και των αναγκαίων οδηγιών χρήσεως. Οι οδηγίες χρήσεως συμπληρώνονται ορισμένες υποδείξεις σχετικά με τους τρόπους με τους οποίους ο χρήστης μπορεί να αντιμετωπίσει τα συννηθέστερα λάθη του. Όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα εξετάζονται στη συνέχεια κατά ομάδες ανάλογα και με τις λειτουργίες που αυτά διεκπεραιώνουν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του κώδικα, στην ουσία δηλαδή η ροή της εκτέλεσης ανάλογα και με τα ζητούμενα που καθορίζει ο χρήστης. Επιπλέον, συμπληρωματικά, εξετάζονται και ορισμένα άλλα μορφολογικά χαρακτηριστικά των υποπρογραμμάτων προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η

λειτουργία τους. Τέλος, επεξηγείται η δομική ευελιξία (code modular design) του κώδικα. Η συνολική παρουσίαση συνοδεύεται από συγκεντρωτικούς πίνακες που χρησιμεύουν ως περιληπτική αναφορά στα κυριότερα σημεία του κώδικα. Τέτοιιοι πίνακες συμβάλλουν όχι μόνο στην καλύτερη κατανόηση του κώδικα, αλλά και στην γρήγορη αναδρομή σε αυτούς όταν ζητείται κάποια λεπτομέρεια που ενδιαφέρει. Σημειώνεται ότι όλα τα επιμέρους υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα LIGHT\_WASP βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα Ι.

#### **4.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά του κώδικα.**

Ο κώδικας LIGHT\_WASP για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος είναι στην ουσία μια ομάδα υποπρογραμμάτων σχεδιασμένη για να χρησιμοποιείται ως υποπρόγραμμα στο πρόγραμμα του χρήστη. Τα υποπρογράμματα που συγκροτούν την ομάδα αυτή διακρίνονται σε:

- α) Υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου.
- β) Υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού.
- γ) Υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου
- δ) Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.
- ε) Υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς.
- στ) Υποπρογράμματα γενικών μαθηματικών υπολογισμών.
- ζ) Λοιπά υποπρογράμματα επικουρικής φύσεως.

Τα υποπρογράμματα αυτά υλοποιήθηκαν προγραμματιστικά με τη μορφή **υπορουτινών** (FORTRAN subroutines) και **συναρτήσεων** (FORTRAN functions). Υπάρχει ακόμα ένα **υποπρόγραμμα δεδομένων** (FORTRAN blockdata). Σημειώνεται ότι όλα τα υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα LIGHT\_WASP βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα Ι.

Συνοπτικά η λειτουργία του κώδικα μπορεί να περιγραφεί με τα ακόλουθα κύρια βήματα:



- Διαβάζεται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου σε bar και °C αντίστοιχα, καθώς και ένας ειδικός κλειδάριθμος (μία ακέραια μεταβλητή), η τιμή του οποίου καθορίζει για ποιες από τις διαθέσιμες θερμοφυσικές ιδιότητες θα γίνουν υπολογισμοί.
- Γίνεται έλεγχος αν η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου είναι συμβατές με την περιοχή ισχύος των υλοποιούμενων εξισώσεων για τις ιδιότητες.
- Υπολογίζεται η θερμοκρασία κορεσμού για την πίεση εισόδου, εκτός, φυσικά αν η τελευταία είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη πίεση, προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι συνθήκες εισόδου είναι κοντά στην κατάσταση κορεσμού.
- Υπολογίζεται ο ειδικός όγκος για την πίεση και τη θερμοκρασία εισόδου.
- Υπολογίζονται οι βασικές παράμετροι της χρησιμοποιούμενης καταστατικής εξίσωσης, δεδομένων της θερμοκρασίας εισόδου και του υπολογισθέντος ειδικού όγκου.
- Υπολογίζονται οι ζητούμενες με τον ειδικό κλειδάριθμο οι ζητούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες.
- Παρέχονται στον χρήστη τα αποτελέσματα.

Ο Πίνακας 4-7 παρουσιάζει τα σύμβολα, την ονοματολογία και τις μονάδες των βασικών μεταβλητών του κώδικα LIGHT\_WASP σε αλφαβητική σειρά. Ως βασικές μεταβλητές εννοούνται εδώ κυρίως τα καταστατικά μεγέθη και οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος καθώς και ορισμένες άλλες παράμετροι με τις οποίες ο χρήστης έρχεται σε άμεση επαφή. Τα σύμβολα των μεταβλητών συνοδεύονται από τις διαστάσεις τους σε μονάδες στις οποίες γίνεται η εισοδος ή η έξοδος. Σημειώνεται πάντως ότι ο κώδικας LIGHT\_WASP χρησιμοποιεί εσωτερικά σε αρκετά σημεία του και διαφορετικές μονάδες για το ίδιο μέγεθος ή ιδιότητα με σκοπό να εξυπηρετήσει ανάγκες τοπικών, εσωτερικών υπολογισμών.

## 4.6.2 Οδηγίες χρήσεως του κώδικα.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι απαραίτητες οδηγίες για τη σωστή κλήση και εκμετάλλευση του κώδικα LIGHT\_WASP από προγράμματα εφαρμογής του χρήστη<sup>22</sup>.

Η τυπική επικοινωνία του προγράμματος του χρήστη και του κώδικα αποκαθίσταται με την ακόλουθη ομάδα εντολών, οι οποίες περιέχουν τις μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους εισόδου / εξόδου<sup>23</sup>.

↓ *αυτή είναι η έβδομη στήλη*

7

**IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)**

**DOUBLE PRECISION IBMF, IBMG, JTCF, JTCCG, KF, KG, LACFG, MUF, MUG**

**COMMON/PROPERTY1/B2F, B3F, B4F, DB2F, DB3F, DB4F, UF, PSIF, HF, SF, CPF, CVF, \*IBMF, JTCF, GAMMAF, AF, MUF, KF, PRANDTLF**

**COMMON/PROPERTY2/B2G, B3G, B4G, DB2G, DB3G, DB4G, UG, PSIG, HG, SG, CPG, CVG, \*IBMG, JTCCG, GAMMAG, AG, MUG, KG, PRANDTLG**

**COMMON/PROPERTY3/HFG, SIGMAFG, LACFG**

**CALL LIGHT\_WASP (JS, JP, P, T, TS, SVF, SVG, JR, IS)**

Είναι:

JS, JP διακόπτες, ο ρόλος των οποίων περιγράφεται στη συνέχεια (μεταβλητές εισόδου)

P πίεση σε bar (μεταβλητή εισόδου)

T θερμοκρασία σε K (μεταβλητή εισόδου)

---

<sup>22</sup> Βλέπε και το παράδειγμα κυρίου προγράμματος εφαρμογής example.f στο Παράρτημα Ι.

<sup>23</sup> Βλέπε και το παράδειγμα κυρίου προγράμματος εφαρμογής example.f στο Παράρτημα Ι

TS θερμοκρασία κορεσμού στην πίεση P (σε K -μεταβλητή εξόδου)

SVF ειδικός όγκος υγρής ή υπερκρίσιμης φάσης (σε m<sup>3</sup>/kg -μεταβλητή εξόδου)

SVG ειδικός όγκος ατμών ή υπερκρίσιμης φάσης (σε m<sup>3</sup>/kg -μεταβλητή εξόδου)

JR, IS δείκτες (μεταβλητές εξόδου -παίρνουν τιμές με τρόπο που περιγράφεται στη συνέχεια)

Τα Common Blocks PROPERTY1, PROPERTY2 και PROPERTY3 περιέχουν τις υπόλοιπες μεταβλητές εξόδου. Οι μεταβλητές αυτές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4-7.

Για την επιτυχή κλήση του κώδικα πρέπει να τηρούνται δύο προϋποθέσεις:

1. Οι εντολές COMMON /PROPERTY... πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στο κυρίως πρόγραμμα του χρήστη ή στην υπορουτίνα του, η οποία καλεί τον κώδικα. Όλες οι μεταβλητές που περιέχονται στις εντολές COMMON πρέπει να δηλώνονται διπλής ακρίβειας (DOUBLE PRECISION). Οποσδήποτε επιτρέπεται στο χρήστη να αλλάξει τα ονόματα των μεταβλητών που εμφανίζονται στις εντολές COMMON/PROPERTY... καθώς και στην εντολή CALL LIGHT\_WASP(... κατά τον τρόπο που αυτός νομίζει ότι τον εξυπηρετεί. Προσοχή χρειάζεται ώστε να αποφευχθεί η χρησιμοποίηση των μεταβλητών που εμφανίζονται στις εντολές COMMON/PROPERTY... και CALL LIGHT\_WASP(... ως δείκτες για στοιχεία πινάκων.

2. Οι διακόπτες JS και JP, τις τιμές των οποίων παρέχει ο χρήστης, πληροφορούν τον κώδικα σχετικά με το ποιές μεταβλητές θα χρησιμοποιήσουν ως εισόδους και με το ποιες ιδιότητες ζητείται να αποτελέσουν την έξοδο. Πρέπει να πάρουν τις κατάλληλες αρχικές τιμές. Ο διακόπτης JS καθορίζει ποιες από τις μεταβλητές θερμοκρασία, πίεση, ειδικός όγκος, ενθαλπία ή εντροπία, ή ποιόν συνδυασμό τους ανά δύο θέλει ο χρήστης σαν είσοδο. Στην παρουσιαζόμενη έκδοση του κώδικα, η μόνη τιμή που επιτρέπεται να πάρει ο διακόπτης JS είναι η μονάδα ('1'), που αντιστοιχεί στα ζεύγη εισόδου (P,T), (P,0) και (0,T). Ο διακόπτης JP καθορίζει ποιες ιδιότητες ζητάει ο χρήστης να υπολογισθούν από τον κώδικα. Ο διακόπτης αυτός μπορεί να πάρει τις ακόριες τιμές από 0 έως και 63. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν κάποιο άθροισμα των αριθμών 0, 2, 4, 8, 16 και 32 -δηλαδή

ισοδύναμα των αριθμών  $0, 2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4$  και  $2^5$ . Κάθε τέτοιο δυαδικό άθροισμα εξυπηρετεί τον με μοναδικό τρόπο τον προσδιορισμό του συνδυασμού των ιδιοτήτων που ζητούνται. Ο Πίνακας 4-8 συνοψίζει ποιες ιδιότητες υπολογίζονται αν ο διακόπτης JP πάρει τις τιμές  $0, 2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4$  και  $2^5$ .

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η λειτουργία του διακόπτη JP δίνονται και τα ακόλουθα **παραδείγματα**:

Εστω JP = 63 (ισοδύναμα JP =  $0 + 1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 32 = 63$ ) τότε φανερό είναι ότι ο χρήστης ζητά τον υπολογισμό όλων των ιδιοτήτων που μπορεί να του δώσει ο κώδικας.

Εστω JP = 18 (ισοδύναμα JP =  $0 + 2 + 16 = 18$ ) τότε ο χρήστης ζητά μόνο τον υπολογισμό, της ενθαλπίας, της εντροπίας και της επιφανειακής τάσης.

Είναι φανερό ότι τα αθροίσματα-παραδείγματα 63 και 18 μπορούν να προκύψουν μόνο με μοναδικούς συνδυασμούς των διαθέσιμων αριθμών (0, 1, 2, 4, 8, 16, 32), πράγμα που εξασφαλίζει την σαφήνεια της επιλογής του χρήστη, όσο αφορά στις ιδιότητες του ελαφρού ύδατος που επιθυμεί να υπολογίσει.

Ο διακόπτης JP βοηθάει στην αύξηση της ταχύτητας με την οποία ο κώδικας LIGHT\_WASP υπολογίζει τις ζητούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος αφού από την αρχή της εκτελέσεως πληροφορεί ποιά από τα τμήματα του κώδικα θα παραμείνουν ανενεργά. Για μικρές τιμές του JP αυτό σημαίνει την αδρανιοποίηση μέχρι περίπου και του ενός τρίτου των εντολών του.

Εκτός από τους διακόπτες JS και JP και τις άλλες μεταβλητές εισόδου ο κώδικας περιέχει στη λίστα των παραμέτρων του και τους δείκτες JR και IS, οι οποίοι παίρνουν τιμές μόνο μετά από μια επιτυχημένη κλήση και εκτέλεση του κώδικα.

Ο δείκτης JR αποδίδει την περιοχή του διαγράμματος PT στην οποία βρίσκεται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου σύμφωνα και με το Διάγραμμα 4-2. Όπως αναπτύχθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, οι επιτρεπόμενες τιμές για το δείκτη JR είναι 1, 2, 3, 4, 5 και 6. Στην απίθανη περίπτωση που ο κώδικας επιστρέψει για τον δείκτη JR την τιμή 0 (μηδέν), σημαίνει ότι έχει αποτύχει για κάποιο λόγο να καθορίσει την περιοχή του διαγράμματος PT στην οποία βρίσκεται η πίεση και η

θερμοκρασία εισόδου που καθόρισε ο χρήστης. Τυπώνεται τότε σχετικό μήνυμα και η εκτέλεση σταματάει.

Ο δείκτης IS πληροφορεί το χρήστη σε τι σχέση βρίσκονται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου που καθόρισε, ως προς την κατάσταση κορεσμού για την πίεση εισόδου. Παίρνει τις τιμές 0,1 και 2. Ο Πίνακας 4-9 εξηγεί αναλυτικά τι σημαίνει κάθε τιμή του δείκτη IS.

Όλες οι πιο πάνω πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του κώδικα LIGHT\_WASP παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4-10.

#### **4.6.3 Αντιμετώπιση λαθών (troubleshooting).**

Ο τρόπος με τον οποίο είναι κατασκευασμένος ο κώδικας LIGHT\_WASP αντιμετωπίζει τα συνήθη λάθη που τυχόν συμβαίνουν κατά την κλήση του. Αυτά τα λάθη ανιχνεύονται και μπορούν να διορθωθούν σχετικά εύκολα. Αναλυτικότερα:

1. Αν δεν καθορισθεί σωστά ο διακόπτης JS (πρέπει JS=1) τυπώνεται σχετικό μήνυμα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου του χρήστη, στον υπολογιστή που αυτός εργάζεται και η εκτέλεση σταματάει.
2. Αν δεν καθορισθεί σωστά ο διακόπτης JP (πρέπει ο JP να είναι μεταξύ του 0 και του 63) τυπώνεται σχετικό μήνυμα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου του χρήστη, όπως προηγούμενα και η εκτέλεση σταματάει.
3. Αν οι τιμές των P,T βρίσκονται έξω από την περιοχή ισχύος τυπώνεται ομοίως μήνυμα και η εκτέλεση σταματάει.
4. Αν ζητείται μια κατάσταση κορεσμού αλλά από λάθος η πίεση ή η θερμοκρασία εισόδου είναι υπερκρίσιμες τυπώνεται ομοίως μήνυμα και η εκτέλεση σταματάει.
5. Αν η σύνταξη της απαραίτητης για την κλήση του κώδικα ομάδας εντολών, δηλαδή των IMPLICIT..., DOUBLE PRECISION..., COMMON /PROPERTY... και CALL LIGHT\_WASP(...), είναι εσφαλμένη τότε καταλαβαίνει κανείς, ότι υπάρχει μια ποικιλία λαθών που μπορεί να συμβεί, τα περισσότερα των οποίων είναι βέβαια μοιραία (fatal) και η εκτέλεση σταματάει. Συνήθως τότε τυπώνεται και κατάλληλο μήνυμα λάθους που προέρχεται όμως από τον ίδιο τον υπολογιστή και όχι από τον κώδικα.

Λοιπά μηνύματα που μπορεί να εμφανισθούν κατά την εκτέλεση του κώδικα είναι αυτοεξηγούμενα.

## 4.7 Τα υποπρογράμματα του κώδικα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα υποπρογράμματα του κώδικα LIGHT\_WASP μπορούν να διακριθούν σε υποπρογράμματα:

- εισόδου - εξόδου,
- υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού,
- υπολογισμού του ειδικού όγκου δεδομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου,
- υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων,
- υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς,
- μαθηματικών υπολογισμών και τέλος
- άλλα επικουρικά υποπρογράμματα<sup>24</sup>.

Στη συνέχεια θα περιγραφούν με συνοπτικό τρόπο όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα κατατεσσόμενα κατά την πομπάνω κατηγοριοποίηση.

### 4.7.1 Υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου.

Τα υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες LIGHT\_WASP, CHECKPT και οι συνεργαζόμενες συναρτήσεις FPS και PRL.

#### 4.7.1.1 Υπορουτίνα LIGHT\_WASP(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS).

Είναι το υποπρόγραμμα που πρέπει να κληθεί από το πρόγραμμα του χρήστη αν αυτός θέλει να χρησιμοποιήσει τον κώδικα. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτή η κλήση ήδη παρουσιάσθηκε στην § 4.6.2. Η υπορουτίνα αποτελείται από μια ομάδα εντολών που φροντίζει κυρίως για την ομαλή είσοδο στον κώδικα και την ομαλή έξοδο από αυτόν. Εκεί ελέγχεται η ορθότητα των τιμών των διακοπών JS και JP, δίνεται η εντολή για τον έλεγχο της ορθότητας της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου, αρχικοποιούνται οι τιμές όλων των ιδιοτήτων στο μηδέν και συντονίζονται οι κυριότερες λειτουργίες του κώδικα. Κατά τη διαδικασία εξόδου και μέσω της

λίστας παραμέτρων η υπορουτίνα LIGHT\_WASP πληροφορεί το πρόγραμμα του χρήστη για τις τιμές που παίρνει ο ειδικός όγκος του υγρού (SVF σε  $m^3/kg$ ) ή/και ο ειδικός όγκος του ατμού (SVG σε  $m^3/kg$ ) του ελαφρού ύδατος για το ζεύγος πιέσεως - θερμοκρασίας, στο οποίο ζητήθηκε να γίνουν υπολογισμοί.

#### **4.7.1.2 Υπορουτίνα CHECKPT(TS, JR, IS).**

Όπως φαίνεται και από το όνομά της πρόκειται για την υπορουτίνα στην οποία το υποπρόγραμμα LIGHT\_WASP αναθέτει τον έλεγχο της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου. Η υπορουτίνα μετατρέπει τις μονάδες της πίεσης και της θερμοκρασίας από bar και °C σε MPa και K αντίστοιχα, προκειμένου να διευκολύνονται οι υπολογισμοί στον κώδικα. Υπολογίζεται η πίεση κορεσμού αν το μόνο δεδομένο είναι η θερμοκρασία κορεσμού TS με χρήση της συνάρτησης FPS. Υπολογίζεται αντίστροφα η θερμοκρασία κορεσμού TS αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού, με χρήση των συναρτήσεων FPS, DFPS, FTS και της μαθηματικής υπορουτίνας SOLVE. Αποφασίζεται επίσης εκεί η τιμή της μεταβλητής εξόδου JR σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στον Πίνακα 4-1 και με τη βοήθεια της συνάρτησης PRL, καθώς και η τιμή της μεταβλητής εξόδου IS σύμφωνα με όσα αναφέρονται στον Πίνακα 4-9.

#### **4.7.1.3 Συνάρτηση FPS(TS).**

Είναι η υλοποίηση της εξίσωσης κορεσμού του ελαφρού ύδατος [σχέση (3-23)] η οποία χρησιμοποιείται από την υπορουτίνα CHECKPT για τον υπολογισμό της πίεσης κορεσμού FPS σε MPa δεδομένης της θερμοκρασίας κορεσμού TS σε K.

#### **4.7.1.4 Συνάρτηση PRL(TR).**

Είναι η υλοποίηση της εξίσωσης (4-19) που αναπαριστά το όριο μεταξύ των υποπεριοχών όπου JR = 2 και JR = 3 για καταστάσεις της υπερκρίσιμης φάσης. PRL είναι η ανηγμένη πίεση, TR είναι η ανηγμένη θερμοκρασία. Χρησιμοποιείται από την υπορουτίνα CHECKPT, προκειμένου να αποφασισθεί η τιμή του δείκτη JR.

---

<sup>24</sup> Όλα τα υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα LIGHT\_WASP βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα 1

### **4.7.2 Υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού.**

Η θερμοκρασία κορεσμού TS υπολογίζεται, αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού, με χρήση των συναρτήσεων FPS, DFPS, FTS και της μαθηματικής υπορουτίνας SOLVE.

#### **4.7.2.1 Συνάρτηση FTS(PP).**

Είναι η υλοποίηση της συσχέτισης (4-32) η οποία αναπτύχθηκε στην παρούσα  $\Delta\Delta$  με σκοπό τον υπολογισμό αρχικών εκτιμήσεων για τη θερμοκρασία κορεσμού σε K ως συνάρτηση της πίεσης κορεσμού σε bar. Οι εκτιμήσεις αυτές είναι απαραίτητες για την επίλυση της εξίσωσης κορεσμού (3-23) -όπως αυτή υλοποιείται στη συνάρτηση FPS, ως προς τη θερμοκρασία με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson -όπως αυτή υλοποιείται στο μαθηματική υπορουτίνα SOLVE. FTS είναι η θερμοκρασία κορεσμού σε K. PP είναι η πίεση σε MPa.

#### **4.7.2.2 Συνάρτηση DFPS(TS).**

Είναι η υλοποίηση της παραγώγου (4-31) της εξίσωσης κορεσμού (3-23) ως προς τη θερμοκρασία, απαραίτητη για την επίλυση της εξίσωσης (3-23) ως προς τη θερμοκρασία κορεσμού TS, όταν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού δεδομένου ότι χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Newton - Raphson. Η μέθοδος Newton - Raphson υλοποιείται στην μαθηματική υπορουτίνα SOLVE.

### **4.7.3 Υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου.**

Τα υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου δεδομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες DENSF, DENSJ, SVLWL, SVLWV και QMUST και οι συνεργαζόμενες συναρτήσεις FPR4, DFPR4, FPR3, DFPR3, FP και DFPD.

Τονίζεται ότι αυτή η ομάδα των υποπρογραμμάτων υπολογίζει τον ειδικό όγκο του ελαφρού ύδατος ακόμα και ακριβώς στο κρίσιμο σημείο και φυσικά σε όλη την περιοχή που γειτνιάζει με αυτό, παρόλο που η καταστατική εξίσωση που χρησιμοποιείται στον κώδικα δεν θεωρείται ακριβής γύρω από το ζεύγος ( $P_c, T_c$ ). Αυτό έγινε διότι για το σαφή καθορισμό των ορίων της γειτονιάς του κρίσιμου σημείου για την οποία ο κώδικας δεν ισχύει είναι απαραίτητο να είναι γνωστές όχι



μόνο οι οριακές πιέσεις και θερμοκρασίες αλλά και οι οριακές πυκνότητες. Η προγραμματιστική προσπάθεια για τον υπολογισμό της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος στο κρίσιμο σημείο απαιτήσε τη σύνταξη των υποπρογραμμάτων FPR3, DFPR3, FPR4 και DFPR4.

#### **4.7.3.1 Υπορουτίνα DENSF(DF).**

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου στο υποπρόγραμμα CHECKPT και αν η μεταβλητή JR έχει την τιμή 1, 4, 5 ή 6 το υποπρόγραμμα LIGHT\_WASP αναθέτει στο υποπρόγραμμα DENSF να υπολογίσει την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος DF σε  $\text{g/cm}^3$  στις αντίστοιχες της JR υποπεριοχές (υγρή φάση, κορεσμένο υγρό, μέρος της υπερκρίσιμης φάσης).

#### **4.7.3.2 Υπορουτίνα DENS( DG).**

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου στο υποπρόγραμμα CHECKPT και αν η μεταβλητή JR έχει την τιμή 2, 3, 5 ή 6 το υποπρόγραμμα LIGHT\_WASP αναθέτει στο υποπρόγραμμα DENS( DG να υπολογίσει την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος DG σε  $\text{g/cm}^3$  στις αντίστοιχες της JR υποπεριοχές (ατμώδης φάση, κορεσμένος ατμός, μέρος της υπερκρίσιμης φάσης).

#### **4.7.3.3 Υπορουτίνα SVLWL(DL).**

Το υποπρόγραμμα αυτό καλείται από την υπορουτίνα DENSF και χρησιμεύει για τον υπολογισμό της αρχικής εκτίμησης DL της πυκνότητας σε  $\text{g/cm}^3$  στις υποπεριοχές 1, 4, 5, ή 6 χρησιμοποιώντας κυρίως τις σχέσεις (4-18) και (4-26). Στη συνέχεια, η αρχική εκτίμηση DL χρησιμοποιείται από την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson, που εφαρμόζεται για την επίλυση της καταστατικής εξίσωσης (3-7) της μορφής  $P = P(\rho, T)$  ως προς την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος. Η μέθοδος Newton - Raphson υλοποιείται στη μαθηματική υπορουτίνα SOLVE.

#### **4.7.3.4 Συνάρτηση FPR4(X4).**

Είναι η υλοποίηση της εξίσωσης (4-26) απαραίτητης για τον υπολογισμό της αρχικής εκτίμησης της πυκνότητας DL για τις υποπεριοχές 4 και 5 (για την επίλυση της ως προς τη πυκνότητα χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Newton - Raphson). FPR4

είναι η ανηγμένη πίεση  $P_r$ . X4 είναι ο ανηγμένος ειδικός όγκος (το αντίστροφο της ανηγμένης πυκνότητας).

#### **4.7.3.5 Συνάρτηση DFPR4(X4).**

Είναι η υλοποίηση της παραγωγού (4-30) της εξίσωσης (4-26) ως προς την πυκνότητα. Η παράγωγος αυτή είναι απαραίτητη για την επίλυση της εξίσωσης (4-26) ως προς την πυκνότητα με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson.

#### **4.7.3.6 Υπορουτίνα SVLWV(DV).**

Το υποπρόγραμμα αυτό καλείται από την υπορουτίνα DENSQ και χρησιμεύει για τον υπολογισμό της αρχικής εκτίμησης DV της πυκνότητας σε  $\text{g/cm}^3$  στις υποπεριοχές 2, 3, 5, ή 6, χρησιμοποιώντας κυρίως τις σχέσεις (4-21) και (4-25). Στη συνέχεια, η αρχική εκτίμηση DV χρησιμοποιείται από την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson, που εφαρμόζεται για την επίλυση της καταστατικής εξίσωσης (3-7) της μορφής  $P = P(\rho, T)$  ως προς την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος. Η μέθοδος Newton - Raphson υλοποιείται στη μαθηματική υπορουτίνα SOLVE.

#### **4.7.3.7 Συνάρτηση FPR3(X3).**

Είναι η υλοποίηση της εξίσωσης (4-25) απαραίτητης για τον υπολογισμό της αρχικής εκτίμησης της πυκνότητας DV για τις υποπεριοχές 3 και 5 (για την επίλυση της ως προς τη πυκνότητα χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Newton - Raphson). FPR3 είναι η ανηγμένη πίεση  $P_r$ . X3 είναι ο ανηγμένος ειδικός όγκος (το αντίστροφο της ανηγμένης πυκνότητας).

#### **4.7.3.8 Συνάρτηση DFPR3(X3).**

Είναι η υλοποίηση της παραγωγού (4-29) της εξίσωσης (4-25) ως προς την πυκνότητα. Η παράγωγος αυτή είναι απαραίτητη για την επίλυση της εξίσωσης (4-25) ως προς την πυκνότητα με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson.

#### **4.7.3.9 Συνάρτηση FP(DD).**

Είναι η υλοποίηση της καταστατικής εξίσωσης (3-7)  $P = P(\rho, T)$  όπως αυτή χρησιμοποιείται από την μαθηματική υπορουτίνα SOLVE προκειμένου να επιλυθεί ως προς την πυκνότητα με χρήση της αριθμητικής μεθόδου Newton - Raphson. FP

είναι η πίεση σε MPa. DD είναι η πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>. Για τον υπολογισμό της ποσότητας Q και της ποσότητας  $(\partial Q/\partial p)_t$ , οι οποίες είναι απαραίτητες για την εξίσωση (3-7) χρησιμοποιείται η υπορουτίνα QMUST.

#### 4.7.3.10 Συνάρτηση DFPD(DD).

Είναι η υλοποίηση της παραγωγού (4-1) της καταστατικής εξίσωσης (3-7)  $P = P(\rho, T)$  ως προς την πυκνότητα. Η παράγωγος αυτή είναι απαραίτητη για την επίλυση της εξίσωσης (3-7) ως προς την πυκνότητα με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson. Η μέθοδος Newton - Raphson υλοποιείται στην μαθηματική υπορουτίνα SOLVE. Για τον υπολογισμό των ποσοτήτων  $Q$ ,  $(\partial Q/\partial p)_t$  και  $(\partial^2 Q/\partial p^2)_t$ , οι οποίες είναι απαραίτητες για την εξίσωση (4-1) χρησιμοποιείται η υπορουτίνα QMUST.

#### 4.7.3.11 Υπορουτίνα QMUST.

Πρόκειται για ένα από τα βασικότερα υποπρογράμματα του κώδικα. Ασχολείται με τον υπολογισμό των απαραίτητων ποσοτήτων  $Q$ ,  $(\partial Q/\partial t)_p$  (μεταβλητή QTD),  $(\partial Q/\partial p)_t$  (μεταβλητή QDT),  $\partial^2 Q/(\partial p \partial t)$  (μεταβλητή Q2DT),  $(\partial^2 Q/\partial p^2)_t$  (μεταβλητή Q2D2T) και  $(\partial^2 Q/\partial^2 t)_p$  (μεταβλητή Q2T2D). Επίσης προσδιορίζει την ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς  $\psi_0$  (μεταβλητή PSIO), την παράγωγο  $d(\psi_0)/dT$  (μεταβλητή PSIOI), την παράγωγο  $d^2(\psi_0)/dT^2$  (μεταβλητή PSIO2T2), την παράγωγο  $\equiv (\partial P_r/\partial T_r)_{p_r}$  (μεταβλητή PRTRDR) και τέλος την ποσότητα  $\rho_r$   $(\partial \rho_r/\partial P_r)_{T_r}$  (μεταβλητή XTR). Γίνεται χρήση των εξισώσεων (3-5), (4-7), (4-8), (4-9), (4-10), (4-11), (4-12) και (4-17) αντίστοιχα.

#### 4.7.4 Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.

Τα υποπρογράμματα υπολογισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες TOTAL, ENERGY, ENTHALPY, ENTROPY, SHP, SHV, SHR\_SOLVE και IBM\_JTC.

##### 4.7.4.1 Υπορουτίνα TOTAL(JP,U,H,S,B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4, CP,CV,IBM,JTC,GAMMA,A,MU,K,PRANDTL,SIGMA).

Όταν υπολογισθεί η πυκνότητα του ελαφρού ύδατος, το υποπρόγραμμα LIGHT\_WASP καλεί το υποπρόγραμμα TOTAL, το οποίο με τη σειρά του αναθέτει σε διάφορα μικρότερα υποπρογράμματα -η σύντομη περιγραφή των οποίων

ακολουθεί τον υπολογισμό των ζητούμενων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων μεταφοράς του ελαφρού ύδατος ανάλογα με την τιμή του διακόπτη JP. Πολλές από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος απαιτούν κοινούς υπολογισμούς διαφόρων ποσοτήτων. Οι υπολογισμοί αυτοί γίνονται από την υπορουτίνα QMUST και κοινοποιούνται στα υποπρογράμματα που τους χρειάζονται μέσω εντολών COMMON.

#### **4.7.4.2 Υπορουτίνα ENERGY(U).**

Υπολογίζει την ειδική εσωτερική ενέργεια U [σχέσεις (3-9) και (4-16)] και την ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια PSI [σχέση (3-1)] του ελαφρού ύδατος σε kJ/kg.

#### **4.7.4.3 Υπορουτίνα ENTHALPY(H).**

Υπολογίζει την ειδική ενθαλπία H του ελαφρού ύδατος σε kJ/kg [σχέσεις (3-13) και (4-16)].

#### **4.7.4.4 Υπορουτίνα ENTROPY(S).**

Υπολογίζει την ειδική εντροπία S του ελαφρού ύδατος σε kJ/(kgK) [σχέση (3-11)].

#### **4.7.4.5 Υπορουτίνα SHP(CP).**

Υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση (Specific Heat at Constant Pressure) CP σε kJ/(kgK) [σχέση (3-15) -με τη βοήθεια και των σχέσεων (4-1), (4-2), (4-3), (4-4) και (4-5)].

#### **4.7.4.6 Υπορουτίνα SHV(CV).**

Υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο (Specific Heat at Constant Volume) CV σε kJ/(kgK) [σχέση (3-17)].

#### **4.7.4.7 Υπορουτίνα SHR\_SOVE(GAMMA,A).**

Υπολογίζει το λόγο των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων (Specific Heat Ratio) GAMMA =  $c_p/c_v$  και την ταχύτητα του ήχου (Sonic Velocity) A σε m/sec. Χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3-18) και (3-22) αντίστοιχα.

#### **4.7.4.8 Υπορουτίνα IBM\_JTC(IBM,JTC).**

Υπολογίζει την ισοθερμοκρασιακή συμπιεστικότητα (Isothermal Bulk Modulus) IBM σε MPa<sup>-1</sup> και τον συντελεστή Joule - Thomson (Joule - Thomson Coefficient) JTC σε K/MPa. Χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3-20) και (3-21) αντίστοιχα.

#### **4.7.5 Υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς.**

Τα υποπρογράμματα υπολογισμού των ιδιοτήτων μεταφοράς του ελαφρού ύδατος είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες VISCOSITY, CONDUCTIVE και TENSION.

##### **4.7.5.1 Υπορουτίνα VISCOSITY(MU).**

Υπολογίζει τη δυναμική συνεκτικότητα MU του ελαφρού ύδατος σε kg/(ms) [σχέση (3-32)].

##### **4.7.5.2 Υπορουτίνα CONDUCTIVE(K).**

Υπολογίζει τη θερμική αγωγιμότητα K του ελαφρού ύδατος σε W/(mK) [σχέση (3-35)].

##### **4.7.5.3 Υπορουτίνα TENSION(SIGMA).**

Υπολογίζει την επιφανειακή τάση SIGMA μεταξύ υγρού και ατμού σε N/m [σχέση (3-39)].

#### **4.7.6 Υποπρογράμματα μαθηματικών υπολογισμών.**

Το μοναδικό υποπρόγραμμα μαθηματικών υπολογισμών είναι η υπορουτίνα SOLVE.

##### **4.7.6.1 Υπορουτίνα SOLVE(F,DF,EPS,NDEC,X,ITMAX,IER).**

Είναι η υλοποίηση της αριθμητικής μεθόδου Newton - Raphson. Υπολογίζει την πραγματική ρίζα X (μεταβλητή εξόδου) μιας πραγματικής συνάρτησης F (function εισόδου) δεδομένης μιας καλής αρχικής εκτίμησης X (μεταβλητή εισόδου) και της πρώτης μερικής παραγώγου DF (function εισόδου) της F ως προς την X. Μία ρίζα X γίνεται αποδεκτή αν η απόλυτη τιμή της F(X) γίνει μικρότερη ή ίση με EPS (μεταβλητή εισόδου - η EPS βρίσκεται στη γειτονιά του μηδενός). Εναλλακτικά, μία ρίζα X γίνεται αποδεκτή αν φθάσουν δύο διαδοχικές εκτιμήσεις της να συμφωνούν

στα πρώτα NDEC (μεταβλητή εισόδου) δεκαδικά τους ψηφία. ITMAX (μεταβλητή εισόδου) είναι ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων Newton - Raphson για την εύρεση μιας ρίζας. IER (μεταβλητή εξόδου) είναι μία προειδοποιητική παράμετρος για λάθη. Όταν IER = 1 σημαίνει ότι η ζητούμενη ρίζα δεν μπορεί να βρεθεί επειδή η παράγωγος DF "πλησίασε" πολύ την τιμή μηδέν, τότε στη X δίνεται η τιμή 11111. Όταν IER = 2 σημαίνει ότι η ζητούμενη ρίζα δεν μπορεί να βρεθεί διότι καλύφθηκε ο επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων ITMAX, τότε στη X δίνεται η τιμή 22222. Όταν IER = 3 σημαίνει ότι συνέβησαν και τα δύο προηγούμενα λάθη, τότε στη X δίνεται είτε η τιμή 11111 είτε η τιμή 22222.

#### **4.7.7 Άλλα επικουρικά υποπρογράμματα.**

##### **4.7.7.1 Υποπρόγραμμα δεδομένων CONSTANTS.**

Είναι ένα FORTRAN blockdata στο οποίο εμπεριέχονται οι περισσότερες από τις σταθερές που είναι απαραίτητες για τις διάφορες συζητήσεις που υλοποιούνται στον κώδικα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις σταθερές συμπεριλαμβάνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες πιέσεις και θερμοκρασίες για τις οποίες λειτουργεί ο κώδικας, τα κρίσιμα καταστατικά μεγέθη και άλλες σταθερές που αφορούν την ουσία "ελαφρύ ύδωρ", τα όρια των υποπεριοχών με βάση τα οποία καθορίζεται η μεταβλητή JR κά. Σημειώνεται ότι στο υποπρόγραμμα αυτό δίνονται μόνο σταθερές που κατά κανόνα χρησιμοποιούνται σε περισσότερα από ένα υποπρογράμματα (υπάρχουν μικρές εξαιρέσεις).

##### **4.7.7.2 Κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE και συγκριτικά αποτελέσματα.**

Στο Παράρτημα I συμπεριλαμβάνεται, εκτός των υποπρογραμμάτων του κώδικα LIGHT\_WASP και ένα κυρίως πρόγραμμα εφαρμογής-πράδειγμα ειδικά για να κατανοήσει ο χρήστης του κώδικα πως πρέπει να καλεί το υποπρόγραμμα LIGHT\_WASP. Το κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE παρέχει και μία στοιχειώδη έξοδο για τις περισσότερες από τις ιδιότητες του ελαφρού ύδατος που είναι δυνατόν να υπολογισθούν από τον κώδικα LIGHT\_WASP, για ένα ζεύγος πίεσης - θερμοκρασίας. Ο Πίνακας 4-11 παρουσιάζει ένα μικρό απόσπασμα των αποτελεσμάτων του κώδικα στην περιοχή του υπέρθερμου υδρατμού, για τρεις πιέσεις 4.0, 4.2, και 4.4 bar και 25 θερμοκρασίες (από 250 έως 490 °C, βήμα 10 °C).

Περιλαμβάνονται μόνο τα αποτελέσματα για τον ειδικό όγκο, την ειδική ενθαλπία και την ειδική εσωτερική ενέργεια. Ο Πίνακας 4-12 περιέχει το ίδιο απόσπασμα των αποτελεσμάτων όπως αυτό δίνεται από τους "Πίνακες Ιδιότητων Νερού – Υδρατμού" των Schmidt E. και Griggull U., 1987. Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα των δύο πινάκων συμφωνούν. Μικρές διαφορές στο τελευταίο δεκαδικό ψηφίο οφείλονται στο ότι ο κώδικας LIGHT\_WASP υπολογίζει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος από διαφορετική καταστατική εξίσωση από εκείνη που χρησιμοποιούν οι Schmidt E. και Griggull U. Στο Παράρτημα I, στην παράγραφο I.3, δίνονται συμπληρωματικά και αποτελέσματα με βάση το κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE, όπως ακριβώς αυτά λαμβάνονται στην οθόνη του Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.

#### 4.8 Λειτουργία του κώδικα LIGHT\_WASP.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η δομή και η στρατηγική του κώδικα LIGHT\_WASP σε βήματα τα οποία αναλύονται με λεπτομέρεια.

1. Ο κώδικας δέχεται σαν είσοδο την πίεση P σε bar και τη θερμοκρασία T σε βαθμούς Κελσίου. Τα δεδομένα αυτά πρέπει να βρίσκονται μέσα στην περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών για τις οποίες ισχύει ο κώδικας.

Ο κώδικας αποδίδει στην έξοδο τα ακόλουθα μεγέθη (οι μονάδες τους δηλώνονται σε αγκύλες [.] )

$P_s$	Πίεση κορεσμού αντίστοιχη στην θερμοκρασία T [bar]
$T_s$	Θερμοκρασία κορεσμού αντίστοιχη στην πίεση P [°C]
v	Ειδικός όγκος [ $m^3/kg$ ]
u	Ειδική εσωτερική ενέργεια [kJ/kg]
$\psi$	Ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια [kJ/kg]
h	Ειδική ενθαλπία [kJ/kg]
s	Ειδική εντροπία [kJ/(kgK)]
$c_p$	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση [kJ/(kgK)]
$c_v$	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο [kJ/(kgK)]
$\gamma$	Συντελεστής ισεντροπικής εκτόνωσης $c_p/c_v$
a	Ταχύτητα του ήχου [m/sec]
$\mu$	Συντελεστής Joule - Thomson [K/MPa]

κ <sub>T</sub>	Ισοθερμοκρασιακή συμπεστικότητα [MPa <sup>-1</sup> ]
η	Δυναμική συνεκτικότητα kg/(ms)
λ	Θερμική αγωγιμότητα W/(mK)

2. Η πρώτη κίνηση που κάνει ο κώδικας είναι να διαπιστώσει αν οι παράμετροι κλήσεως του έχουν διατυπωθεί με ορθότητα και αν έχουν πάρει αποδεκτές τιμές<sup>25</sup>. Αν αυτό δεν συμβαίνει η εκτέλεση σταματάει και τυπώνονται σχετικά μηνύματα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου του χρήστη.

3. Στη συνέχεια ο κώδικας αναθέτει στην υπορουτίνα CHECKPT να ελέγξει εάν η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου βρίσκονται μέσα στην περιοχή για την οποία αυτός μπορεί να λειτουργήσει. Αν η πίεση εισόδου έχει την τιμή 0 (ζητείται δηλαδή μια κατάσταση κορεσμού) ελέγχεται αν η θερμοκρασία εισόδου βρίσκεται στο διάστημα στο οποίο υπάρχουν καταστάσεις κορεσμού. Στην περίπτωση που ο έλεγχος είναι θετικός ανατίθεται στην function FPS να υπολογίσει την πίεση κορεσμού του ελαφρού ύδατος [εξίσωση (3-23)]. Αν η θερμοκρασία εισόδου έχει την τιμή 0 (ζητείται δηλαδή και πάλι μια κατάσταση κορεσμού) ελέγχεται αν η πίεση εισόδου βρίσκεται στο διάστημα στο οποίο υπάρχουν καταστάσεις κορεσμού. Αν και εδώ είναι θετικός ο έλεγχος καλείται η function FTS [συσχέτιση (4-32)] με σκοπό να υπολογισθεί μία αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας κορεσμού (TS) του ελαφρού ύδατος σε συνάρτηση με την πίεση κορεσμού. Στη συνέχεια δίνεται εντολή στην υπορουτίνα SOLVE να λύσει την εξίσωση κορεσμού  $P_s = P_s(T_s)$  του βαρέος ύδατος [σχέση (3-23) στη function FPS] ως προς την ακριβή θερμοκρασία κορεσμού χρησιμοποιώντας ως τιμή εκκίνησης για την εύρεση της λύσης την προηγούμενη αρχική εκτίμηση και βέβαια την παράγωγο της εξίσωσης  $P_s = P_s(T_s)$  ως προς τη θερμοκρασία [σχέση (4-31), function DFPS]. Με καθορισμένη την πίεση και την θερμοκρασία εξακριβώνεται πόσο κοντά είναι η κατάσταση εισόδου σε κάποια κατάσταση κορεσμού (το κριτήριο είναι πόσο κοντά είναι η θερμοκρασία εισόδου στη θερμοκρασία κορεσμού για την πίεση εισόδου -καθορίζεται ο δείκτης IS<sup>26</sup>). Υπολογίζονται η ανηγμένη πίεση  $P_r$  (PR) και η ανηγμένη θερμοκρασία  $T_r$  (TR).

<sup>25</sup> Βλέπε τον Πίνακα 4-10 και την υπορουτίνα LIGHT\_WASP.

<sup>26</sup> Βλέπε και τον Πίνακα 4-9.



Με τη βοήθειά τους και με τη χρησιμοποίηση των υποπρογραμμάτων function FPS [σχέση (3-23)] και function PRL [σχέση (4-24)] που καθορίζουν τα όρια των υποπεριοχών προσδιορίζεται ακριβώς η υποπεριοχή του διαγράμματος PT στην οποία βρίσκεται η πίεση και η θερμοκρασία που επιλέχθηκαν σαν είσοδος για τον κώδικα<sup>27</sup>. Με την ολοκλήρωση αυτών των διεργασιών η υπορουτίνα CHECKPT έχει ενημερώσει τις COMMON εντολές επικοινωνίας

COMMON/K1/PP,PR (PP πίεση σε bar)

COMMON/K2/TT,TR (TT θερμοκρασία σε K)

και τη λίστα παραμέτρων (TS, JR, IS)

και επιστρέφει τον έλεγχο στην υπορουτίνα LIGHT\_WASP.

4. Η υπορουτίνα LIGHT\_WASP ενημερώνει με τη σειρά της την COMMON εντολή επικοινωνίας COMMON/K4/J (J = JR) και ανάλογα με την τιμή που έχει πάρει ακριβώς ο δείκτης JR η υπορουτίνα LIGHT\_WASP αναθέτει είτε στην υπορουτίνα DENSF, είτε στην υπορουτίνα DENSF, είτε και στις δύο αυτές υπορουτίνες αν πρόκειται για την κατάσταση κορεσμού, να υπολογίσουν την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος.

5. Στην περίπτωση που καλείται η υπορουτίνα DENSF επιδιώκεται να υπολογισθεί η πυκνότητα του ελαφρού ύδατος στην υγρή φάση, σε καταστάσεις κορεσμένου υγρού και σε ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης (εκείνου που φαίνεται να είναι συνέχεια της υγρής φάσεως). Η υπορουτίνα DENSF καλεί με τη σειρά της την υπορουτίνα SVLWL. Στην τελευταία έχει ανατεθεί ο υπολογισμός μιας πρώτης προσέγγισης για την πυκνότητα (DL σε  $g/cm^3$ ) του ελαφρού ύδατος αποκλειστικά για τις υποπεριοχές που απασχολούν την υπορουτίνα DENSF (πρόκειται για αυτές που χαρακτηρίζονται από τις τιμές 1,4,5 και 6 του δείκτη JR). Αναλυτικότερα, αν είναι JR = 1 ή JR = 6 χρησιμοποιείται η εξίσωση (4-18). Αν είναι JR = 4 ή JR = 5 χρησιμοποιείται η εξίσωση (4-26) - function FPR4, η οποία εξαιτίας του ότι είναι πεπλεγμένη ως προς την πυκνότητα επιλύεται αριθμητικά. Για την αριθμητική

---

<sup>27</sup> Βλέπε και τον Πίνακα 4-1.

επίλυση της καλείται και πάλι η υπορουτίνα SOLVE, η οποία χρησιμοποιεί την παράγωγο της εξίσωσης (4-26) ως προς την πυκνότητα [σχέση (4-30), function DFPR4]. Ως τιμή εκκίνησης χρησιμοποιείται μία "ψευδοπυκνότητα" η οποία προκύπτει με την υπόθεση ότι η εξίσωση για τις υποπεριοχές όπου  $JR = 1$  ή  $JR = 6$  ισχύει και στις υποπεριοχές όπου  $JR = 4$  ή  $JR = 5$ . Όταν ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της πρώτης προσέγγισης για την πυκνότητα, ο έλεγχος επιστρέφει στην υπορουτίνα DENSF και καλείται η SOLVE για την επίλυση της εξίσωσης  $P = P(\rho, T)$  [σχέση (3-7) - function FP] ως προς την ακριβή τιμή της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος. Τιμή εκκίνησης για τη λύση είναι βέβαια αυτή η αρχική προσέγγιση και χρειάζεται επιπλέον και η εξίσωση της παραώγου της  $P = P(\rho, T)$  ως προς την πυκνότητα [σχέση (4-1), function DFP]. Σημειώνεται ότι σε κάθε έξοδο από την υπορουτίνα DENSF (μετά την κλήση της SOLVE) ενημερώνεται η COMMON εντολή επικονωνίας COMMON/K3/DD (DD η πυκνότητα σε  $g/cm^3$ ). Με την εύρεση και της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος για την πίεση και τη θερμοκρασία εισόδου, παίρνει τιμή η μεταβλητή DF (DF η πυκνότητα σε  $g/cm^3$ ) και η ροή του κώδικα οδηγεί και πάλι στην υπορουτίνα LIGHT\_WASP.

6. Στην άλλη περίπτωση που καλείται η υπορουτίνα DENSJ επιδιώκεται να υπολογισθεί η πυκνότητα του ελαφρού ύδατος στην ατιώδη φάση, σε καταστάσεις κορεσμένου ατμού και σε ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσεως (εκείνου που φαίνεται να είναι συνέχεια της ατιώδους φάσεως). Η υπορουτίνα DENSJ καλεί στη συνέχεια την υπορουτίνα SVLWV. Εκεί υπολογίζεται μία πρώτη προσέγγιση για την πυκνότητα (DV σε  $g/cm^3$ ) του ελαφρού ύδατος μόνο για τις υποπεριοχές που απασχολούν την υπορουτίνα DENSJ (πρόκειται για αυτές που χαρακτηρίζονται από τις τιμές 2, 3, 5 και 6 του δείκτη JR). Αναλυτικότερα, αν είναι  $JR = 2$  ή  $JR = 6$  χρησιμοποιείται η εξίσωση (4-21). Αν είναι  $JR = 3$  ή  $JR = 5$  χρησιμοποιείται η εξίσωση (4-25) - function FPR3, η οποία εξαιτίας του ότι είναι και αυτή πεπλεγμένη ως προς την πυκνότητα επιλύεται αριθμητικά. Η εύρεση της λύσης ανατίθεται στην υπορουτίνα SOLVE. Χρησιμοποιείται η παράγωγος της εξίσωσης (4-25) ως προς την πυκνότητα [σχέση (4-29), function DFPR3]. Η τιμή εκκίνησης είναι μία "ψευδοπυκνότητα" που προκύπτει αν θεωρηθεί ότι η εξίσωση για τις υποπεριοχές όπου  $JR = 2$  ή  $JR = 6$  ισχύει και στις υποπεριοχές όπου  $JR = 3$  ή  $JR = 5$ . Δεδομένου ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου η τιμή εκκίνησης που υπολογίζεται με αυτόν τον τρόπο δεν

είναι ικανοποιητικά "κοντά" στην πραγματική ώστε να υπολογίζεται η λύση από την υπορουτίνα SOLVE, τότε χρησιμοποιείται η καταστατική εξίσωση του τελείου αερίου για να προκύψει μια "ψευδοπυκνότητα" ως τιμή εκκινήσεως. Όταν ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της πρώτης προσέγγισης για την πυκνότητα, ο έλεγχος επιστρέφει στην υπορουτίνα DENSQ και καλείται η SOLVE για την επίλυση της εξίσωσης  $P = P(\rho, T)$  [σχέση (3-7) function FP] ως προς την ακριβή τιμή της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος. Τιμή εκκίνησης για τη λύση είναι βέβαια αυτή η αρχική προσέγγιση και χρειάζεται επιπλέον και η εξίσωση της παραγώγου της  $P = P(\rho, T)$  ως προς την πυκνότητα [σχέση (4-1), function DFP]. Σημειώνεται ότι σε κάθε έξοδο από την υπορουτίνα DENSQ (μετά την κλήση της SOLVE) ενημερώνεται η COMMON εντολή επικοινωνίας COMMON/K3/DD (DD η πυκνότητα σε  $g/cm^3$ ). Με την εύρεση και της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος για την πίεση και τη θερμοκρασία εισόδου, παίρνει τιμή η μεταβλητή DG (DG η πυκνότητα σε  $g/cm^3$ ) και η ροή του κώδικα οδηγεί και πάλι στην υπορουτίνα LIGHT\_WASP.

7. Κάθε κλήση της function FP και της function DFP συνεπάγεται και την κλήση της υπορουτίνας QMUST για τον υπολογισμό ενός πλήθους ποσοτήτων που είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας και της πυκνότητας [βλέπε και την εξίσωση (3-4) και τις (4-7) έως και (4-17)]. Αυτό χρησιμεύει όχι μόνο για τους υπολογισμούς που αφορούν αποκλειστικά στα υποπρογράμματα FP και DFP αλλά και για την ενημέρωση της COMMON εντολής επικοινωνίας

```
COMMON/QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
```

η οποία χρησιμοποιείται σε πολλά άλλα υποπρογράμματα.

8. Η υπορουτίνα LIGHT\_WASP υπολογίζει τώρα τον ειδικό όγκο του ελαφρού ύδατος SVF ή SVG σε  $m^3/kg$ . Σε αυτήν την φάση εξετάζει επίσης μήπως τυχαίνει η πυκνότητα που υπολογίσθηκε από τις υπορουτίνες DENSF και DENSQ και η θερμοκρασία εισόδου (ως θερμοκρασία εισόδου εννοείται και η θερμοκρασία κορεσμού που υπολογίσθηκε από την υπορουτίνα CHECKPT για μία πίεση κορεσμού -πραγματική θερμοκρασία εισόδου 0) να βρίσκονται στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου. Αν πράγματι συμβαίνει αυτό η εκτέλεση σταματάει και

τυπώνεται σχετικό μήνυμα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου. Αν όχι τότε καλείται η υπορουτίνα TOTAL με σκοπό τον υπολογισμό των άλλων θερμοφυσικών ιδιοτήτων που μπορεί να δώσει ο κώδικας. Η υπορουτίνα TOTAL καλείται μία μόνο φορά αν ο δείκτης JR παίρνει τις τιμές 1, 2, 3 και 4. Συγκεκριμένα, αν είναι JR = 1 ή JR = 4 η υπορουτίνα TOTAL φροντίζει για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος στην υγρή φάση και σε ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης. Αλλιώς, αν είναι JR = 2 ή JR = 3 η υπορουτίνα TOTAL φροντίζει για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος στην ατμώδη φάση και σε ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης. Στην περίπτωση που JR = 6 ή JR = 5 τότε η υπορουτίνα TOTAL καλείται δύο φορές διότι αυτές οι τιμές του δείκτη JR αντιπροσωπεύουν καταστάσεις κορεσμού για τις οποίες οι θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος πρέπει να υπολογισθούν δύο φορές -μία φορά για το κορεσμένο υγρό και μία φορά για τον κορεσμένο ατμό.

9. Ανάλογα με την τιμή που έχει πάρει ο διακόπτης JP κατά την κλήση του κώδικα η υπορουτίνα TOTAL καλεί μία, ή δύο, ή τρεις, κτλ ή και όλες από τις ακόλουθες υπορουτίνες: ENERGY, ENTHALPY, ENTROPY, SHP, SHV, SHR\_SOVE, IBM\_JTC, VISCOSITY, CONDUCTIVE και TENSION. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιούνται αυτές οι κλήσεις μέσω του διακόπτη JP εξηγήθηκε σαφώς στην § 4.6.2. Το σύνολο αυτών των υπορουτινών (και της υπορουτίνας TOTAL συμπεριλαμβανομένης) ανήκει στα προαιρετικά υποπρογράμματα του κώδικα, στα υποπρογράμματα δηλαδή που μπορούν να αφαιρεθούν (ένα - ένα, κατά τυχίες ομάδες ή και όλα) χωρίς με αυτό να επηρεάζονται κατά κανένα τρόπο οι υπόλοιπες λειτουργίες του κώδικα που περιγράφηκαν προηγούμενα και αφορούν κυρίως στον υπολογισμό του ειδικού όγκου του ελαφρού ύδατος για μία πίεση και μία θερμοκρασία εισόδου. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα προαιρετικά υποπρογράμματα του κώδικα θα δοθούν στην επόμενη παράγραφο 4.10. Από την υπορουτίνα ENERGY υπολογίζεται η ειδική εσωτερική ενέργεια U [σχέση (3-9)] και η ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια PSI [σχέση (3-1)]. Από την υπορουτίνα ENTHALPY υπολογίζεται η ειδική ενθαλπία H [σχέσεις (3-13) και (4-16)]. Η υπορουτίνα ENTROPY προσδιορίζει την ειδική εντροπία S [σχέση (3-11)]. Οι υπορουτίνες SHP και SHV υπολογίζουν τις ειδικές θερμοχωρητικότητες CP και CV αντίστοιχα [σχέσεις (3-15) και (3-17)]. Η υπορουτίνα SHR\_SOVE ασχολείται

με τον ισεντροπικό εκθέτη GAMMA [σχέση (3-18)] και την τωχύτητα του ήχου A [σχέση (3-22)] ενώ η υπορουτίνα IBM\_JTC προσδιορίζει το συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας IBM [σχέση (3-20)] και το συντελεστή Joule - Thomson JTC [σχέση (3-21)]. Η εύρεση της δυναμικής συνεκτικότητας MU και της θερμικής αγωγιμότητας K έχει ανατεθεί στις υπορουτίνες VISCOSITY και CONDUCTIVE αντίστοιχα. Το καθήκον της υπορουτίνας TENSION είναι να υπολογίζει την επιφανειακή τάση SIGMA μεταξύ νερού και ατμού στην κατάσταση κορεσμού [σχέση (3-39)]. Όλες οι παραπάνω υπορουτίνες δέχονται σαν είσοδο την πίεση και την πυκνότητα με την βοήθεια των COMMON εντολών επικοινωνίας

COMMON/K2/TT,TR

COMMON/K3/DD

(με εξαίρεση την TENSION οι οποία δέχεται σαν είσοδο μόνο τη θερμοκρασία - επικοινωνία μέσω της COMMON/K2/TT,TR).

Για τις υπορουτίνες που υπολογίζουν θερμοδυναμικές ιδιότητες είναι απαραίτητη και η χρησιμοποίηση της COMMON εντολής επικοινωνίας

COMMON/QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2

η οποία αποκαθιστά την επαφή τους με την υπορουτίνα QMUST και με τις ποσότητες που αυτή υπολογίζει (αναγκαίες στις σχέσεις υπολογισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων).

Η COMMON/QAUX/ δεν χρειάζεται στις υπορουτίνες VISCOSITY, CONDUCTIVE και TENSION για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων μεταφοράς.

Με την συμπλήρωση των κλήσεων των ζητούμενων να κληθούν (διακόπτης JP) υπορουτινών για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων (όλων των υπορουτινών αν ζητούνται όλες -JP = 31 ή JP = 63) ενημερώνεται με τις υπολογισθείσες τιμές η λίστα παραμέτρων

(JP,B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4,U,PSI,H,S,CP,CV,

IBM,JTC,GAMMA,A,MU,K,PRANDTL,SIGMA)

JP μεταβλητή ΕΙΣΟΔΟΥ

[οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι μεταβλητές ΕΞΟΔΟΥ]

της υπορουτίνας TOTAL και τέλος ο έλεγχος επιστρέφει στην υπορουτίνα LIGHT\_WASP.

10. Στην υπορουτίνα LIGHT\_WASP δρομολογούνται τώρα οι τελευταίες υπολογιστικές ενέργειες, οι οποίες πρέπει να γίνουν πριν ο έλεγχος της ροής επιστρέψει στο κυρίως πρόγραμμα του χρήστη. Ενημερώνονται δηλαδή αυτόματα οι COMMON εντολές επικοινωνίας της υπορουτίνας LIGHT\_WASP με το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη καθώς και η λίστα παραμέτρων της (κατ' επέκταση δηλαδή αποκαθίσταται πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία του κώδικα με τον χρήστη). Πρόκειται βέβαια για τις γνωστές COMMON εντολές

COMMON/PROPERTY1/...

COMMON/PROPERTY2/...

και

COMMON/PROPERTY3/...

και για τη λίστα παραμέτρων

(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS)

JS,JP μεταβλητές ΕΙΣΟΔΟΥ

P,T μεταβλητές ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ

TS, SVF, SVG, JR, IS μεταβλητές ΕΞΟΔΟΥ

Μετά από αυτά ο έλεγχος επιστρέφει στο κυρίως πρόγραμμα του χρήστη. Μία πολύ απλή μορφή τέτοιου προγράμματος μπορεί να είναι αυτή του κυρίως προγράμματος EXAMPLE.

Πέρα από τις COMMON εντολές επικοινωνίας ο κώδικας χρησιμοποιεί και άλλες COMMON εντολές οι οποίες ονομάστηκαν COMMON εντολές σταθερών. Πρόκειται για Labelled Common Blocks, με το χαρακτηριστικό /Z/, τα οποία παίρνουν τιμές στο υποπρόγραμμα blockdata CONSTANTS και αφορούν, όπως ήδη σημειώθηκε σταθερές, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σε περισσότερα από ένα υποπρογράμματα του κώδικα LIGHT\_WASP (ή γενικότερα περισσότερο από μία φορά).

Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 4-13 παρουσιάζονται όσες από τις μεταβλητές του κώδικα δεν συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα 4-7. Η γνώση των μεταβλητών αυτών είναι απαραίτητη σε εκείνον το χρήστη που επιθυμεί να ασχοληθεί σε βάθος με την προγραμματιστική υλοποίηση του πλέγματος των εξισώσεων για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος. Επιπλέον σε ειδική παράγραφο του Παραρτήματος I παρουσιάζονται με ακόμα πιο λεπτομερή τρόπο όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα και κατά το δυνατόν με τη σειρά που αυτά χρησιμοποιούνται. Η παρουσίαση εστιάζει στα θέματα μεταβλητών εισόδου, μεταβλητών εξόδου, τοπικών μεταβλητών και επικοινωνίας με άλλα υποπρογράμματα.

## **4.9 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά των υποπρογραμμάτων του κώδικα.**

Τα υποπρογράμματα του κώδικα είναι δυνατό να καταταγούν σε υποσύνολα με τη χρησιμοποίηση διαφόρων κριτηρίων, όπως ο βαθμός αλληλεξάρτησης τους (ισοδύναμα δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο αυτά επικοινωνούν), η θέση του κάθε ενός από αυτά στη συνολική δομή του κώδικα και τέλος ο ρόλος και τα καθήκοντά τους μέσα σε αυτόν. Η κατάταξη αυτή αναπτύσσεται στις επόμενες τρεις παραγράφους.

### **4.9.1 Βαθμός αλληλεξάρτησης των υποπρογραμμάτων.**

Για να αποδοθεί η έννοια της αλληλεξάρτησης, τα υποπρογράμματα μπορούν να καταταγούν σε **ανεξάρτητα, μετρίως εξηρημένα** και τέλος σε **πλήρως εξηρημένα υποπρογράμματα**. Η κατάταξη αυτή γίνεται σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο ένα υποπρόγραμμα επικοινωνεί με τις συνεργαζόμενες υπορουτίνες (subroutines) και

συναρτήσεις (functions). Ο γράφων επιδίωξε κατά την κατάστρωση αυτών των υποπρογραμμάτων να εφαρμόσει τον ακόλουθο τύπο επικοινωνίας:

**Τα υποπρογράμματα δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου από εντολές COMMON (Labelled Common Blocks) και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους (Parameter List).**

Όπως ήταν φυσικό αυτός ο τρόπος επικοινωνίας δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοσθεί σε όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα διότι αυτό δεν αποτελούσε πάντοτε την ορθότερη λύση. Δημιουργήθηκαν έτσι και ορισμένες παραλλαγές, σύμφωνα με τις οποίες μπορούν να καταταγούν τα υποπρογράμματα.

Υπενθυμίζεται ότι οι μεταβλητές (ή παράμετροι) ενός υποπρογράμματος από πλευράς τουπικού της γλώσσας FORTRAN εντάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- μεταβλητές εισόδου,
- μεταβλητές εξόδου,
- τοπικές μεταβλητές, και τέλος
- κοινές μεταβλητές όλων των υποπρογραμμάτων, οι οποίες καταλαμβάνουν κοινή περιοχή μνήμης (common memory area -μεταβλητές των Labelled Common Blocks)

Η εννοιολογική σημασία των τριών πρώτων κατηγοριών μεταβλητών είναι λίγο ως πολύ σαφής. Για τις μεταβλητές όμως της τέταρτης κατηγορίας υπάρχει μεγάλη προγραμματιστική ελευθερία. Αυτό σημαίνει ότι οι COMMON μεταβλητές μπορούν να έχουν "διπτό" ρόλο, μπορούν να παίζουν δηλαδή τόσο το ρόλο της μεταβλητής εισόδου όσο και εκείνο της μεταβλητής εξόδου.

Ειδικά τώρα για όσα υποπρογράμματα δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου με τη βοήθεια εντολών COMMON, αυτές (οι εντολές) μπορούν να διαχωρισθούν στις

**COMMON εντολές επικοινωνίας** (με χαρακτηριστικούς κωδικούς /Ki/,  $i = 1, 2, 3$  και 4 και /PROPERTYi/,  $i = 1, 2$  και 3)

και στις



**COMMON** εντολές σταθερών (με χαρακτηριστικό κωδικό  $/Zi/$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$  και 11)

Μέσω COMMON εντολών σταθερών δίνονται, όπως γίνεται κατανοητό, τιμές μόνο σε μεταβλητές εισόδου που αντιπροσωπεύουν σταθερές του κώδικα (σταθερές για τις συσχετίσεις, όρια περιοχών ισχύος κτλ).

Αντίθετα μέσω COMMON εντολών επικοινωνίας παίρνουν τιμές τόσο διάφορες μεταβλητές εισόδου σε υποπρογράμματα, όσο και πολλές μεταβλητές εξόδου από αυτά. Οι COMMON εντολές επικοινωνίας είναι κοινές για πολλά από τα υποπρογράμματα και αποκαθιστούν την τυπική τους επαφή καθώς και την αρμονική τους συνεργασία.

#### **4.9.2 Ανεξάρτητα υποπρογράμματα.**

Ως ανεξάρτητα χαρακτηρίζονται τα υποπρογράμματα που δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου αποκλειστικά μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους. Αν μάλιστα είναι ακριβώς γνωστή η εργασία που έχει ανατεθεί σε αυτά τα υποπρογράμματα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τα αντικαταστήσει με άλλα δικής του επινόησης που να κάνουν όμως την ίδια ακριβώς εργασία. Σε άλλη περίπτωση δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να τα χρησιμοποιήσει σε δικούς του εντελώς διαφορετικούς κώδικες. Τα ανεξάρτητα υποπρογράμματα δηλαδή μπορούν να θεωρούνται από τον χρήστη ως μιάρα κουτιά (black boxes). Ιδιαίτερα αν πρόκειται για μαθηματικά υποπρογράμματα (όπως για παράδειγμα η μέθοδος Newton - Raphson για την αριθμητική επίλυση πεπλεγμένων εξισώσεων) ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει στη θέση τους έτοιμα υποπρογράμματα από βιβλιοθήκες μαθηματικών υποπρογραμμάτων (π.χ. IMSL -International Mathematical and Statistical Library κτλ), άσχετα αν κάτι τέτοιο υπονομεύει τελικά την γενικότερη ανεξαρτησία του παρουσιαζόμενου κώδικα. Τονίζεται ότι ο κώδικας **LIGHT\_WASP δεν καλεί υποπρογράμματα από βιβλιοθήκες (Library Free Code).**

Στην περίπτωση μας ανεξάρτητη είναι η υπορουτίνα SOLVE.

### 4.9.3 Μετρίως εξηρημένα υποπρογράμματα.

Ως μετρίως εξηρημένα χαρακτηρίζονται τα υποπρογράμματα που τηρούν το τυπικό επικοινωνίας που θεωρήθηκε κατάλληλοτερο και χρησιμοποιήθηκε περισσότερο. Τα υποπρογράμματα αυτά δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου από εντολές COMMON (Labelled Common Blocks) και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους (Parameter List).

Μικρή εξαίρεση αποτελούν οι συναρτήσεις (functions) οι οποίες γενικά δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου τόσο από εντολές COMMON, όσο και μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου μόνο μέσα από τη λίστα παραμέτρων. Ο λόγος που υιοθετήθηκε αυτή η επικοινωνία για τις functions οφείλεται αφενός στην ανάγκη απόδοσης της έννοιας "συνάρτηση" και προγραμματιστικά και αφετέρου στην εξυπηρέτηση της επικοινωνίας ορισμένων από αυτές με την μαθηματική υπορουτίνα SOLVE.

Άλλη εξαίρεση είναι η κεντρική υπορουτίνα LIGHT\_WASP. Αυτή χρησιμοποιεί COMMON εντολές και λίστα παραμέτρων για να εξυπηρέτησε τόσο την είσοδο όσο και την έξοδο. Παρόλαυτά εντάσσεται στα μετρίως εξηρημένα υποπρογράμματα.

Αν ο χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει ένα από αυτά τα μετρίως εξηρημένα υποπρογράμματα σαν μέρος ενός δικού του διαφορετικού κώδικα θα συναντήσει σημαντικές δυσκολίες για την υπερπήδηση των οποίων δεν απαιτείται μόνο προγραμματιστική εμπειρία αλλά και πολύ καλή γνώση του κώδικα LIGHT\_WASP. Σχετικά ευκολότερη φαίνεται ότι είναι η αποκλειστική χρησιμοποίηση των υπορουτινών VISCOSITY και CONDUCTIVE για τον υπολογισμό της δυναμικής συνεκτικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας αντίστοιχα αν είναι γνωστές η θερμοκρασία και η πυκνότητα στις κατάλληλες μονάδες. Το ίδιο ισχύει και για την υπορουτίνα TENSION για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης αν είναι γνωστή η θερμοκρασία κορεσμού. Τα παραπάνω δεν σημαίνουν καθόλου ότι πολλά από τα μετρίως εξηρημένα υποπρογράμματα δεν μπορούν να αφαιρεθούν από τον κώδικα με σκοπό να εξυπηρέτησουν την εξοικονόμηση στη χρήση κεντρικής μνήμης ή την αύξηση της ταχύτητας υπολογισμών στο υπολογιστικό σύστημα του χρήστη (αν και είναι φανερό ότι η αύξηση της ταχύτητας ανταπόκρισης του κώδικα LIGHT\_WASP μπορεί να γίνει με την κατάλληλη χρήση του διακόπτη JP). Τα ονόματα των μετρίως εξηρημένων υποπρογραμμάτων του κώδικα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-15.

#### 4.9.4 Πλήρως εξηρημένα υποπρογράμματα.

Ως πλήρως εξηρημένα υποπρογράμματα χαρακτηρίζονται εκείνα τα οποία επικοινωνούν με τα συνεργαζόμενα υποπρογράμματα μόνο διά μέσου εντολών COMMON. Στην περίπτωση που εξετάζεται αυτά είναι η υπορουτίνα QMUST και το blockdata CONSTANTS. Οποιαδήποτε, έστω και μικρή, επέμβαση σε αυτά τα δύο υποπρογράμματα πρέπει να γίνεται από τον χρήστη μόνο αν κρίνεται απόλυτα απαραίτητη και με πάρα πολλή προσοχή. Η αθέλητη εισαγωγή κάποιου εκ πρώτης όψους αμελητέου λάθους σε αυτά τα υποπρογράμματα είναι δυνατόν να ανατρέψει την ορθότητα των υπολογισμών στο σύνολο του κώδικα ή ακόμα και να οδηγήσει την εκτέλεση του κώδικα σε μοιραία λάθη (fatal errors -κυρίως διαφρέσεις με το μηδέν και υψώσεις αρνητικών σε ρητές δυνάμεις). Αν ο χρήστης έχει αρκετή εμπειρία και το επιθυμεί μπορεί να αποσπάσει την υπορουτίνα QMUST από τον κώδικα και να την χρησιμοποιήσει ανεξάρτητα για να υπολογίσει τα μεμονωμένα μεγέθη που παρέχονται από αυτή.

#### 4.10 Η δομική ευελιξία του κώδικα.

Κατά τη σύνταξη του κώδικα χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονες αρχές δομημένου προγραμματισμού. Επιδιώχθηκε η τμηματική δομή του κώδικα (code modular design) με τρόπο ώστε, αν ο χρήστης το επιθυμεί, να επιλέγει μόνο εκείνες τις υπορουτίνες, που είναι απαραίτητες στους υπολογισμούς του. Με βάση αυτή τη λογική τα υποπρογράμματα του κώδικα μπορούν να κατατάσσονται σε ομάδες που πραγματοποιούν συναφείς λειτουργίες. Η διάκριση αυτή επιτρέπει το διαχωρισμό των υποπρογραμμάτων σε **απαιρέτητα και προαιρετικά**.

Απαιρέτητα θεωρούνται τα υποπρογράμματα χωρίς τα οποία ο κώδικας δεν μπορεί να λειτουργήσει. Αντίθετα προαιρετικά είναι τα υποπρογράμματα που μπορούν να αφαιρεθούν από τον κώδικα· αυτό βέβαια έχει ως συνέπεια τη μείωση του αριθμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος που είναι δυνατόν να υπολογισθούν. **Αν αφαιρεθεί από τον κώδικα το σύνολο των προαιρετικών υποπρογραμμάτων τότε η μόνη ιδιότητα που μπορεί αυτός να υπολογίσει με δεδομένα την πίεση και τη θερμοκρασία είναι ο ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος**. Τα ονόματα των προαιρετικών υποπρογραμμάτων του κώδικα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 4-15, όπου σημειώνονται επίσης και οι μετατροπές που πρέπει να γίνουν στα απαραίτητα υποπρογράμματα του κώδικα για να επιτευχθεί

η αφαίρεσή τους. Όλα τα υπόλοιπα υποπρογράμματα χαρακτηρίζονται απαραίτητα για λόγους που γίνονται προφανείς αν ανατρέξει κανείς στο ρόλο τους που περιγράφεται στην παράγραφο 4.8 "Λειτουργία του κώδικα LIGHT\_WASP".

Παρατηρείται ότι τα προαιρετικά υποπρογράμματα συμπεριλαμβάνουν αποκλειστικά τις υπορουτίνες που υπολογίζουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του ελαφρού ύδατος εκτός βέβαια από τον ειδικό του όγκο.

## Πίνακες του Κεφαλαίου

Πίνακας 4-1: Υποπεριοχές ισχύος της διατύπωσης IFC-1967.

Περιοχή Θερμοκρασίας	Περιοχή Πίεσης	Υποπεριοχή
$T_n \leq T_r \leq T_{r1}$	$0 \leq P_r < P_{rs}(T_r)$	2
	$P_r = P_{rs}(T_r)$	6
	$P_{rs}(T_r) < P_r \leq P_{r2}$	1
<p>όπου <math>T_n = T_r T^* = 4.219990731 \times 10^{-1}</math> με <math>T_t = 273.16</math> Κ η θερμοκρασία στο τριπλό σημείο του ελαφρού ύδατος</p>		
<hr/>		
	$0 \leq P_r \leq P_{rL}(T_r)$	2
$T_{r1} < T_r < T_{r2}$	$P_{rL}(T_r) < P_r < P_{rs}(T_r)$	3
	$P_r = P_{rs}(T_r)$	5
	$P_{rs}(T_r) < P_r \leq P_{r2}$	4
<hr/>		
$1 \leq T_r \leq T_{r2}$	$0 \leq P_r \leq P_{rL}(T_r)$	2
	$P_{rL}(T_r) < P_r \leq P_{r2}$	3
<hr/>		
$T_{r2} \leq T_r \leq T_{r3}$	$0 \leq P_r \leq P_{r2}$	2

**Πίνακας 4-2: Συντελεστές για τις συσχετίσεις (4-18) έως και (4-21).**

<u>Υγρή φάση</u>			
$A_0 = 6.824687741$	$x10^3$	$A_{12} = -2.616571843$	$x10^{-2}$
$A_1 = -5.422063673$	$x10^2$	$A_{13} = 1.522411790$	$x10^{-3}$
$A_2 = -2.096666205$	$x10^4$	$A_{14} = 2.284279054$	$x10^{-2}$
$A_3 = 3.941286787$	$x10^4$	$A_{15} = 2.421647003$	$x10^2$
$A_4 = -6.733277739$	$x10^4$	$A_{16} = 1.269716088$	$x10^{-10}$
$A_5 = 9.902381028$	$x10^4$	$A_{17} = 2.074838328$	$x10^{-7}$
$A_6 = -1.093911774$	$x10^5$	$A_{18} = 2.174020350$	$x10^{-8}$
$A_7 = 8.590841667$	$x10^4$	$A_{19} = 1.105710498$	$x10^{-9}$
$A_8 = -4.511168742$	$x10^4$	$A_{20} = 1.293441934$	$x10^1$
$A_9 = 1.418138926$	$x10^4$	$A_{21} = 1.308119072$	$x10^{-5}$
$A_{10} = -2.017271113$	$x10^3$	$A_{22} = 6.047626338$	$x10^{-14}$
$A_{11} = 7.982692717$	$x10^0$		
$a_1 = 8.438375405$	$x10^{-1}$	$a_2 = 5.362162162$	$x10^{-4}$
$a_3 = 1.720000000$	$x10^0$	$a_4 = 7.342278489$	$x10^{-2}$
$a_5 = 4.975858870$	$x10^{-2}$	$a_6 = 6.537154300$	$x10^{-1}$
$a_7 = 1.150000000$	$x10^{-6}$	$a_8 = 1.510800000$	$x10^{-5}$
$a_9 = 1.418800000$	$x10^{-1}$	$a_{10} = 7.002753165$	$x10^0$
$a_{11} = 2.995284926$	$x10^{-4}$	$a_{12} = 2.040000000$	$x10^{-1}$

**Πίνακας 4-3: Συντελεστές για τις συσχετίσεις (4-18) έως και (4-21) - συνέχεια.**

<u>Αιτιώδης φάση</u>		
$B_0 = 1.683599274$	$x10^1$	$B_{52} = -5.159303373$ $x10^{-1}$
$B_{01} = 2.856067796$	$x10^1$	$B_{53} = 2.075021122$ $x10^{-1}$
$B_{02} = -5.438923329$	$x10^1$	$B_{61} = 1.190610271$ $x10^{-1}$
$B_{03} = 4.330662834$	$x10^{-1}$	$B_{62} = -9.867174132$ $x10^{-2}$
$B_{04} = -6.547711697$	$x10^{-1}$	$B_{71} = 1.683998803$ $x10^{-1}$
$B_{05} = 8.565182058$	$x10^{-2}$	$B_{72} = -5.809438001$ $x10^{-2}$
$B_{11} = 6.670375918$	$x10^{-2}$	$B_{81} = 6.552390126$ $x10^{-3}$
$B_{12} = 1.388983801$	$x10^0$	$B_{82} = 5.710218649$ $x10^{-4}$
$B_{21} = 8.390104328$	$x10^{-2}$	$B_{90} = 1.936587558$ $x10^2$
$B_{22} = 2.614670893$	$x10^{-2}$	$B_{91} = -1.388522425$ $x10^3$
$B_{23} = -3.373439453$	$x10^{-2}$	$B_{92} = 4.126607219$ $x10^3$
$B_{31} = 4.520918904$	$x10^{-1}$	$B_{93} = -6.508211677$ $x10^3$
$B_{32} = 1.069036614$	$x10^{-1}$	$B_{94} = 5.745984054$ $x10^3$
$B_{41} = -5.975336707$	$x10^{-1}$	$B_{95} = -2.693088365$ $x10^3$
$B_{42} = -8.847535804$	$x10^{-2}$	$B_{96} = 5.235718623$ $x10^2$
$B_{51} = 5.958051609$	$x10^{-1}$	
$b = 7.633333333$	$x10^{-1}$	$b_{61} = 4.006073948$ $x10^{-1}$
$b_{71} = 8.636081627$	$x10^{-2}$	$b_{81} = -8.532322921$ $x10^{-1}$
$b_{82} = 3.460208861$	$x10^{-1}$	

**Πίνακας 4-4: Συντελεστές για τις συσχετίσεις (4-18) έως και (4-21) - συνέχεια.**

$\mu$	$n(\mu)$	$z(\mu, \nu)$			$l(\mu)$		$x(\mu, \lambda)$	$\mu$
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$\lambda=1$	$\lambda=2$		
1	2	13	3	-	-	-	1	
2	3	18	2	1	-	-	2	
3	2	18	10	-	-	-	3	
4	2	25	14	-	-	-	4	
5	3	32	28	24	-	-	5	
6	2	12	11	-	1	14	6	
7	2	24	18	-	1	19	7	
8	2	24	14	-	2	54	8	



**Πίνακας 4-5: Συντελεστές για τη συσχέτιση (4-25).**

$C_{00} = -6.83990000$	$x10^0$	$C_{17} = -7.74743016$	$x10^0$	$C_{30} = 8.32875413$	$x10^0$
$C_{01} = -1.72260420$	$x10^{-2}$	$C_{21} = -4.29885092$	$x10^0$	$C_{40} = 2.75971776$	$x10^{-6}$
$C_{02} = -7.77175039$	$x10^0$	$C_{22} = 4.31430538$	$x10^1$	$C_{41} = -5.09073985$	$x10^{-4}$
$C_{03} = 4.20460752$	$x10^0$	$C_{23} = -1.41619313$	$x10^1$	$C_{50} = 2.10636332$	$x10^2$
$C_{04} = -2.76807038$	$x10^0$	$C_{24} = 4.04172459$	$x10^0$	$C_{60} = 5.528935335$	$x10^{-2}$
$C_{05} = 2.10419707$	$x10^0$	$C_{25} = 1.55546326$	$x10^0$	$C_{61} = -2.336365955$	$x10^{-1}$
$C_{06} = -1.14649588$	$x10^0$	$C_{26} = -1.66568935$	$x10^0$	$C_{62} = 3.697071420$	$x10^{-1}$
$C_{07} = 2.23138085$	$x10^{-1}$	$C_{27} = 3.24881158$	$x10^{-1}$	$C_{63} = -2.596415470$	$x10^{-1}$
$C_{08} = 1.16250363$	$x10^{-1}$	$C_{28} = 2.93655325$	$x10^1$	$C_{64} = 6.828087013$	$x10^{-2}$
$C_{09} = -8.20900544$	$x10^{-2}$	$C_{31} = 7.94841842$	$x10^{-6}$	$C_{70} = -2.571600553$	$x10^2$
$C_{010} = 1.94129239$	$x10^{-2}$	$C_{32} = 8.08859747$	$x10^1$	$C_{71} = -1.518783715$	$x10^2$
$C_{011} = -1.69470576$	$x10^{-3}$	$C_{33} = -8.36153380$	$x10^1$	$C_{72} = 2.220723208$	$x10^1$
$C_{012} = -4.311577033$	$x10^0$	$C_{34} = 3.58636517$	$x10^1$	$C_{73} = -1.802039570$	$x10^2$
$C_{11} = 7.08636085$	$x10^{-1}$	$C_{35} = 7.51895954$	$x10^0$	$C_{74} = 2.357096220$	$x10^3$
$C_{12} = 1.23679455$	$x10^1$	$C_{36} = -1.26160640$	$x10^1$	$C_{75} = -1.462335698$	$x10^4$
$C_{13} = -1.20389004$	$x10^1$	$C_{37} = 1.09717462$	$x10^0$	$C_{76} = 4.542916630$	$x10^4$
$C_{14} = 5.40437422$	$x10^0$	$C_{38} = 2.12145492$	$x10^0$	$C_{77} = -7.053556432$	$x10^4$
$C_{15} = -9.93865043$	$x10^{-1}$	$C_{39} = -5.46529566$	$x10^{-1}$	$C_{78} = 4.381571428$	$x10^4$
$C_{16} = 6.27523182$	$x10^{-2}$				

**Πίνακας 4-6: Συντελεστές για τη συσχέτιση (4-26).**

$D_{31} = -1.717616747$	$x10^0$	$D_{41} = 1.301023613$	$x10^0$	$D_{45} = 3.270860589$	$x10^{-2}$
$D_{32} = 3.526389875$	$x10^0$	$D_{42} = -2.642777743$	$x10^0$	$D_{51} = 3.4266663535$	$x10^{-4}$
$D_{33} = -2.690899373$	$x10^0$	$D_{43} = 1.996765362$	$x10^0$	$D_{52} = -1.236521258$	$x10^{-3}$
$D_{34} = 9.070982605$	$x10^{-1}$	$D_{44} = -6.661557013$	$x10^{-1}$	$D_{53} = 1.155018309$	$x10^{-3}$
$D_{35} = -1.138791156$	$x10^{-1}$				

**Πίνακας 4-7: Σύμβολα, ονοματολογία και μονάδες βασικών μεταβλητών.**

AF	ταχύτητα του ήχου $a$ στο υγρό σε m/s (F - Fluid)
AG	ταχύτητα του ήχου $a$ στον ατμό σε m/s (G - Gas)
CPF	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p$ του υγρού υπό σταθερή πίεση σε kJ/(kgK) (Heat Capacity of Fluid at constant Pressure)
CPG	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p$ του ατμού υπό σταθερή πίεση σε kJ/(kgK) (Heat Capacity of Gas at constant Pressure)
CVF	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_v$ του υγρού υπό σταθερό όγκο σε kJ/(kgK) (Heat Capacity of Fluid at constant Volume)
CVG	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_v$ του ατμού υπό σταθερό όγκο σε kJ/(kgK) (Heat Capacity of Gas at constant Volume)
GAMMAF	λόγος των ειδικών θερμοχωρητικότητων του υγρού CPF/CVF
GAMMAG	λόγος των ειδικών θερμοχωρητικότητων του ατμού CPG/CVG
HF	ειδική ενθαλπία $h$ του υγρού σε kJ/kg
HG	ειδική ενθαλπία $h$ του ατμού σε kJ/kg
HFG	λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης $r$ σε kJ/kg (F $\equiv$ Fluid, G $\equiv$ Gas)
IBMF	ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα $K_T$ του υγρού σε MPa <sup>-1</sup> (Isothermal Bulk Modulus of Fluid)
IBMG	ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα $K_T$ του ατμού σε MPa <sup>-1</sup> (Isothermal Bulk Modulus of Gas)
IS	δείκτης σύγκρισης με την κατάσταση κορεσμού (S $\equiv$ Saturation)
JP	καθορισμός των ζητουμένων ιδιοτήτων
JR	καθορισμός της περιοχής του διαγράμματος PT (R $\equiv$ Region)
JS	καθορισμός των μεταβλητών εισόδου
JTCF	συντελεστής Joule - Thomson $\mu$ για το υγρό σε K/MPa (Joule - Thomson Coefficient of Fluid)
JTCG	συντελεστής Joule - Thomson $\mu$ για τον ατμό σε K/MPa (Joule - Thomson Coefficient of Gas)
KF	θερμική αγωγιμότητα $\lambda$ του υγρού σε W/(mK)
KG	θερμική αγωγιμότητα $\lambda$ του ατμού σε W/(mK)
MUF	δυναμική συνεκτικότητα $\eta$ του υγρού σε kg/(ms)

MUG	δυναμική συνεκτικότητα η του ατμού σε kg/(ms)
P	πίεση P σε bar
PRANDTLF	αριθμός Prandtl (Pr) του υγρού
PRANDTLG	αριθμός Prandtl (Pr) του ατμού
PSIF	ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια ψ του υγρού σε kJ/kg
PSIG	ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια ψ του ατμού σε kJ/kg
SIGMAFG	επιφανειακή τάση σ μεταξύ υγρού και ατμού στην κατάσταση κορεσμού σε N/m <sup>2</sup>
SF	ειδική εντροπία s του υγρού σε kJ/(kgK)
SG	ειδική εντροπία s του ατμού σε kJ/(kgK)
SVF	ειδικός όγκος v του υγρού σε m <sup>3</sup> /kg (Specific Volume of Fluid)
SVG	ειδικός όγκος v του ατμού σε m <sup>3</sup> /kg (Specific Volume of Gas)
T	θερμοκρασία T σε μονάδες K
TS	θερμοκρασία κορεσμού Ts σε μονάδες K (Saturation Temperature)
UF	ειδική εσωτερική ενέργεια u του υγρού σε kJ/kg
UG	ειδική εσωτερική ενέργεια u του ατμού σε kJ/kg

**Σημείωση:**

Το επίθεμα F ≡ Fluid αναφέρεται βέβαια κυρίως στις θερμοφυσικές ιδιότητες της υγρής φάσης αλλά καλύπτει και τις ιδιότητες του κορεσμένου υγρού και ενός μέρους της υπερκρίσιμης φάσης.

Ομοίως το επίθεμα G ≡ Gas αναφέρεται κυρίως στις θερμοφυσικές ιδιότητες της ατμώδους φάσεως αλλά καλύπτει και τις ιδιότητες του κορεσμένου ατμού και ενός διαφορετικού μέρους της υπερκρίσιμης φάσης.

**Πίνακας 4-8: Υπολογισμός ιδιοτήτων ανάλογα με τις τιμές του διακόπτη JP.**

JP = 0	δεν υπολογίζεται καμμία ιδιότητα,
JP = 1 = 2 <sup>0</sup>	υπολογίζεται η εσωτερική ενέργεια,
JP = 2 = 2 <sup>1</sup>	υπολογίζονται η ενθαλπία και η εντροπία,
JP = 4 = 2 <sup>2</sup>	
υπολογίζονται	η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο, ο λόγος των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων, η ταχύτητα του ήχου, η ισοθερμοκρασιακή συμπίεσιτότητα και ο συντελεστής Joule - Thomson,
JP = 8 = 2 <sup>3</sup>	
υπολογίζονται	η δυναμική συνεκτικότητα, η θερμική αγωγιμότητα και ο αριθμός Prandtl,
JP = 16 = 2 <sup>4</sup>	υπολογίζεται η επιφανειακή τάση, και
JP = 32 = 2 <sup>5</sup>	φυλάσσεται για μελλοντική χρήση
Ο διακόπτης JP καθορίζει ποιές ιδιότητες ζητάει ο χρήστης να υπολογισθούν από τον κώδικα. Ο διακόπτης αυτός μπορεί να πάρει τις ακόριαιες τιμές από 0 έως και 63. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν κάποιο άθροισμα των αριθμών 0, 2, 4, 8, 16 και 32 - δηλαδή ισοδύναμα των αριθμών 0, 2 <sup>0</sup> , 2 <sup>1</sup> , 2 <sup>2</sup> , 2 <sup>3</sup> , 2 <sup>4</sup> και 2 <sup>5</sup> . Κάθε τέτοιο δυαδικό άθροισμα εξυπηρετεί τον με μοναδικό τρόπο τον προσδιορισμό του συνδυασμού των ιδιοτήτων που ζητούνται.	

**Πίνακας 4-9: Τιμές του δείκτη IS.**

IS είναι 0

όταν η πίεση ή/και η θερμοκρασία εισόδου είναι υπερκρίσιμες

IS είναι 1

όταν για αυτή την πίεση εισόδου υπάρχει κατάσταση κορεσμού. Υπολογίζεται η αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού σε μονάδες K.

IS είναι 2

όταν η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου αντιστοιχούν ακριβώς -ή βρίσκονται πολύ κοντά (θερμοκρασιακή αλόσταση  $\pm 1$  °C)- στην κατάσταση κορεσμού.

**Πίνακας 4-10: Πίνακας λειτουργίας του κώδικα.**

**Κλίση του κώδικα:**

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

DOUBLE PRECISION IBMF,IBMG,JTCF,JTCG,KF,KG,LACFG,MUF,MUG

COMMON/PROPERTY1/B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F,UF,PSIF,HF,SF,CPF,CVF,

\*IBMF,JTCF,GAMMAF,AF,MUF,KF,PRANDTLF

COMMON/PROPERTY2/B2G,B3G,B4G,DB2G,DB3G,DB4G,UG,PSIG,HG,SG,CPG,CVG,

\*IBMG,JTCG,GAMMAG,AG,MUG,KG,PRANDTLG

COMMON/PROPERTY3/HFG,SIGMAFG,LACFG

CALL LIGHT\_WASP (JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS)

**Μεταβλητές:**

1. αν JS = 1 με δεδομένα P,T υπολόγισε τις ιδιότητες που ζητούνται με το διακόπτη JP (Πίνακας 4-8)
2. με τον διακόπτη JP καθόρισε τις ζητούμενες θερμοδυναμικές ιδιότητες και ιδιότητες μεταφοράς
3. P είναι η πίεση εισόδου
4. T είναι η θερμοκρασία εισόδου
5. TS είναι η θερμοκρασία κορεσμού
6. SVF είναι ο ειδικός όγκος του υγρού
7. SVG είναι ο ειδικός όγκος του ατμού
8. JR είναι ο δείκτης που πληροφορεί σε ποιό σημείο του διαγράμματος PT βρίσκεται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου (βλέπε και τα σχετικά Διαγράμματα 4-1 και 4-2). Ο κανόνας προσδιορισμού του δείκτη JR είναι στην ουσία ο Πίνακας 4-1.
9. IS είναι ο δείκτης που πληροφορεί πόσο κοντά στην κατάσταση κορεσμού βρίσκονται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου (Πίνακας 4-9).
10. Άλλες μεταβλητές σύμφωνα με τον Πίνακα 4-7.

Πίνακας 4-11: Αποτελέσματα του κώδικα LIGHT\_WASP για τις ιδιότητες εξαφύσεων υδρατμών.

t (C)	bar	Volume, m <sup>3</sup> /kg	Enthalpy, kJ/kg	Energy, kJ/kg	Entropy kJ/kgK	bar	t (C)
250	4.0	.5664	2964.2	2726.1	7.3789	4.4	250
260	4.0	.5778	2984.7	2741.9	7.4178	4.4	260
270	4.2	.5893	3005.2	2757.6	7.4559	4.2	270
280	4.2	.6007	3025.8	2773.3	7.4933	4.2	280
290	4.4	.6120	3046.3	2789.1	7.5301	4.4	290
300	4.0	.6233	3066.8	2804.8	7.5662	4.0	300
310	4.0	.6347	3087.3	2820.6	7.6017	4.0	310
320	4.2	.6459	3107.8	2836.4	7.6366	4.2	320
330	4.4	.6572	3128.4	2852.3	7.6710	4.4	330
340	4.0	.6685	3149.0	2868.2	7.7049	4.0	340
350	4.0	.6797	3169.7	2884.1	7.7383	4.0	350
360	4.2	.6909	3190.3	2900.1	7.7712	4.2	360
370	4.4	.7021	3211.0	2916.1	7.8037	4.4	370
380	4.0	.7133	3231.8	2932.1	7.8357	4.0	380
390	4.0	.7245	3252.6	2948.2	7.8673	4.0	390



400	.7726	.7356	.7020	3273.5	3273.1	3272.8	2964.4	2964.2	2963.9	7.8985	7.8756	7.8538	400
410	.7843	.7468	.7127	3294.4	3294.1	3293.7	2980.6	2980.4	2980.2	7.9293	7.9065	7.8847	410
420	.7960	.7579	.7233	3315.3	3315.0	3314.7	2996.9	2996.7	2996.5	7.9598	7.9369	7.9152	420
430	.8077	.7691	.7340	3336.3	3336.0	3335.8	3013.2	3013.0	3012.8	7.9899	7.9670	7.9453	430
440	.8194	.7802	.7446	3357.4	3357.1	3356.8	3029.6	3029.4	3029.2	8.0196	7.9968	7.9751	440
450	.8311	.7913	.7552	3378.5	3378.2	3378.0	3046.1	3045.9	3045.7	8.0490	8.0262	8.0045	450
460	.8427	.8025	.7658	3399.7	3399.4	3399.2	3062.6	3062.4	3062.2	8.0781	8.0553	8.0336	460
470	.8544	.8136	.7764	3420.9	3420.7	3420.4	3079.1	3079.0	3078.8	8.1068	8.0841	8.0624	470
480	.8661	.8247	.7871	3442.2	3441.9	3441.7	3095.8	3095.6	3095.4	8.1353	8.1125	8.0909	480
490	.8777	.8358	.7977	3463.5	3463.3	3463.1	3112.4	3112.3	3112.1	8.1635	8.1407	8.1190	490

Πίνακας 4-12: Ιδιότητες ελαφρού ύδατος και υπέρθερμου υδρατμού  
σύμφωνα με τους Πίνακες των Schmidt E. και Grigull U.,  
1970.

t °C	4,0 bar t <sub>s</sub> = 143,02 °C				4,0 bar t <sub>s</sub> = 145,39 °C				4,0 bar t <sub>s</sub> = 147,09 °C				4,0 bar t <sub>s</sub> = 148,73 °C			
	v''	A''	s''	A	v''	A''	s''	A	v''	A''	s''	A	v''	A''	s''	A
0	0,0010000	0,4	-0,0001	0,0010000	0,4	-0,0001	0,0010000	0,4	-0,0001	0,0010000	0,4	-0,0001	0,0010000	0,4	-0,0001	0,0010000
10	0,0010001	42,4	0,1510	0,0010001	42,4	0,1510	0,0010001	42,4	0,1510	0,0010001	42,4	0,1510	0,0010001	42,4	0,1510	0,0010001
20	0,0010015	84,1	0,2962	0,0010015	84,1	0,2962	0,0010015	84,1	0,2962	0,0010015	84,1	0,2962	0,0010015	84,1	0,2962	0,0010015
30	0,0010041	126,0	0,4364	0,0010041	126,0	0,4364	0,0010041	126,1	0,4364	0,0010041	126,1	0,4364	0,0010041	126,1	0,4364	0,0010041
40	0,0010076	167,8	0,5720	0,0010076	167,8	0,5720	0,0010076	167,8	0,5720	0,0010076	167,8	0,5720	0,0010076	167,9	0,5719	0,0010076
50	0,0010119	209,6	0,7033	0,0010119	209,6	0,7033	0,0010119	209,6	0,7033	0,0010119	209,6	0,7033	0,0010119	209,6	0,7033	0,0010119
60	0,0010170	251,4	0,8308	0,0010170	251,4	0,8308	0,0010170	251,4	0,8308	0,0010170	251,4	0,8308	0,0010170	251,5	0,8307	0,0010170
70	0,0010227	293,1	0,9546	0,0010227	293,1	0,9546	0,0010227	293,1	0,9546	0,0010227	293,1	0,9546	0,0010227	293,3	0,9546	0,0010227
80	0,0010290	335,2	1,0750	0,0010290	335,2	1,0750	0,0010290	335,2	1,0750	0,0010290	335,2	1,0750	0,0010290	335,3	1,0750	0,0010290
90	0,0010360	377,2	1,1923	0,0010360	377,2	1,1923	0,0010360	377,2	1,1923	0,0010360	377,2	1,1923	0,0010360	377,2	1,1922	0,0010360
100	0,0010436	419,3	1,3066	0,0010435	419,3	1,3066	0,0010435	419,3	1,3066	0,0010435	419,3	1,3066	0,0010435	419,3	1,3066	0,0010435
110	0,0010517	461,5	1,4183	0,0010517	461,5	1,4183	0,0010517	461,5	1,4183	0,0010517	461,5	1,4182	0,0010517	461,5	1,4182	0,0010517
120	0,0010605	503,9	1,5274	0,0010605	503,9	1,5274	0,0010605	503,9	1,5274	0,0010605	503,9	1,5274	0,0010605	503,9	1,5274	0,0010605
130	0,0010699	546,4	1,6342	0,0010699	546,4	1,6342	0,0010699	546,4	1,6342	0,0010699	546,4	1,6342	0,0010699	546,4	1,6342	0,0010699
140	0,0010800	589,1	1,7390	0,0010800	589,1	1,7390	0,0010800	589,1	1,7390	0,0010800	589,1	1,7390	0,0010800	589,2	1,7389	0,0010800
150	0,4707	273,0	6,9285	0,4473	275,0	6,9028	0,4261	278,5	6,8780	0,4068	282,0	6,8544	0,3868	285,5	6,8300	0,3668
160	0,4837	274,2	6,9805	0,4599	272,7	6,9551	0,4381	277,1	6,9308	0,4184	280,5	6,9074	0,3997	284,0	6,8830	0,3797
170	0,4966	276,1	7,0305	0,4722	270,4	7,0055	0,4500	275,3	6,9815	0,4300	278,0	6,9585	0,4026	281,5	6,9355	0,3926
180	0,5093	281,8	7,0788	0,4843	268,5	7,0541	0,4617	273,5	7,0304	0,4410	276,0	7,0077	0,4145	279,0	6,9830	0,4055
190	0,5218	283,2	7,1255	0,4963	268,0	7,1010	0,4732	273,0	7,0776	0,4530	278,5	7,0552	0,4265	280,5	7,0300	0,4180
200	0,5343	286,4	7,1708	0,5082	269,3	7,1466	0,4846	273,5	7,1234	0,4650	280,0	7,1000	0,4385	282,0	7,0765	0,4305
210	0,5466	288,4	7,2148	0,5200	288,0	7,1908	0,4959	287,0	7,1678	0,4778	287,5	7,1457	0,4505	288,0	7,1180	0,4425
220	0,5589	290,2	7,2576	0,5317	290,1	7,2338	0,5071	290,0	7,2109	0,4886	289,7	7,1887	0,4625	289,5	7,1600	0,4545
230	0,5710	293,1	7,2994	0,5434	292,3	7,2757	0,5182	292,5	7,2530	0,4993	292,0	7,2352	0,4745	291,5	7,2115	0,4665
240	0,5831	294,9	7,3402	0,5549	294,3	7,3166	0,5293	294,4	7,2940	0,5100	294,5	7,2784	0,4860	294,0	7,2600	0,4780
250	0,5952	296,4	7,3800	0,5664	296,3	7,3565	0,5403	296,3	7,3340	0,5210	296,2	7,3175	0,4975	296,0	7,3000	0,4895
260	0,6072	298,5	7,4190	0,5779	298,4	7,3956	0,5513	298,3	7,3732	0,5320	298,2	7,3558	0,5090	298,0	7,3400	0,5015
270	0,6192	300,5	7,4572	0,5893	300,3	7,4339	0,5622	300,4	7,4116	0,5430	300,3	7,3970	0,5205	300,2	7,3800	0,5135
280	0,6311	302,3	7,4947	0,6007	302,5	7,4714	0,5731	302,5	7,4492	0,5540	302,4	7,4320	0,5315	302,3	7,4170	0,5255
290	0,6430	304,6	7,5314	0,6120	304,6	7,5082	0,5839	304,5	7,4861	0,5650	304,5	7,4690	0,5425	304,4	7,4510	0,5375
300	0,6549	306,7	7,5675	0,6234	306,7	7,5444	0,5947	306,6	7,5233	0,5760	306,5	7,5011	0,5540	306,5	7,4830	0,5490
310	0,6667	308,7	7,6030	0,6346	308,7	7,5799	0,6055	308,6	7,5579	0,5870	308,6	7,5368	0,5655	308,5	7,5170	0,5605
320	0,6785	310,8	7,6379	0,6459	310,7	7,6149	0,6163	310,7	7,5959	0,5980	310,7	7,5748	0,5770	310,6	7,5560	0,5720
330	0,6903	312,8	7,6723	0,6572	312,8	7,6493	0,6270	312,8	7,6373	0,6090	312,7	7,6170	0,5885	312,7	7,6000	0,5835
340	0,7021	314,9	7,7061	0,6684	314,9	7,6831	0,6378	314,8	7,6612	0,6200	314,8	7,6400	0,6000	314,8	7,6240	0,5950
350	0,7139	317,0	7,7395	0,6796	316,9	7,7165	0,6485	316,9	7,6946	0,6310	316,9	7,6730	0,6110	316,9	7,6570	0,6065
360	0,7256	319,0	7,7723	0,6908	319,0	7,7494	0,6592	318,9	7,7275	0,6420	318,9	7,7060	0,6220	318,9	7,6900	0,6175
370	0,7373	321,1	7,8047	0,7020	321,1	7,7818	0,6699	321,0	7,7600	0,6540	321,0	7,7390	0,6330	321,0	7,7230	0,6285
380	0,7491	323,2	7,8367	0,7132	323,2	7,8138	0,6806	323,1	7,7920	0,6660	323,1	7,7710	0,6450	323,1	7,7550	0,6395
390	0,7608	325,2	7,8683	0,7244	325,2	7,8454	0,6912	325,1	7,8236	0,6770	325,1	7,8020	0,6560	325,1	7,7860	0,6505
400	0,7725	327,3	7,8994	0,7355	327,3	7,8766	0,7019	327,3	7,8548	0,6880	327,2	7,8330	0,6670	327,2	7,8170	0,6615
410	0,7842	329,4	7,9302	0,7467	329,4	7,9074	0,7125	329,3	7,8836	0,6990	329,3	7,8610	0,6780	329,3	7,8450	0,6725
420	0,7959	331,4	7,9606	0,7578	331,5	7,9378	0,7232	331,4	7,8960	0,7100	331,4	7,8740	0,6890	331,4	7,8570	0,6835
430	0,8076	333,4	7,9906	0,7689	333,6	7,9678	0,7338	333,5	7,9461	0,7210	333,5	7,9240	0,7000	333,5	7,9070	0,6945
440	0,8192	335,4	8,0203	0,7801	335,7	7,9976	0,7444	335,6	7,9738	0,7320	335,6	7,9510	0,7110	335,6	7,9340	0,7055
450	0,8309	337,5	8,0497	0,7912	337,8	8,0269	0,7551	337,8	8,0031	0,7430	337,8	7,9800	0,7220	337,8	7,9630	0,7165
460	0,8426	339,5	8,0787	0,8023	339,9	8,0560	0,7657	339,9	8,0343	0,7540	339,9	8,0110	0,7330	339,9	7,9960	0,7275
470	0,8542	342,9	8,1075	0,8134	342,6	8,0847	0,7763	342,6	8,0630	0,7650	342,6	8,0400	0,7440	342,6	8,0200	0,7385
480	0,8659	344,2	8,1359	0,8245	344,9	8,1132	0,7869	344,9	8,0915	0,7760	344,9	8,0680	0,7550	344,9	8,0470	0,7495
490	0,8775	346,3	8,1640	0,8355	346,3	8,1413	0,7975	346,3	8,1196	0,7860	346,3	8,0950	0,7660	346,3	8,0760	0,7605
500	0,8892	348,9	8,1919	0,8467	348,6	8,1692	0,8081	348,4	8,1475	0,7950	348,4	8,1240	0,7750	348,4	8,1050	0,7715
510	0,9008	350,6	8,2195	0,8578	350,6	8,1967	0,8187	350,5	8,1731	0,8040	350,5	8,1510	0,7850	350,5	8,1360	0,7825
520	0,9125	352,8	8,2468	0,8689	352,6	8,2241	0,8293	352,4	8,2004	0,8150	352,4	8,1780	0,7960	352,4	8,1630	0,7935
530	0,9241	354,9	8,2738	0,8800	354,9	8,2511	0,8399	354,9	8,2269	0,8260	354,9	8,2040	0,8070	354,9	8,1880	0,8045
540	0,9357	357,1	8,3006	0,8911	357,0	8,2779	0,8504	357,0	8,2527	0,8370	357,0	8,2300	0,8180	357,0	8,2130	0,8155
550	0,9474	359,2	8,3271	0,9021	359,2	8,3044	0,8610	359,2	8,2784	0,8480	359,2	8,2560	0,8290	359,2	8,2390	0,8265

**Πίνακας 4-13: Σύμβολα, ονοματολογία και μονάδες δευτερευουσών μεταβλητών (αλφαβητικά).**

A	ταχύτητα του ήχου σε m/sec (υπορουτίνες SHR_SOVE και TOTAL)
CP	ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση σε kJ/(kgK) (υπορουτίνες SHP και TOTAL)
CV	ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σε kJ/(kgK) (υπορουτίνες SHV και TOTAL)
DF	πυκνότητα του υγρού σε g/cm <sup>3</sup> (D ≡ Density, F ≡ Fluid)
DF	(υπορουτίνες DENSF και LIGHT_WASP) παράγωγος της συνάρτησης F (υπορουτίνες SOLVE)
DG	πυκνότητα του ατμού σε g/cm <sup>3</sup> (D ≡ Density, G ≡ Gas)
DL	(υπορουτίνες DENSF και LIGHT_WASP) πυκνότητα του υγρού σε g/cm <sup>3</sup> (L - Liquid)
DV	(υπορουτίνες SVLWL και DENSF) πυκνότητα του ατμού σε g/cm <sup>3</sup> (V - Vapor)
EPS	(υπορουτίνες SVLWV και DENSG) ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνες SOLVE (παίρνει τιμές στις υπορουτίνες SVLWL, SVLWV, DENSF, DENSG και CHECKPT)
GAMMA	λόγος ειδικών θερμοχωρητικότητας (υπορουτίνες SHR_SOVE και TOTAL)
H	ενθαλπία σε kJ/kg
HDT	(υπορουτίνες ENTHALPY και TOTAL) (∂h/∂p):
HTD	(υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE και SHP) (∂h/∂T) <sub>p</sub>
Q	(υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE και SHP) ποσότητα που δίνεται από τη σχέση (3-4) (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP, ENTROPY, ENTHALPY, ENERGY, FP, DFPD και QMUST)

QDT	$(\partial Q/\partial p)_t$ (υπορουίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP, ENTHALPY, FP, DFPD και QMUST)
QTD	$(\partial Q/\partial t)_p$ (υπορουίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP, ENTROPY, ENTHALPY, ENERGY και QMUST)
Q2DT	$\partial^2 Q/(\partial p \partial t)$ (υπορουίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP και QMUST)
Q2D2T	$(\partial^2 Q/\partial^2 t)_t$ (υπορουίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP, DFPD και QMUST)
Q2T2D	$(\partial^2 Q/\partial^2 t)_p$ (υπορουίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHV και QMUST)
IBM	ισοθερμοκρασιακή συμπιεστικότητα σε $\text{MPa}^{-1}$ (υπορουίνες IBM_JTC και TOTAL)
IER	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (βλέπε και τις υπορουίνες SVLWL, SVLWV, DENSF, DENSJ και CHECKPT)
ITMAX	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (βλέπε και τις υπορουίνες SVLWL, SVLWV, DENSF, DENSJ και CHECKPT)
JTC	Συντελεστής Joule - Thomson σε K/MPa (υπορουίνες IBM_JTC και TOTAL)
K	Θερμική Αγωγιμότητα σε W/(mK) (υπορουίνες CONDUCTIVE και TOTAL)
MU	Δυναμική Συνεκτικότητα σε kg/(ms)
NDEC	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (παίρνει τιμές στις υπορουίνες SVLWL, SVLWV, DENSF, DENSJ και CHECKPT)
PRANDTL	αριθμός Prandtl
PC	κρίσιμη πίεση σε bar
PMAX	(blockdata CONSTANTS και υπορουίνες DFPs, FPS και CHECKPT) το άνω όριο της πίεσης λειτουργίας του κώδικα σε bar (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)

PMIN	το κάτω όριο της πίεσης λειτουργίας του κώδικα σε bar (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)
PDT	$(\partial P/\partial p)_T$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE και SHP)
PP	πίεση σε bar (υπορουτίνες CHECKPT και LIGHT_WASP και functions FP, FPS και FTS)
PR	ανηγγμένη πίεση (υπορουτίνες SVLWL, SVLWV, CHECKPT και LIGHT_WASP και function FPR3)
PRTRDR	$(\partial P_r/\partial T_r)_{pr}$ (υπορουτίνα CONDUCTIVE)
PSI	ελεύθερη εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg (υπορουτίνες ENERGY και TOTAL)
PSI0	ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς σε kJ/kg (υπορουτίνες ENERGY και ENTHALPY)
PSI0T	$d\psi_0/dT$ (υπορουτίνες ENTROPY, ENTHALPY, ENERGY και QMUST)
PSI0T2	$d^2\psi_0/d^2T$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHV, SHP και QMUST)
PTD	$(\partial P/\partial T)_p$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE και SHP)
S	εντροπία σε kJ/(kgK) (υπορουτίνες ENTROPY και TOTAL)
SIGMA	επιφανειακή τάση σε N/m (υπορουτίνες TENSION και TOTAL)
TC	κρίσιμη θερμοκρασία σε K (blockdata CONSTANTS, υπορουτίνες CHECKPT και LIGHT_WASP και functions PRS, FPS και DFPS)
TMAX	το άνω θερμοκρασιακό όριο λειτουργίας του κώδικα σε K (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)
TMIN	το κάτω θερμοκρασιακό όριο λειτουργίας του κώδικα σε K (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)

TR	<p>ανηγμένη θερμοκρασία  (υπορουτίνες SVLWL, SVLWV, CHECKPT και LIGHT_WASP και  functions FPR4, DFPR4, FPR3, DFPR3, PRL και PRS)</p>
TT	<p>θερμοκρασία σε Κ  (υπορουτίνες VISCOSITY, IBM_JTC, SHR_SOVE, SHV, SHP,  ENTROPY, ENTHALPY, ENERGY και QMUST)</p>
U	<p>εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg  (υπορουτίνες ENERGY και TOTAL)</p>
VC	<p>κρίσιμος ειδικός όγκος  (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνες SVLWL και SVLWV)</p>
XTR	<p><math>\rho_r (\partial\rho_r/\partial P_r)_{T_r}</math>  (υπορουτίνες VISCOSITY και CONDUCTIVE)</p>
X1	<p>ανηγμένος ειδικός όγκος στις υποπεριοχές 1 και 6  (υπορουτίνα SVLWL)</p>
X2	<p>ανηγμένος ειδικός όγκος στις υποπεριοχές 2 και 6  (υπορουτίνα SVLWV)</p>
X3	<p>ανηγμένος ειδικός όγκος στις υποπεριοχές 3 και 5  (υπορουτίνες FPR3, DFPR3 και SVLWV)</p>
X4	<p>ανηγμένος ειδικός όγκος στις υποπεριοχές 4 και 5  (υπορουτίνες FPR4, DFPR4 και SVLWL)</p>

**Πίνακας 4-14: Μετρίως Εξηρητημένα Υποπρογράμματα  
(αλφαβητικά)**

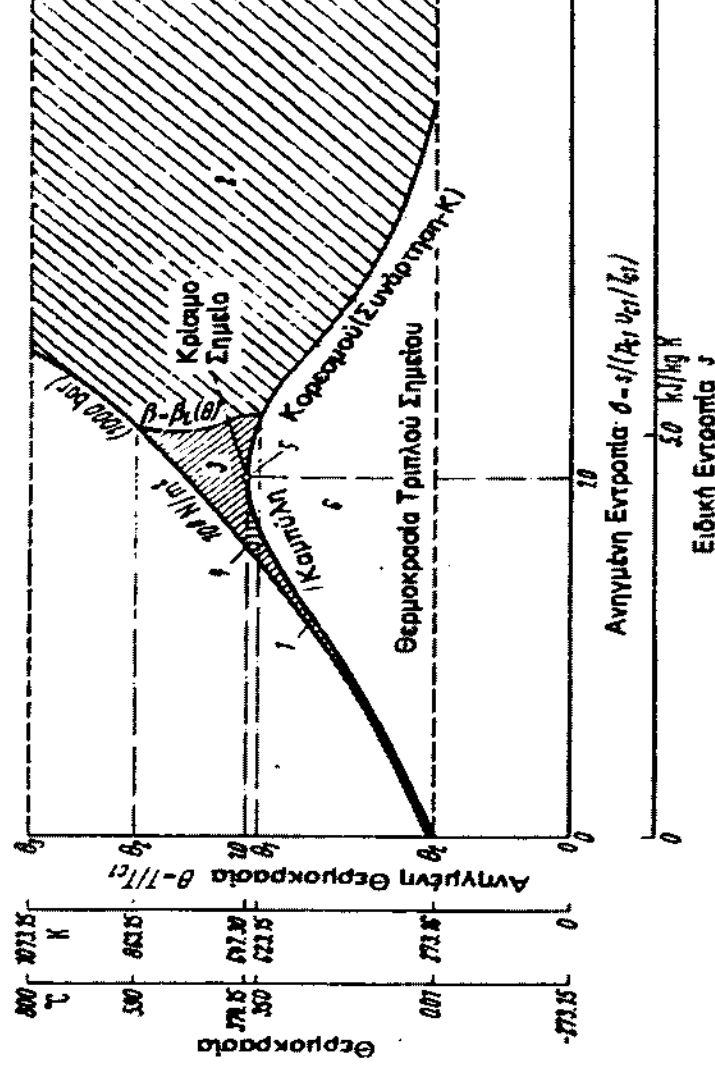
<u>Subroutines</u>	<u>Functions</u>
CHECKPT	DFPD
CONDUCTIVE	DFPR3
DENSE	DFPR4
DENSG	DFPS
ENERGY	FP
ENTHALPY	FPR3
ENTROPY	FPR4
LIGHT_WASP	FPS
IBM_JTC	FTS
SHP	PRL
SHR_SOVE	
SHV	
SVLWL	
SVLWV	
TENSION	
TOTAL	
VISCOSITY	

Πίνακας 4-15: Προαιρετικά υποπρογράμματα

ΟΝΟΜΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΝΤΟΛΩΝ (~)	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΙΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ
CONDUCTIVE	50	Τροποποίηση της TOTAL.
ENERGY	15	"
ENTHALPY	15	"
ENTROPY	15	"
IBM_JTC	35	"
SHP	35	"
SHR_SOVE	40	"
SHV	15	"
TENSION	20	"
VISCOSITY και βέβαια	40	"
TOTAL	70	Αφαίρεση όλων των προηγούμενων υποπρογραμμάτων. Τροποποίηση της LIGHT_WASP.



## Διαγράμματα του Κεφαλαίου



Διάγραμμα 4-1 : Διάγραμμα T-S για το ελαφρύ ύδωρ - Υποπεριοχές.

### Υπόμνημα Διαγράμματος 4-1.

- 1 Υγρή φάση και μέρος της υπεγκρίσιμης φάσης.
- 2 Ατμώδης φάση και μέρος της υπεγκρίσιμης φάσης.
- 3 Γειτονιά του κρίσιμου σημείου και μέρος της υπεγκρίσιμης φάσης.
- 4 Περιοχή θερμοκρασιών γύρω από το κρίσιμο σημείο (αντίστοιχη περιοχή πιέσεων: υπεγκρίσιμες).
- 5 Κατάσταση κορεσμού στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου.
- 6 Κατάσταση κορεσμού.

$$\Theta_1 \equiv T_H$$

Ανηγμένη θερμοκρασία στο τριπλό σημείο.

$$\Theta_1 \equiv T_{R1}$$

Θερμοκρασιακό όριο για τις υποπεριοχές.

$$\Theta_2 \equiv T_2$$

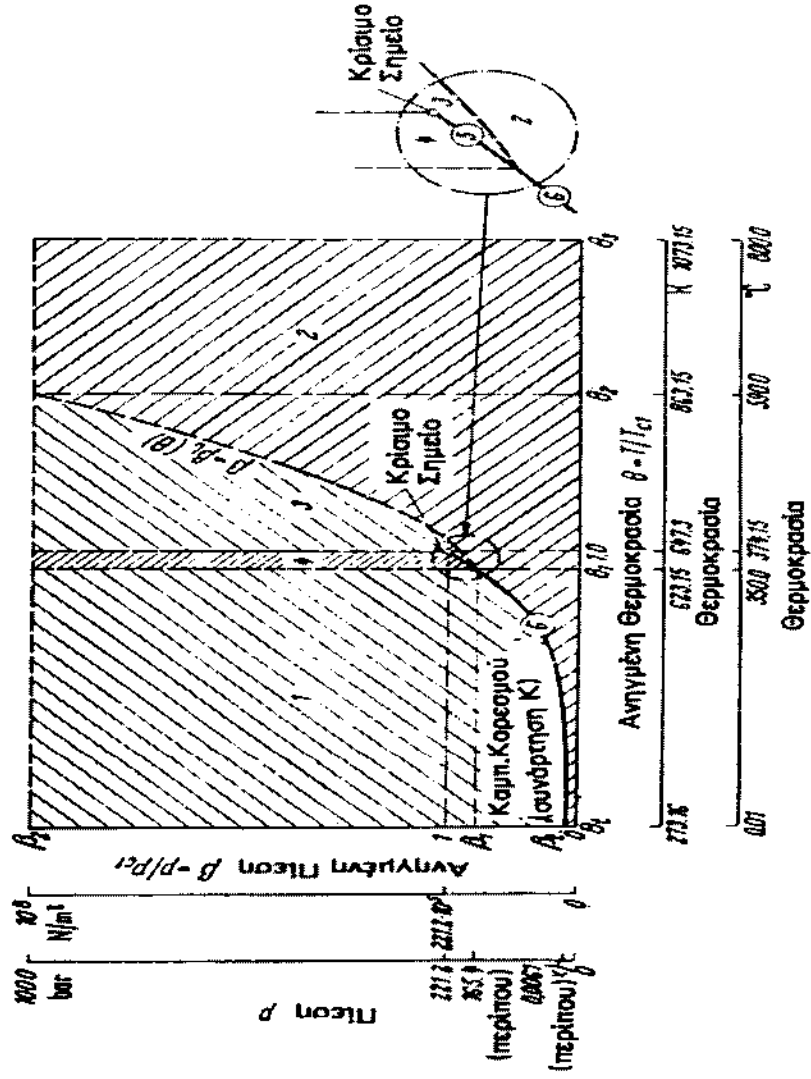
Θερμοκρασιακό όριο για τις υποπεριοχές.

$$\Theta_3 \equiv T_3$$

Ανώτατη θερμοκρασία ( $T \approx 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$$\beta = \beta_L(\Theta) \text{ ή } P_r = P_{rL}(T_r)$$

Συνάρτηση - όριο μεταξύ των υποπεριοχών 2 και 3.



Διάγραμμα 4-2 : Διάγραμμα P - V για το ελαφρύ ύδωρ - Υποπεριοχές<sup>28</sup> .

<sup>28</sup> Βλέπε και το υπόμνημα του Διαγράμματος 4-1.

## 5. ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΑΡΕΟΣ ΥΔΑΤΟΣ

### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

5. ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΑΡΕΟΣ ΥΔΑΤΟΣ.....	5-1
5.1 Εισαγωγή.....	5-1
5.2 Το πρόβλημα του αριθμητικού υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος.....	5-2
5.2.1 Οι απόλυτα απαραίτητες σχέσεις.....	5-4
5.2.2 Άλλες δευτερεύουσες αλλά αναγκαίες σχέσεις.....	5-5
5.3 Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες.....	5-7
5.4 Το πρόβλημα του υπολογισμού της πυκνότητας.....	5-9
5.4.1 Γενικά.....	5-9
5.4.2 Ακολουθούμενη αριθμητική μέθοδος.....	5-10
5.4.3 Μέθοδος για τον προσδιορισμό της αρχικής προσέγγισης της πυκνότητας.....	5-10
5.4.3.1 Υπολογισμός της πυκνότητας του βαρέος ύδατος σύμφωνα με την διατύπωση IFC-1967 για το ελαφρύ ύδωρ.....	5-11
5.4.3.2 Δυσκολίες στον υπολογισμό της πυκνότητας του βαρέος ύδατος σύμφωνα με την διατύπωση IFC-1967 για το ελαφρύ ύδωρ.....	5-14
5.5 Υπολογισμός της θερμοκρασίας κορεσμού.....	5-15
5.6 Ο αριθμητικός κώδικας HEAVY_WASP.....	5-18
5.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά του κώδικα.....	5-19
5.6.2 Οδηγίες χρήσεως του κώδικα.....	5-21
5.6.3 Αντιμετώπιση λαθών (troubleshooting).....	5-24
5.7 Τα υποπρογράμματα του κώδικα.....	5-25
5.7.1 Υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου.....	5-25
5.7.1.1 Υπορουτίνα HEAVY_WASP(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS).....	5-25
5.7.1.2 Υπορουτίνα CHECKPT(TS,JR,IS).....	5-26
5.7.1.3 Συνάρτηση FPS(TS).....	5-26
5.7.1.4 Συνάρτηση PRL(TR).....	5-26
5.7.2 Υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού.....	5-26

5.7.2.1	Συνάρτηση FTS(PP).....	5-26
5.7.2.2	Συνάρτηση DFPS(TS).....	5-27
5.7.3	Υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου.....	5-27
5.7.3.1	Υπορουτίνα DENSE(DF).....	5-28
5.7.3.2	Υπορουτίνα DENS(DG).....	5-28
5.7.3.3	Υπορουτίνα SVLWL(DL).....	5-28
5.7.3.4	Συνάρτηση FPR4(X4).....	5-28
5.7.3.5	Συνάρτηση DFPR4(X4).....	5-29
5.7.3.6	Υπορουτίνα SVLWV(DV).....	5-29
5.7.3.7	Συνάρτηση FPR3(X3).....	5-29
5.7.3.8	Συνάρτηση DFPR3(X3).....	5-29
5.7.3.9	Συνάρτηση FP(DD).....	5-30
5.7.3.10	Συνάρτηση DFPD(DD).....	5-30
5.7.3.11	Υπορουτίνα QMUST.....	5-30
5.7.4	Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.....	5-30
5.7.4.1	Υπορουτίνα TOTAL(JP,U,H,S,B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4, CP,CV,IBM,JTC,GAMMA,A,MU,K,PRANDTL,SIGMA).....	5-31
5.7.4.2	Υπορουτίνα ENERGY(U).....	5-31
5.7.4.3	Υπορουτίνα ENTHALPY(H).....	5-31
5.7.4.4	Υπορουτίνα ENTROPY(S).....	5-31
5.7.4.5	Υπορουτίνα SHP(CP).....	5-31
5.7.4.6	Υπορουτίνα SHV(CV).....	5-31
5.7.4.7	Υπορουτίνα SHR_SOVE(GAMMA,A).....	5-32
5.7.4.8	Υπορουτίνα IBM_JTC(IBM,JTC).....	5-32
5.7.5	Υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς.....	5-32
5.7.5.1	Υπορουτίνα VISCOSITY(MU).....	5-32
5.7.5.2	Υπορουτίνα CONDUCTIVE(K).....	5-32
5.7.5.3	Υπορουτίνα TENSION(SIGMA).....	5-32
5.7.6	Υποπρογράμματα μαθηματικών υπολογισμών.....	5-32
5.7.6.1	Υπορουτίνα SOLVE(F,DF,EPS,NDEC,X,ITMAX,IER).....	5-32
5.7.7	Άλλα επικουρικά υποπρογράμματα.....	5-33
5.7.7.1	Υποπρόγραμμα δεδομένων CONSTANTS.....	5-33
5.7.7.2	Κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE και συγκριτικά αποτελέσματα.....	5-33
5.8	Λειτουργία του κώδικα HEAVY_WASP.....	5-34
5.9	Μορφολογικά χαρακτηριστικά των υποπρογραμμάτων του κώδικα.....	5-42

5.9.1	Βαθμός αλληλεξάρτησης των υποπρογραμμάτων.....	5-42
5.9.2	Ανεξάρτητα υποπρογράμματα.....	5-44
5.9.3	Μετρίως εξαρτημένα υποπρογράμματα.....	5-44
5.9.4	Πλήρως εξαρτημένα υποπρογράμματα.....	5-45
5.10	Η δομική ευελιξία του κώδικα.....	5-46



# ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΑΡΕΟΣ ΥΔΑΤΟΣ

### 5.1 Εισαγωγή.

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά ο κώδικας ηλεκτρονικού υπολογιστή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος. Στα πλαίσια του αναπτυχθέντος κώδικα οι θερμοφυσικές ιδιότητες του β.υ. υπολογίζονται –όπως και για την περίπτωση του ελαφρού ύδατος<sup>1</sup>– για δεδομένη πίεση P και θερμοκρασία T, πράγμα που ειδικά εξυπηρετεί σε προβλήματα Θερμοϋδραυλικής Ανάλυσης Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος. Αρχικά αναφέρονται συνοπτικά οι σχέσεις εκείνες που θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες, και ακριβείς για τη σύνταξη του κώδικα, και οι οποίες παρουσιάστηκαν ήδη στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Στη συνέχεια διατυπώνεται η κοινή περιοχή ισχύος όλων των χρησιμοποιούμενων σχέσεων. Κατ' ακολουθία αυτή θεωρείται και η περιοχή ισχύος του κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος. Σημαντικό μέρος του Κεφαλαίου καταλαμβάνει ακολούθως η διεξοδική ανάπτυξη του πρωτεύοντος προβλήματος του υπολογισμού της πυκνότητας δεδομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας από την πεπλεγμένη ως προς την πυκνότητα καταστατική εξίσωση του β.υ. που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί. Καλύπτεται επιπλέον και το πρόβλημα του ακριβούς υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού, όταν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού, από την πεπλεγμένη ως προς τη θερμοκρασία εξίσωση κορεσμού. Τέλος, όπως ακριβώς συμβαίνει και για τον αντίστοιχο κώδικα του ε.υ. στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αφιερώνονται ειδικές παράγραφοι στην διεξοδική και λεπτομερή περιγραφή του κώδικα.

Ο κώδικας συντάχθηκε σε γλώσσα FORTRAN 77, κάτω από το Λειτουργικό Σύστημα UNIX HP-UX 7.05 B, το οποίο υποστηρίζεται από τον super-mini H/Y του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας HP 9000/380. Για τη συγκρότηση του κώδικα

---

<sup>1</sup> 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

ακολουθήθηκαν αρχές δομημένου προγραμματισμού, προκειμένου να εξασφαλίζεται α) ευκολία στη χρήση, β) ευκολία στην τροποποίηση γ) ευκολία στη μετατροπή του κώδικα προκειμένου να μπορεί να εφαρμοζόμαστε για άλλη έκδοση της γλώσσας FORTRAN ή/και για άλλο λειτουργικό σύστημα ή/και σε άλλο τύπου ηλεκτρονικό υπολογιστή, και τέλος δ) συμβατότητα στον τρόπο ανάπτυξης και στον τρόπο λειτουργίας με τον αντίστοιχο κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάστηκαν στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Μία τέτοια συμβατότητα στον τρόπο ανάπτυξης και λειτουργίας των δύο αυτών κωδικών είναι απαραίτητη προϋπόθεση στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ, προκειμένου να είναι δυνατό να επιτευχθεί η σύγκριση της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των δύο αυτών ψυκτικών.

Σημειώνεται ότι αντίστοιχοι εμπορικοί κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος **δεν είναι σήμερα διαθέσιμοι στην αγορά**.

Όλα τα υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος παρατίθενται στο Παράρτημα ΙΙ της Διδακτορικής Διατριβής.

## **5.2 Το πρόβλημα του αριθμητικού υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος.**

Με βάση τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύχθηκε, στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής, κώδικας για τον αριθμητικό υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος. Ο κώδικας ονομάστηκε **HEAVY\_WASP (HEAVY Water And Steam Properties)** και κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετεί πολύπλοκους υπολογισμούς που αφορούν στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία των Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος, οι οποίοι εργάζονται με βαρύ ύδωρ. Ο κώδικας αυτός δέχεται σαν είσοδο την πίεση σε bar και την θερμοκρασία σε μονάδες Κ. Στην περίπτωση που ζητείται να υπολογισθούν ιδιότητες για μία κατάσταση κορεσμού αρκεί ο κώδικας να δεχθεί ως είσοδο μόνο την πίεση ή μόνο τη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα που παρέχει ο κώδικας είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν ένα μέρος ή και το σύνολο των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων μεταφοράς του βαρέος ύδατος ανάλογα με τις ανάγκες και τις επιλογές του χρήστη.



Τέσσερα είναι τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζονται προκειμένου για την υλοποίηση των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος στον κώδικα HEAVY\_WASP.

1. Οι συσχετίσεις και γενικά οι εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες, που παρουσιάσθηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, δεν είναι αρκετές για να συγκροτήσουν τον κώδικα που ζητείται. Αυτό συμβαίνει διότι οι σχέσεις αυτές περιλαμβάνουν και όρους παραγώγων των οποίων η αναλυτική μορφή είναι άγνωστη και ως εκ τούτου πρέπει να υπολογισθεί. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό οι άγνωστες παράγωγοι πρέπει να προσεγγισθούν με αριθμητικό τρόπο.
2. Πρέπει να διατυπωθεί η κοινή περιοχή ισχύος πιέσεων και θερμοκρασιών, όλων των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος, η οποία κατ' ακολουθία είναι η περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών για την οποία ισχύει ο κώδικας.
3. Τόσο η καταστατική εξίσωση όσο και σχεδόν όλες οι εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος, οι οποίες χρησιμοποιούνται στον κώδικα δέχονται ως είσοδο την θερμοκρασία  $T$  και την πυκνότητα  $\rho$ . Στα προβλήματα όμως θερμοϋδραυλικής ανάλυσης των ΠΑΙ εξυπηρετεί όταν οι θερμοφυσικές ιδιότητες υπολογίζονται σε συνάρτηση με την πίεση  $P$  και τη θερμοκρασία  $T$ . Προκύπτει λοιπόν πρόβλημα αριθμητικής επίλυσης της χρησιμοποιούμενης καταστατικής εξίσωσης για το βαρύ ύδωρ<sup>2</sup>, η οποία ισοδύναμα έχει τη μορφή  $P = P(\rho, T)$ <sup>3</sup>, ως προς την πυκνότητα  $\rho$ , δεδομένης της πίεσης  $P$  και της θερμοκρασίας  $T$  προκειμένου να καταστεί δυνατόν να υπολογίζονται οι υπόλοιπες θερμοφυσικές ιδιότητες.
4. Στην περίπτωση που ζητείται να υπολογισθούν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος στην κατάσταση κορεσμού και το μόνο σχετικό δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού  $P_s$ , τότε πρέπει να επιλυθεί η εξίσωση κορεσμού<sup>4</sup>  $P_s = P_s(T_s)$ , ως προς τη θερμοκρασία κορεσμού  $T_s$ , προκειμένου να υπολογισθεί ακριβώς το ζεύγος πίεσης και θερμοκρασίας για το οποίο πρέπει να γίνουν οι υπολογισμοί των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος από τον κώδικα.

---

<sup>2</sup> Εξίσωση (3-40), § 3.4.2.

<sup>3</sup> Βλέπε § 3.4.3 και εξίσωση (3-3)

### 5.2.1 Οι απόλυτα απαραίτητες σχέσεις.

Στην παρουσίαση που έγινε στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο επισημάνθηκαν οι καταλληλότερες σχέσεις και συσχετίσεις που επελέγησαν να χρησιμοποιηθούν στο υπολογιστικό μέρος αυτής της Διδακτορικής Διατριβής σε ό,τι αφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος. Οι σχέσεις αυτές ορίζονται ως οι **απόλυτα απαραίτητες σχέσεις** για την κατασκευή του κώδικα, και εννοείται ότι χωρίς αυτές δεν μπορεί να γίνει δυνατή η ανάπτυξή του. Συγκεκριμένα, στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάσθηκαν σχέσεις για τις ακόλουθες θερμοφυσικές ιδιότητες (§§ 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5 και 3.3.3 – αριθμημένες σχέσεις):

- ελεύθερη εσωτερική ενέργεια  $\psi$  σε kJ/kg
- ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς  $\psi_0$  σε kJ/kg
- πίεση  $P$  σε MPa
- πίεση κορεσμού  $P_s = P_s(T_s)$  σε MPa (συνάρτηση της θερμοκρασίας κορεσμού)
- ειδική εσωτερική ενέργεια  $u$  σε kJ/kg
- ειδική εντροπία  $s$  σε kJ/(kgK)
- ειδική ενθαλπία  $h$  σε kJ/kg
- ειδική θερμοχωρητικότητα  $c_p$  σε kJ/(kgK)
- ειδική θερμοχωρητικότητα  $c_v$  σε kJ/(kgK)
- συντελεστής ισεντροπικής μεταβολής  $\gamma$
- συντελεστής Joule-Thomson  $\mu$  σε K/MPa
- ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα  $\kappa_T$  σε MPa<sup>-1</sup>
- ταχύτητα του ήχου  $a$  σε m/s
- δυναμική συνεκτικότητα  $\eta$  σε Pas
- θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$  σε W/(mK)
- επιφανειακή τάση  $\sigma$  σε N/m

---

<sup>4</sup> Εξίσωση (3-43) § 3.4.3.

## 5.2.2 Άλλες δευτερεύουσες αλλά αναγκαίες σχέσεις.

Οι απόλυτα απαραίτητες σχέσεις περιλαμβάνουν και όρους παραγώγων για τις οποίες πρέπει να βρεθεί τρόπος υπολογισμού. Το σύνολο αυτών των άγνωστων όρων οι οποίοι είναι αναγκαίοι στους υπολογισμούς<sup>5</sup> έχουν ως εξής:

$$(\partial Q/\partial p)_T, d(\psi_0 T)/dT, (\partial Q/\partial T)_p, d\psi_0/dT, (\partial h/\partial T)_p,$$

$$(\partial h/\partial T)_p, (\partial h/\partial p)_T, (\partial P/\partial T)_p, (\partial P/\partial p)_T \text{ και } (\partial u/\partial T)_p$$

Για τον υπολογισμό των αγνώστων αυτών παραγώγων μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε αριθμητικές μέθοδοι, είτε να καταβληθεί προσπάθεια ώστε να διατυπωθούν κλειστές μορφές εξισώσεων με βάση τις εξισώσεις για τις ποσότητες  $Q$ ,  $\psi_0$ ,  $h$ ,  $P$  και  $u$ . Όπως ήδη έχει σχολιασθεί για την περίπτωση του υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ε.ν., η χρήση αριθμητικών μεθόδων προϋποθέτει κόστος προγραμματιστικής προσπάθειας και χρόνου ηλεκτρονικού υπολογιστή, πράγμα που δεν εξυπηρετεί την ταχύτητα των υπολογισμών. Από την άλλη πλευρά οι κλειστές μορφές εξισώσεων για τον υπολογισμό αυτών των παραγώγων συνεπάγονται πολύπλοκες διατυπώσεις δεδομένου του συνθέτου των εξισώσεων για το διπλό άθροισμα<sup>6</sup>  $Q$ , για την ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς  $\psi_0$ , για την ενθαλπία  $h$  και τέλος για την πίεση  $P$  και την εσωτερική ενέργεια  $u$ . Στα πλαίσια της παρούσης  $\Delta\Delta$  οι διατυπώσεις αυτές προτιμώνται έναντι των αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού, διότι όχι μόνο εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ταχύτητα υπολογισμών αλλά απαλλάσσουν και το συντάκτη του κώδικα από αναγκάσιους ενδελεχείς ελέγχους της ποιότητας της παραγωγής. Οι διατυπώσεις αυτές για τις άγνωστες παραγώγους ονομάζονται **δευτερεύουσες αλλά αναγκαίες σχέσεις**.

Έχοντας υπόψη τις πρωτότυπες εξισώσεις για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες<sup>7</sup> μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τις σχέσεις (4-1) έως και (4-6) για τον υπολογισμό των αγνώστων ποσοτήτων:

$$(\partial P/\partial p)_T, (\partial P/\partial T)_p, (\partial h/\partial T)_p, (\partial h/\partial p)_T \text{ και } (\partial u/\partial T)_p$$

---

<sup>5</sup> Βλέπε και §§ 3.4.2, 3.4.3, 3.3.3 και 3.3.4.

<sup>6</sup> Σχέση (3-41) στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

<sup>7</sup> Βλέπε και §§ 3.4.2, 3.4.3, 3.3.3 και 3.3.4.

κατ' αναλογία με όσα αναφέρονται στην §4.2.2 και δεδομένης της κοινής μαθηματικής μορφής των καταστατικών εξισώσεων του ελαφρού και του βαρέος ύδατος.

Με βάση τα παραπάνω οι απαραίτητοι για τους υπολογισμούς άγνωστοι όροι των εξισώσεων για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος μειώνονται σημαντικά σε αριθμό και πολυπλοκότητα. Συνοπτικά είναι οι ακόλουθοι:

**α. Παράγωγοι της ποσότητας  $\psi_0$**

[ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς σε kJ/kg, σχέση (3-42)]

$$d\psi_0/dT, d(\psi_0\tau)/dT \text{ και } d^2\psi_0/dT^2$$

**β. Παράγωγοι του διπλού αθροίσματος  $Q$**

[κύρια συνάρτηση αναδρομής για την προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες, σχέση (3-41)]

$$(\partial Q/\partial\tau)_p, (\partial Q/\partial p)_\tau, (\partial^2 Q/\partial\tau^2)_p, (\partial^2 Q/\partial p^2)_\tau \text{ και } \partial^2 Q/(\partial\tau\partial p)$$

Είναι φανερό ότι υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού "κλειστών" μορφών εξισώσεων που να δίνουν τις προς υπολογισμό παραγώγους χάρη στην πολυωνυμική μορφή που έχουν στο μεγαλύτερο μέρος τους οι αναλυτικές σχέσεις για τις ποσότητες  $Q$  και  $\psi$ .

Κατ' αναλογία με όσα αναφέρονται στην §4.2.2 και δεδομένης της κοινής μαθηματικής μορφής των καταστατικών εξισώσεων του ελαφρού και του βαρέος ύδατος, είναι φανερό ότι για τις παραγώγους της ποσότητας  $Q$  της κ.ε. του β.υ., είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις (4 –7) έως και (4-11).

Με το ίδιο σκεπτικό για τις παραγώγους της ποσότητας  $\psi_0$  είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις (4-12) έως και (4-17) αλλά για αυτό το σκοπό<sup>8</sup> πρέπει να τεθεί  $j=6$ .

---

<sup>8</sup> Σύγκρινε τις σχέσεις (3-5) και (3-42)

### 5.3 Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες.

Αναφέρθηκε ήδη ότι οι καταλληλότερες σχέσεις και συσχετίσεις που επελέγησαν να χρησιμοποιηθούν στο υπολογιστικό μέρος αυτής της Διδακτορικής Διατριβής σε ό,τι αφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος αναπτύχθηκαν από τους<sup>9</sup>:

- Hill P.G. et al, 1981; 1982; 1983; 1988  
(καταστατική εξίσωση, εξίσωση κορεσμού και θερμοδυναμικές ιδιότητες)
- Matsunaga N. και Nagashima A., 1983a  
(δυναμική συνεκτικότητα και θερμική αγωγιμότητα) και
- Straub J. et al., 1980  
(επιφανειακή τάση)

Στις σχετικές παραγράφους του 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, παρουσιάστηκαν επίσης οι αντίστοιχες περιοχές πιέσεων και θερμοκρασιών για τις οποίες ισχύουν οι χρησιμοποιούμενες συσχετίσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος.

Από τη μελέτη των σχετικών δεδομένων προκύπτει ότι:

Η ελάχιστη κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων συσχετίσεων σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος μπορεί να ορισθεί ως η περιοχή ισχύος της καταστατικής εξίσωσης των Hill P.G. et al., 1981; 1982; 1983 -από την οποία προκύπτουν όπως αναφέρθηκε και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες:

- Πιέσεις: πίεση στο τριπλό σημείο  $P_t = 0.006601$  έως 1000 bar
- Θερμοκρασίες: θερμοκρασία στο τριπλό σημείο  $T_t = 3.8$  έως 600 °C

Αυτή η περιοχή ισχύος, πρέπει περαιτέρω να περιορισθεί ώστε να αποκλεισθεί μια μικρή περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου, όπου οι καταστατικές εξισώσεις αυτού του τύπου δεν αναπαράγουν με ακρίβεια τις θερμοδυναμικές ιδιότητες. Όπως αναφέρουν οι Kestin J. και Sengers J.V., 1986, η *Διεθνής Ένωση για τις Ιδιότητες του Νερού και του Ατμού (IAPWS)* ορίζει ότι η αποκλειόμενη περιοχή είναι:

---

<sup>9</sup> Βλέπε στις §§ 3.4.2, 3.4.3 και 3.4.5.

$$|T - T^*| \leq 10 \text{ K}, \quad |\rho/\rho^* - 1| \leq 0.3$$

Ανακεφαλαιώνοντας έχουμε:

Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων συσχετίσεων σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος μπορεί να ορισθεί ως

- Πιέσεις: 0.006601 - 1000 bar
- Θερμοκρασίες: 3.8 - 600 °C

Εξαιρείται μικρή περιοχή στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου, ως εξής:

$$|T - T^*| \leq 10 \text{ K}, \quad |\rho/\rho^* - 1| \leq 0.3$$

Η εξίσωση κορεσμού και η συσχέτιση για την επιφανειακή τάση ισχύουν φυσικά μόνο για καταστάσεις κορεσμού από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο (εξαιρείται η αποκλεισμένη περιοχή στη γειτονιά του τελευταίου).

Το κρίσιμο σημείο ορίζεται για τις εξισώσεις αυτές, με τις ψευδοκρίσιμες τιμές της πίεσης, της θερμοκρασίας και της πυκνότητας, ως εξής:

- ψευδοκρίσιμη πίεση  $P^* = 216.6 \text{ bar}$
- ψευδοκρίσιμη θερμοκρασία  $T^* = 643.89 \text{ K}$  και
- ψευδοκρίσιμη πυκνότητα  $\rho^* = 358 \text{ kg/m}^3$

Λόγω επιφυλάξεων που εκφράζονται για την ακρίβεια της συσχετίσεως για την επιφανειακή τάση του βαρέος ύδατος, που προτείνεται από τους Straub J. et al., 1980, στο αντίστοιχο σημείο του κώδικα χρησιμοποιείται η τιμή για τη θερμοκρασία στο κρίσιμο σημείο που δίνουν οι ίδιοι οι δημιουργοί της συσχετίσης. Δηλαδή:

$$T^* = 644.65 \text{ K}$$

Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες εξυπηρετεί σε θερμοδυναμικούς υπολογισμούς για την περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών στην οποία εργάζονται υπό κανονικές συνθήκες οι Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Ισχύος. Σημειώνεται ότι ειδικά σε ότι αφορά τους συντελεστές αμοιβαίων δράσεων του ατμού του βαρέος ύδατος<sup>10</sup> καθώς και τις παραγώγους τους ως προς τη θερμοκρασία<sup>11</sup>, οι υπολογισμοί του κώδικα ισχύουν μόνο για ατμό και για θερμοκρασίες ανάμεσα στο τριπλό σημείο και στους 300 °C.

## 5.4 Το πρόβλημα του υπολογισμού της πυκνότητας.

### 5.4.1 Γενικά.

Για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων μεταφοράς του βαρέος ύδατος από το σύνολο των σχέσεων που παρουσιάστηκαν προηγουμένα στο 3<sup>ο</sup> και στο παρόν Κεφάλαιο<sup>12</sup>, αρκεί να είναι γνωστή η πυκνότητα  $\rho$  και η θερμοκρασία  $T$ , να διατίθενται δηλαδή καταστατικές εξισώσεις κατηγορίας  $T$ - $\rho$  και εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς, οι οποίες δέχονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές την πυκνότητα και τη θερμοκρασία. Το ζητούμενο όμως εδώ είναι να μπορούν να υπολογισθούν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του β.υ. αν είναι γνωστά η πίεση  $P$  και η θερμοκρασία  $T$ , πράγμα που ειδικά εξυπηρετεί σε κώδικες θερμοϋδραυλικής ανάλυσης Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος. Με δεδομένες λοιπόν την πίεση και τη θερμοκρασία πρέπει με κάποιο τρόπο να προσδιορίζεται η αντίστοιχη πυκνότητα έτσι ώστε να μπορεί να διαμορφωθεί το απαραίτητο ζεύγος εισόδου πυκνότητας - θερμοκρασίας, το οποίο επιτρέπει τελικά τον εύκολο υπολογισμό όλων των ιδιοτήτων. Για τη διαδικασία αυτή προσφέρεται μόνο η σχέση (3-40), η οποία μπορεί ισοδύναμα να διατυπωθεί και με τη μορφή (3-3)<sup>13</sup>. Πρόκειται βέβαια για μία συνάρτηση της μορφής  $P = P(T, \rho)$ , η οποία είναι πεπλεγμένη ως προς την πυκνότητα. Αυτό αποκλείει κάθε συμβατική προσπάθεια για την αναλυτική της επίλυση ως προς  $\rho$ . Πρέπει να καταφύγει κανείς λοιπόν σε κάποια από τις γνωστές αριθμητικές μεθόδους επίλυσεως τέτοιων προβλημάτων. Η εφαρμογή μιας αριθμητικής μεθόδου προϋποθέτει επιπλέον την ύπαρξη καλής αρχικής προσέγγισης

---

<sup>10</sup> Βλέπε τις σχέσεις (3-44), (3-45) και (3-46).

<sup>11</sup> Βλέπε τις σχέσεις (3-47), (3-48) και (3-49).

<sup>12</sup> Βλέπε και τις σχετικές αναφορές σε εξισώσεις του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.

<sup>13</sup> Βλέπε §§ 3.3.2 και 3.4.2.

της τιμής της πυκνότητας που ζητείται να υπολογισθεί. Με τα θέματα αυτά θα ασχοληθούμε στις παραγράφους που ακολουθούν.

#### **5.4.2 Ακολουθούμενη αριθμητική μέθοδος.**

Σύμφωνα και με τα όσα ήδη αναπτύχθηκαν στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, όπου παρουσιάστηκαν οι λεπτομέρειες της κατάστρωσης του αντίστοιχου κώδικα LIGHT\_WASP για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, είναι σκόπιμο να ακολουθηθεί και για τον κώδικα HEAVY\_WASP η ίδια αριθμητική μέθοδος Newton - Raphson προκειμένου να επιλυθεί αριθμητικά η καταστατική εξίσωση (3-40) – ισοδύναμα η (3-3) – της μορφής  $P = P(T, \rho)$  ως προς την πυκνότητα  $\rho$ . Οι λόγοι της σκοπιμότητας αυτής συνοψίζονται στην §4.4.3 και ενισχύονται από την επιπλέον αναγκαιότητα της συμβατότητας στον τρόπο ανάπτυξης και στον τρόπο λειτουργίας με τον αντίστοιχο κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάστηκαν στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

#### **5.4.3 Μέθοδος για τον προσδιορισμό της αρχικής προσέγγισης της πυκνότητας.**

Όπως τονίσθηκε και στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο το κυριότερο σημείο που ενδιαφέρει κατά τη χρησιμοποίηση της αριθμητικής μεθόδου Newton - Raphson ως της καταλληλότερης για την αριθμητική επίλυση της καταστατικής εξίσωσης (3-40) ως προς την πυκνότητα, είναι ο τρόπος με τον οποίο θα εξασφαλισθεί η απαίτηση της μεθόδου για μία καλή αρχική προσέγγιση της ζητούμενης λύσης. Ενδιαφέρει λοιπόν να βρεθεί τρόπος να υπολογισθεί μία τιμή της πυκνότητας  $\rho$  του βαρέος ύδατος από τη δεδομένη πίεση  $P$  και θερμοκρασία  $T$ , η οποία να είναι αρκετά κοντά στην πραγματική, για να χρησιμοποιηθεί ως τέτοια προσέγγιση. Τέτοιες δυνατότητες υπάρχουν πολλές, αλλά προκειμένου για την επιλογή εκείνου του τρόπου, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο υπολογιστικό μέρος αυτής της Διδακτορικής Διατριβής χρησιμοποιήθηκαν<sup>14</sup> τα ακόλουθα κριτήρια:

1. Να μην χρησιμοποιηθούν εξισώσεις και συσχετίσεις με μειωμένη αξιοπιστία και περιορισμένη περιοχή ισχύος.

---

<sup>14</sup> Βλέπε και §4.4.4.



2. Να υπάρξει δυνατότητα για την προσέγγιση της πυκνότητας τόσο στην υγρή, όσο και στην ατμώδη και την υπερκρίσιμη φάση του βαρέος ύδατος και σε ένα πεδίο θερμοκρασιών και πιέσεων τουλάχιστον ίσης έκτασης με την κοινή περιοχή ισχύος της καταστατικής εξίσωσης και των εξισώσεων για τις ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος που προτείνουν οι Hill P.G. et al., 1981; 1982 και οι Sengers J.V. και Watson J.T.R. et al., 1986 αντίστοιχα.
3. Η προσέγγιση της πυκνότητας να γίνεται με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια.
4. Η προσέγγιση να γίνεται με τη χρησιμοποίηση σχέσεων που παρουσιάζουν συνέχεια στις τιμές στα όρια μεταξύ των διαφόρων φάσεων και ειδικότερα στο όριο μεταξύ της υγρής και της υπερκρίσιμης και στο όριο μεταξύ της ατμώδους και της υπερκρίσιμης φάσης.

Σύμφωνα με αυτά τα κριτήρια η προσέγγιση για την πυκνότητα του βαρέος ύδατος στην υγρή και την ατμώδη φάση επιλέχθηκε να υπολογισθεί σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση του Schmidt E., 1969 για το ελαφρύ ύδωρ (διατύπωση για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος IFC-1967). Πρόκειται για σύνολο συσχετίσεων που συγκροτούν καταστατική εξίσωση υψηλής θερμοδυναμικής συνέπειας -συνάρτηση Gibbs  $G = G(P,T)$ , δηλαδή καταστατική εξίσωση κατηγορίας P-T, από τις οποίες συσχετίσεις παράγονται εύκολα συναρτήσεις που υπολογίζουν την πυκνότητα (ισοδύναμα τον ειδικό όγκο του ε.υ.). Το σύνολο των συσχετίσεων αυτών τροποποιήθηκε ελαφρά προκειμένου να καταστεί δυνατό να αποδοσει ικανοποιητικής ακρίβειας αρχικές προσεγγίσεις για την πυκνότητα του βαρέος ύδατος.

Στη συνέχεια θα παρουσιασθεί ο τρόπος υπολογισμού της αρχικής προσέγγισης της πυκνότητας του βαρέος ύδατος από την καταστατική εξίσωση της τυποποίησης IFC-1967, καθώς και οι διάφορες δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν για την υπολογιστική υλοποίησή τους.

#### **5.4.3.1 Υπολογισμός της πυκνότητας του βαρέος ύδατος σύμφωνα με την διατύπωση IFC-1967 για το ελαφρύ ύδωρ.**

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάσθηκαν εκείνες οι συσχετίσεις από την διατύπωση IFC-1967 για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος, από τις οποίες είναι δυνατό να υπολογισθεί η πυκνότητά του. Σε αυτό εδώ το σημείο παρουσιάζονται

μόνο οι τροποποιήσεις που χρειάζεται να γίνουν στις συσχετίσεις<sup>15</sup> (4-18) έως και (4-27) της διατύπωσης IFC-1967, ώστε από αυτήν να υπολογίζονται προσεγγίσεις ικανοποιητικής ακρίβειας για την πυκνότητα του βαρέος ύδατος. Συγκεκριμένα οι τροποποιήσεις έχουν ως εξής:

- Η συνολική περιοχή ισχύος της διατύπωσης IFC-1967 καλύπτει την περιοχή πιέσεων  $0 \leq P \leq 1000 \text{ bar}$  και την περιοχή θερμοκρασιών  $0 \leq T \leq 1073.15 \text{ K}$ . Με σκοπό την ταύτιση της περιοχής ισχύος της τροποποιημένης διατύπωσης IFC-1967 με την κοινή περιοχή ισχύος των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος όπου  $T_{\max} = 1073.15 \text{ K}$  τίθεται  $T_{\max} = 873.15$  (η πίεση  $P_{\max}$  παραμένει ως έχει).
- Η συνολική περιοχή ισχύος της διατύπωσης IFC-1967 διαχωρίζεται σε έξι υποπεριοχές, οι οποίες καθορίζονται στον Πίνακα 4-1 και απεικονίζονται στα Διαγράμματα 4-1 και 4-2. Γίνεται δεκτό ότι οι θερμοδυναμικές καταστάσεις του βαρέος ύδατος μπορούν να διαχωρισθούν σε ανάλογες υποπεριοχές παρόμοιες με αυτές του ελαφρού ύδατος. Ένας τέτοιος διαχωρισμός είναι βέβαια αυθαίρετος πλην όμως θεμιτός δεδομένης της ομοιότητας στη θερμοδυναμική συμπεριφορά των δύο αυτών ουσιών. Με βάση και τα όσα αναφέρονται στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο υπενθυμίζονται και εδώ τα ακόλουθα:
  - Η **υποπεριοχή 1** περιγράφει την υγρή φάση και ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης μακρὰ από το κρίσιμο σημείο.
  - Η **υποπεριοχή 2** περιγράφει την ατμώδη φάση και ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης μακρὰ από το κρίσιμο σημείο.
  - Η **υποπεριοχή 3** καλύπτει την ατμώδη φάση και ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης γύρω και πάνω από το κρίσιμο σημείο.
  - Η **υποπεριοχή 4** καλύπτει την υγρή φάση και ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης για πιέσεις γύρω και πάνω από το κρίσιμο σημείο και για θερμοκρασίες στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου.
  - Η **υποπεριοχή 5** αντιπροσωπεύει καταστάσεις κορεσμού στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου.

---

<sup>15</sup> Βλέπε και §4.4.4.1, καθώς και τον Πίνακα (4-1).

- Η **υποπεριοχή 6** αντιπροσωπεύει καταστάσεις κορεσμού μακρυνά από το κρίσιμο σημείο.

• Αντικαθιστάται ο κρίσιμος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος με εκείνον του βαρέος ύδατος. Δηλαδή:

$$\text{όπου } v_{L,W}^* = 0.00317 \text{ m}^3\text{kg}^{-1} \text{ τίθεται } v_{H,W}^* = 0.00279 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$$

• Αντικαθιστώνται τα κρίσιμα μεγέθη πίεσως και θερμοκρασίας του ελαφρού ύδατος με τα αντίστοιχα μεγέθη του βαρέος ύδατος. Δηλαδή:

$$\text{όπου } P_{L,W}^* = 221.2 \text{ bar τίθεται } P_{H,W}^* = 216.6 \text{ bar και}$$

$$\text{όπου } T_{L,W}^* = 647.3 \text{ K τίθεται } T_{H,W}^* = 643.89 \text{ K}$$

• Η τιμή της σταθερής  $P_{r2} = (P_{\text{max}}/P^*)_{L,W}$  τροποποιείται σε  $P_{r2} = (P_{\text{max}}/P^*)_{H,W}$ . Δηλαδή:

$$P_{r2} = 4.616805171.$$

• Η τιμή της σταθερής  $T_{r3} = (T_{\text{max}}/T^*)_{L,W}$  τροποποιείται σε  $T_{r3} = (T_{\text{max}}/T^*)_{H,W}$ . Δηλαδή:

$$T_{r3} = 1.356054606$$

• Αντικαθιστώνται οι τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας του ελαφρού ύδατος στο τριπλό σημείο με εκείνες του βαρέος ύδατος. Δηλαδή:

$$\text{όπου } P_{L,W} = 0.006112 \text{ bar τίθεται } P_{H,W} = 0.06601 \text{ bar}$$

$$\text{όπου } T_{L,W} = 273.16 \text{ K τίθεται } T_{H,W} = 276.95 \text{ K}$$

[Αυτό ισodύναμα σημαίνει ότι  $T_{Tr} = (T_{Tr}/T^*)_{H,W} = 4.30120051 \times 10^{-1}$  –βλέπε στον

Πίνακα (4-1)]

• Αντικαθιστάται η εξίσωση κορεσμού (4-28) της διατύπωσης IFC-1967 με την εξίσωση κορεσμού του βαρέος ύδατος ως εξής:

$$P_{rs}(T_r) = P_s(T_r)/P_{H,W}^*$$

όπου το μέγεθος  $Ps(T)$  υπολογίζεται από τη σχέση (3-43).

- Οι πιές των σταθερών  $T_{r1}$  και  $T_{r2}$  παραμένουν ως είχαν:

$$T_{r1} = 9.626911787 \times 10^{-1}$$

$$T_{r2} = 1.333462073$$

#### **5.4.3.2 Δυσκολίες στον υπολογισμό της πυκνότητας του βαρέος ύδατος σύμφωνα με την διατύπωση IFC-1967 για το ελαφρύ ύδωρ.**

Έχοντας υπόψη τις συσχετίσεις για τον υπολογισμό της πυκνότητας του βαρέος ύδατος σύμφωνα με τη διατύπωση IFC-1967 για το ελαφρύ ύδωρ, όπως αυτές αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, διαπιστώνεται ότι η ζητούμενη αρχική προσέγγιση για τον υπολογισμό της πυκνότητας μπορεί να προσδιορισθεί άμεσα μόνο για τις υποπεριοχές 1, 2 και 6. Για τις υποπεριοχές 3, 4 και 5 ο προσδιορισμός της αρχικής προσέγγισης της πυκνότητας του βαρέος ύδατος είναι δύσκολος καθώς οι διαθεσίμες συσχετίσεις για τον υπολογισμό της είναι σχέσεις πεπλεγμένες ακριβώς ως προς τη ζητούμενη αρχική προσέγγιση [εξισώσεις (4-25) και (4-26)]. Οι υποπεριοχές 3, 4 και 5 καλύπτουν περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών πλησίον του κρισίμου σημείου, η οποία δεν έχει σχέση με την περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών που εργάζονται οι ΠΑΙ που χρησιμοποιούν βαρύ ύδωρ· παράλαυτά η λύση των πεπλεγμένων αυτών σχέσεων είναι απαραίτητη για την ορθή λειτουργία του κώδικα HEAVY\_WASP. Με βάση αυτές τις σχέσεις είναι δυνατό να υπολογίζεται από την κ.ε. (3-40) – ή ισοδύναμα από την κ.ε. (3-3) - η πυκνότητα του βαρέος ύδατος στη γειτονιά του κρισίμου σημείου, ώστε να γίνεται έλεγχος αν αυτή η πυκνότητα εμπίπτει στην αποκλειόμενη περιοχή ισχύος της εν λόγω καταστατικής εξίσωσης<sup>16</sup> και ως εκ τούτου ο χρήστης να έχει τη δυνατότητα πλήρους εκμεταλλεύσεως των δυνατοτήτων υπολογισμού που του παρέχουν οι υλοποιούμενες εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες για όλη την κοινή περιοχή ισχύος τους.

Η αριθμητική μέθοδος που προτιμήθηκε για την επίλυση των εξισώσεων (4-25) και (4-26) είναι και εδώ η μέθοδος Newton - Raphson.

---

<sup>16</sup> Βλέπε και § 5.3.

Οι τιμές εκκινήσεως με τις οποίες τροφοδοτήθηκε η μέθοδος με σκοπό να καταλήξει στον προσδιορισμό της αρχικής προσέγγισης για την πυκνότητα του βαρέος ύδατος στις υποπεριοχές 3, 4 και 5 ελήφθησαν ως εξής:

– Ελεκτάθηκε η ισχύς της συσχέτισης για τις υποπεριοχές 1 και 6 [εξίσωση (4-18)] στις πιέσεις και τις θερμοκρασίες που καλύπτει η συσχέτιση για τις υποπεριοχές 4 και 5 [εξίσωση (4-26)]. Υπολογίσθηκε έτσι μία τιμή ανηγμένου ειδικού όγκου, που είναι καλή τιμή εκκίνησης για τη λύση της εξίσωσης (4-26) ως προς τη ζητούμενη αρχική προσέγγιση της πυκνότητας.

και

– Ελεκτάθηκε η ισχύς της συσχέτισης για τις υποπεριοχές 2 και 6 [εξίσωση (4-21)] στις πιέσεις και τις θερμοκρασίες που καλύπτει η συσχέτιση για τις υποπεριοχές 3 και 5 [εξίσωση (4-25)]. Υπολογίσθηκε έτσι μία τιμή ανηγμένου ειδικού όγκου, που είναι καλή τιμή εκκίνησης για τη λύση της εξίσωσης (4-25) ως προς την αρχική προσέγγιση της πυκνότητας με τη μέθοδο Newton - Raphson. Υπάρχουν πάντως περιοχές πιέσεων και θερμοκρασιών για τις οποίες η εξίσωση (4-21) δίνει αρνητικές ή άλλες εντελώς αδύνατες τιμές για τον ειδικό όγκο. Σε τέτοια περίπτωση αντί για την (4-21) χρησιμοποιείται στον κώδικα η καταστατική εξίσωση τελείου αερίου από την οποία προκύπτει μία τιμή ανηγμένου ειδικού όγκου, που, όπως διαπιστώθηκε, αποτελεί ικανοποιητική τιμή εκκίνησης για τη λύση της εξίσωσης (4-25) ως προς τη ζητούμενη αρχική προσέγγιση της πυκνότητας.

Οι παράγωγοι των πεπλεγμένων ως προς την πυκνότητα συσχετίσεων (4-25) και (4-26), οι οποίες είναι αναγκαίες για την εφαρμογή της μεθόδου Newton - Raphson, είναι δυνατόν να υπολογισθούν από τις αναλυτικές σχέσεις (4-29) και (4-30).

## 5.5 Υπολογισμός της θερμοκρασίας κορεσμού.

Στην περίπτωση που ζητείται να υπολογισθούν οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος στην κατάσταση κορεσμού και το μόνο σχετικό δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού  $P_s$ , τότε πρέπει να επιλυθεί η εξίσωση κορεσμού<sup>17</sup>  $P_s = P_s(T_s)$ , ως προς τη

---

<sup>17</sup> Εξίσωση (3-43) § 3.4.3.

θερμοκρασία κορεσμού  $T_s$ , προκειμένου να υπολογισθεί ακριβώς το ζεύγος πίεσης και θερμοκρασίας για το οποίο πρέπει να γίνουν οι υπολογισμοί των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος από τον κώδικα.

Για την λύση της εξίσωσης αυτής ως προς τη θερμοκρασία χρησιμοποιείται και πάλι η αριθμητική μέθοδος Newton - Raphson. Η απαραίτητη για τη μέθοδο παράγωγος ως προς τη θερμοκρασία της χρησιμοποιούμενης εξίσωσης κορεσμού δίνεται από τη σχέση:

$$dP_s(T)/dT = P^* \exp \left[ \left( T^*/T \right) P_s(T) \right] \times \left[ \left( -T^*/T^2 \right) P_s(T) + \right. \\ \left. + \left( -1/T \right) \left( n_1 + 1.9n_2\tau^{0.9} + 2n_4\tau + 5.5n_{11}\tau^{4.5} + 10n_{20}\tau^9 \right) \right] \quad (5-1)$$

όπου οι σταθερές  $n_i$ , η ποσότητα  $\tau$  και η συνάρτηση  $P_s = P_s(T)$  δίνονται στην § 3.4.3.

Όσο για την επίσης απαραίτητη αρχική τιμή της θερμοκρασίας κορεσμού που χρειάζεται η Newton - Raphson όταν εκκινεί, αυτή δίνεται ως συνάρτηση της πίεσης κορεσμού από κατάλληλη συσχέτιση η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης  $\Delta\Delta$  και έχει ως εξής:

$$T_s = a + b P_s^c \quad (5-2)$$

με

$$a = 226.1602382$$

$$b = 146.0981428$$

$$c = 0.1940222581$$

Τα χαρακτηριστικά αυτής της συσχέτισης, μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως:

Αριθμητική μέθοδος ανάλυσης αναδρομής που χρησιμοποιήθηκε:

**Αλγόριθμος Levenberg - Marquadt**

Συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης: **0.999**

Συντελεστής RMS: **0.4%**

Κατά την ανάπτυξη αυτής της συσχέτισης λήφθηκαν υπόψη και αναγκαίοι περιορισμοί που αφορούν στη με μικρό σφάλμα αναπαραγωγή των συνθηκών κορεσμού στο τριπλό και το κρίσιμο σημείο του ελαφρού ύδατος. Με βάση αυτούς τους περιορισμούς, οι οποίοι αφορούν μόνο στην εκτίμηση της αρχικής τιμής, προέκυψε ότι:

- Η υπολογιζόμενη αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας κορεσμού στο κρίσιμο σημείο αποκλίνει από την ψευδοκρίσιμη τιμή κατά **0.4%**.
- Η υπολογιζόμενη αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας κορεσμού στο τριπλό σημείο αποκλίνει από την πραγματική τιμή κατά **0.1%**. Επισημαίνεται ότι η πραγματική θερμοκρασία στο τριπλό σημείο είναι  $T_1 = 276.95 \text{ K}$  -για πίεση  $P_1 = 0.066 \text{ bar}$ .
- Η μέγιστη απόκλιση της υπολογιζόμενης αρχικής εκτίμησης της θερμοκρασίας κορεσμού από την πραγματική τιμή φθάνει το **6%**.
- Η ελάχιστη απόκλιση της υπολογιζόμενης αρχικής εκτίμησης της θερμοκρασίας κορεσμού από την πραγματική τιμή φθάνει το **0.02%**.

Για τη δημιουργία της συσχέτισης αυτής με βάση τον αλγόριθμο Levenberg - Marquadt, χρησιμοποιήθηκαν περί τις 120 τιμές ζευγών πιέσεως κορεσμού - θερμοκρασίας κορεσμού ( $P_s$ ,  $T_s$ ), τα οποία αναπαράχθηκαν με τυχαιο τρόπο χρησιμοποιώντας την εξίσωση κορεσμού (3-43). Η τυχαιότητα της αναπαραγωγής εξασφαλίστηκε με κατάλληλη χρήση γεννήτριας τυχαιών αριθμών. Λήφθηκε μέριμνα ώστε τα ζεύγη ( $P_s$ ,  $T_s$ ) των οποίων η παραγωγή έγινε με αυτόν τον τρόπο, να καλύπτουν όσο το δυνατό με την ίδια πυκνότητα όλο το εύρος των πιέσεων και θερμοκρασιών κορεσμού του βαρέος ύδατος από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο.

Η συσχέτιση της μορφής  $T_s = T_s(P_s)$  είναι κατάλληλη ώστε να τροφοδοτήσει την χρησιμοποιούμενη αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson με την απαιτούμενη αρχική τιμή της θερμοκρασίας κορεσμού με σκοπό να επιτευχθεί ο εύκολος και γρήγορος υπολογισμός-της από την εξίσωση κορεσμού (3-43). Επισημαίνεται ότι η συσχέτιση

(5-2) έχει τη μορφή της αντίστοιχης συσχέτισης (4-32), η οποία παρουσιάσθηκε στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο για το ελαφρύ ύδωρ.

## 5.6 Ο αριθμητικός κώδικας HEAVY\_WASP.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται η αναλυτική παρουσίαση του αριθμητικού κώδικα με το όνομα HEAVY\_WASP (HEAVY Water And Steam Properties), ο οποίος κατασκευάσθηκε στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ, με σκοπό να εξυπηρετήσει υπολογισμούς για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του βαρέος ύδατος σε επίπεδο ακρίβειας κατάλληλο για βιομηχανική χρήση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για υπολογισμούς σε προβλήματα θερμοϋδραυλικής ανάλυσης Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος. Ο κώδικας HEAVY\_WASP συντάχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στον κώδικα αυτόν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες υπολογίζονται με βάση την καταστατική εξίσωση που ανέπτυξαν οι Hill P.G. et al., 1981; 1982; 1983. Οι κυριότερες από τις ιδιότητες μεταφοράς υπολογίζονται από τις συσχετίσεις που παρουσιάζουν οι Nagashima N. και Matsunaga A., 1983a. Το σύνολο των αναγκαίων συσχετίσεων και των άλλων εξισώσεων που υλοποιούνται προγραμματιστικά παρουσιάσθηκαν ήδη με λεπτομέρεια τόσο στο 3<sup>ο</sup> όσο και στο παρόν Κεφάλαιο. Η περιοχή ισχύος του κώδικα HEAVY\_WASP εκτείνεται για θερμοκρασίες από το τριπλό σημείο μέχρι 600 °C και για πιέσεις από 0 έως 1000 bar (εξαιρείται πολύ μικρή περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών γύρω από το κρίσιμο σημείο -βλέπε και την κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων στην προηγούμενη παράγραφο 5.3).

Ο κώδικας δέχεται ως είσοδο την πίεση και την θερμοκρασία. Η έξοδος παρέχει τις τιμή του ειδικού όγκου, της ενθαλπίας, της εντροπίας, των ειδικών θερμοχωρητικότητων υπό σταθερή πίεση και υπό σταθερό όγκο, της ταχύτητας του ήχου, της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας, του συντελεστή Joule - Thomson, της συνεκτικότητας, της θερμικής αγωγιμότητας και της επιφανειακής τάσης.

Όπως και στον κώδικα LIGHT\_WASP, αν ο χρήστης του κώδικα επιθυμεί τις ιδιότητες του βαρέος ύδατος σε κατάσταση κορεσμού για μια πίεση P, πρέπει να θέσει στην είσοδο όπου θερμοκρασία T την τιμή 0 (μηδέν). Αντίστροφα αν ο χρήστης



επιθμεί το ίδιο για μια θερμοκρασία Γ, πρέπει να θέσει στην εισόδο όπου πίεση Ρ την τιμή 0 (μηδέν).

Ακολουθεί μια διεξοδική παρουσίαση των γενικών χαρακτηριστικών του κώδικα και των αναγκαίων οδηγιών χρήσεως. Οι οδηγίες χρήσεως συμπληρώνονται από ορισμένες υποδείξεις σχετικά με τους τρόπους με τους οποίους ο χρήστης μπορεί να αντιμετωπίσει τα συννηθέστερα λάθη του. Όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα εξετάζονται στη συνέχεια κατά ομάδες ανάλογα και με τις λειτουργίες που αυτά διεκπεραιώνουν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του κώδικα, στην ουσία δηλαδή η ροή της εκτέλεσης ανάλογα και με τα ζητούμενα που καθορίζει ο χρήστης. Επιπλέον, συμπληρωματικά, εξετάζονται και ορισμένα άλλα μορφολογικά χαρακτηριστικά των υποπρογραμμάτων προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία τους. Τέλος, επεξηγείται η δομική ευελιξία (code modular design) του κώδικα. Η συνολική παρουσίαση συνοδεύεται από συγκεκριμένους πίνακες που χρησιμεύουν ως περιληπτική αναφορά στα κυριότερα σημεία του κώδικα. Τέτοιοι πίνακες συμβάλλουν όχι μόνο στην καλύτερη κατανόηση του κώδικα, αλλά και στην γρήγορη αναδρομή σε αυτούς όταν ζητείται κάποια λεπτομέρεια που ενδιαφέρει. Σημειώνεται ότι όλα τα επιμέρους υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα HEAVY\_WASP βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα ΙΙ.

### **5.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά του κώδικα.**

Ο κώδικας HEAVY\_WASP για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος είναι στην ουσία μια ομάδα υποπρογραμμάτων σχεδιασμένη για να χρησιμοποιείται ως υποπρόγραμμα στο πρόγραμμα του χρήστη. Τα υποπρογράμματα αυτά διακρίνονται σε:

- α) Υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου.
- β) Υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού.
- γ) Υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου.
- δ) Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.
- ε) Υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς.
- στ) Υποπρογράμματα γενικών μαθηματικών υπολογισμών.
- ζ) Λοιπά υποπρογράμματα επικοινωνικής φύσεως.

Τα υποπρογράμματα αυτά υλοποιήθηκαν προγραμματιστικά με τη μορφή **υπορουτινών** (FORTRAN subroutines) και **συναρτήσεων** (FORTRAN functions). Υπάρχει ακόμα ένα **υποπρόγραμμα δεδομένων** (FORTRAN blockdata). Σημειώνεται ότι όλα τα υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα HEAVY\_WASP βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα II.

Συνοπτικά η λειτουργία του κώδικα μπορεί να περιγραφεί με τα ακόλουθα κύρια βήματα:

- Διαβάζεται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου σε bar και °C αντίστοιχα, καθώς και ένας ειδικός κλειδάριθμος (για ακέραια μεταβλητή), η τιμή του οποίου καθορίζει για ποιές από τις διαθέσιμες θερμοφυσικές ιδιότητες θα γίνουν υπολογισμοί.
- Γίνεται έλεγχος αν η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου είναι συμβατές με την περιογή ισχύος των υλοποιούμενων εξισώσεων για τις ιδιότητες.
- Υπολογίζεται η θερμοκρασία κορεσμού για την πίεση εισόδου, εκτός, φυσικά αν η τελευταία είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη πίεση, προκειμένου να διαπιστωθεί αν οι συνθήκες εισόδου είναι κοντά στην κατάσταση κορεσμού.
- Υπολογίζεται ο ειδικός όγκος για την πίεση και τη θερμοκρασία εισόδου.
- Υπολογίζονται οι βασικές παράμετροι της χρησιμοποιούμενης καταστατικής εξίσωσης, δεδομένων της θερμοκρασίας εισόδου και του υπολογισθέντος ειδικού όγκου.
- Υπολογίζονται οι ζητούμενες με τον ειδικό κλειδάριθμο οι ζητούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες.
- Παρέχονται στον χρήστη τα αποτελέσματα.

Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει τα σύμβολα, την ονοματολογία και τις μονάδες των βασικών μεταβλητών του κώδικα HEAVY\_WASP σε αλφαβητική σειρά. Ως βασικές μεταβλητές εννοούνται εδώ κυρίως τα καταστατικά μεγέθη και οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος καθώς και ορισμένες άλλες παράμετροι με τις οποίες ο χρήστης έρχεται σε άμεση επαφή. Τα σύμβολα των μεταβλητών συνοδεύονται από τις διαστάσεις τους σε μονάδες στις οποίες γίνεται η είσοδος ή η έξοδος. Σημειώνεται πάντως ότι ο κώδικας HEAVY\_WASP χρησιμοποιεί εσωτερικά σε αρκετά σημεία του και διαφορετικές μονάδες για το ίδιο μέγεθος ή ιδιότητα, με σκοπό να εξυπηρετήσει ανάγκες τοπικών, εσωτερικών υπολογισμών.

## 5.6.2 Οδηγίες χρήσεως του κώδικα.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι απαραίτητες οδηγίες για τη σωστή κλήση και εκμετάλλευση του κώδικα HEAVY\_WASP από προγράμματα εφαρμογής του χρήστη<sup>18</sup>.

Η τυπική επικοινωνία του προγράμματος του χρήστη και του κώδικα αποκαθίσταται με την ακόλουθη ομάδα εντολών, οι οποίες περιέχουν τις μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους εισόδου / εξόδου<sup>19</sup>.

↓ *αυτή είναι η εβδομη στήλη*

7

**IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)**

**DOUBLE PRECISION IBMF, IBMG, JTCF, JTCC, KF, KG, LACFG, MUF, MUG**

**COMMON/PROPERTY1/B2F, B3F, B4F, DB2F, DB3F, DB4F, UF, PSIF, HF, SF, CPF, CVF, \*IBMF, JTCF, GAMMAF, AF, MUF, KF, PRANDTLF**

**COMMON/PROPERTY2/B2G, B3G, B4G, DB2G, DB3G, DB4G, UG, PSIG, HG, SG, CPG, CVG, \*IBMG, JTCC, GAMMAG, AG, MUG, KG, PRANDTLG**

**COMMON/PROPERTY3/HFG, SIGMAFG, LACFG**

**CALL HEAVY\_WASP (JS, JP, P, T, TS, SVF, SVG, JR, IS)**

Είναι:

JS, JP διακόπτες, ο ρόλος των οποίων είναι αντίστοιχος με τον ρόλο των ομώνυμων διακοπών του κώδικα LIGHT\_WASP, όπως περιγράφεται στην § 4.6.2

P πίεση σε bar (μεταβλητή εισόδου)

T θερμοκρασία σε K (μεταβλητή εισόδου)

---

<sup>18</sup> Βλέπε και το παράδειγμα κυρίου προγράμματος εφαρμογής example.f στο Παράρτημα II.

<sup>19</sup> Βλέπε και το παράδειγμα κυρίου προγράμματος εφαρμογής example.f στο Παράρτημα II

TS θερμοκρασία κορεσμού στην πίεση P (σε K -μεταβλητή εξόδου)

SVF ειδικός όγκος υγρής ή υπερκρίσιμης φάσης (σε m<sup>3</sup>/kg -μεταβλητή εξόδου)

SVG ειδικός όγκος ατμώδους ή υπερκρίσιμης φάσης (σε m<sup>3</sup>/kg -μεταβλητή εξόδου)

JR, IS δείκτες (μεταβλητές εξόδου -παίρνουν τιμές με τρόπο που περιγράφεται στη συνέχεια)

Τα Common Blocks PROPERTY1, PROPERTY2 και PROPERTY3 περιέχουν τις υπόλοιπες μεταβλητές εξόδου. Οι μεταβλητές αυτές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5-1.

Για την επιτυχή κλήση του κώδικα πρέπει να τηρούνται δύο προϋποθέσεις:

1. Η εντολής COMMON /PROPERTY ... πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στο κυρίως πρόγραμμα του χρήστη ή στην υπορουτίνα του, η οποία καλεί τον κώδικα. Όλες οι μεταβλητές που περιέχονται στις εντολές COMMON πρέπει να δηλώνονται διπλής ακρίβειας (DOUBLE PRECISION). Οποσδήποτε επιτρέπεται στο χρήστη να αλλάξει τα ονόματα των μεταβλητών που εμφανίζονται στις εντολές COMMON/PROPERTY... καθώς και στην εντολή CALL HEAVY\_WASP(... κατά τον τρόπο που αυτός νομίζει ότι τον εξυπηρετεί. Προσοχή χρειάζεται ώστε να αποφευχθεί η χρησιμοποίηση των μεταβλητών που εμφανίζονται στις εντολές COMMON/PROPERTY... και CALL HEAVY\_WASP(... ως δείκτες για στοιχεία πινάκων.
2. Οι διακόπτες JS και JP, τις τιμές των οποίων παρέχει ο χρήστης, πληροφορούν τον κώδικα σχετικά με το ποιές μεταβλητές θα χρησιμοποιήσουν ως είσοδος και με το ποιές ιδιότητες ζητείται να αποτελέσουν την έξοδο. Πρέπει να πάρουν τις κατάλληλες αρχικές τιμές. Ο διακόπτης JS καθορίζει ποιές από τις μεταβλητές θερμοκρασία, πίεση, ειδικός όγκος, ενθαλπία ή εντροπία, ή ποιόν συνδυασμό τους ανά δύο θέλει ο χρήστης σαν είσοδο. Στην παρουσιαζόμενη έκδοση του κώδικα, η μόνη τιμή που επιτρέπεται να πάρει ο διακόπτης JS είναι η μονάδα ("1"), που αντιστοιχεί στα ζεύγη εισόδου (P,T), (P,0) και (0,T). Ο διακόπτης JP καθορίζει ποιές ιδιότητες ζητάει ο χρήστης να υπολογισθούν από τον κώδικα. Ο διακόπτης αυτός μπορεί να πάρει τις ακόριες τιμές από 0 έως και 63. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν κάποιο άθροισμα των αριθμών 0, 2, 4, 8, 16 και 32 -δηλαδή

ισοδύναμα των αριθμών 0, 2<sup>0</sup>, 2<sup>1</sup>, 2<sup>2</sup>, 2<sup>3</sup>, 2<sup>4</sup> και 2<sup>5</sup>. Κάθε τέτοιο δυαδικό άθροισμα εξυπηρετεί τον με μοναδικό τρόπο τον προσδιορισμό του συνδυασμού των ιδιοτήτων που ζητούνται. Ο Πίνακας 5-2 συνοψίζει ποιες ιδιότητες υπολογίζονται αν ο διακόπτης JP πάρει τις τιμές 0, 2<sup>0</sup>, 2<sup>1</sup>, 2<sup>2</sup>, 2<sup>3</sup>, 2<sup>4</sup> και 2<sup>5</sup>.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η λειτουργία του διακόπτη JP, βοηθούν τα παραδείγματα που παρουσιάζονται σχετικά στην § 4.6.2 του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.

Ο διακόπτης JP βοηθάει στην αύξηση της ταχύτητας με την οποία ο κώδικας HEAVY\_WASP υπολογίζει τις ζητούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος αφού από την αρχή της εκτελέσεως πληροφορεί ποιά από τα τμήματα του κώδικα θα παραμείνουν ανενεργά. Για μικρές τιμές του JP αυτό σημαίνει την αδρανολογία μέχρι περίπου και του ενός τρίτου των εντολών του.

Εκτός από τους διακόπτες JS και JP και τις άλλες μεταβλητές εισόδου ο κώδικας περιέχει στη λίστα των παραμέτρων του και τους δείκτες JR και IS, οι οποίοι παίρνουν τιμές μόνο μετά από μια επιτυχημένη κλήση και εκτέλεση του κώδικα.

Ο δείκτης JR αποδίδει την περιοχή του διαγράμματος PT στην οποία βρίσκεται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου σύμφωνα και με το Διάγραμμα 4-2. Οπως αναλύθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, οι επιτρεπόμενες τιμές για το δείκτη JR είναι 1, 2, 3, 4, 5 και 6. Στην αντίθετη περίπτωση που ο κώδικας επιστρέψει για τον δείκτη JR την τιμή 0 (μηδέν), σημαίνει ότι έχει αποτύχει για κάποιο λόγο να καθορίσει την περιοχή του διαγράμματος PT στην οποία βρίσκεται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου που καθόρισε ο χρήστης. Τυπώνεται τότε σχετικό μήνυμα και η εκτέλεση σταματάει.

Ο δείκτης IS πληροφορεί το χρήστη σε τι σχέση βρίσκονται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου που καθόρισε, ως προς την κατάσταση κορεσμού για την πίεση εισόδου. Παίρνει τις τιμές 0,1 και 2. Ο Πίνακας 5-3 εξηγεί αναλυτικά τι σημαίνει κάθε τιμή του δείκτη IS.

Όλες οι πιο πάνω πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του κώδικα HEAVY\_WASP παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5-4.

### 5.6.3 Αντιμετώπιση λαθών (*troubleshooting*).

Ο τρόπος με τον οποίο είναι κατασκευασμένος ο κώδικας HEAVY\_WASP αντιμετωπίζει τα συνήθη λάθη που τυχόν συμβαίνουν κατά την κλήση του. Αυτά τα λάθη ανιχνεύονται και μπορούν να διορθωθούν σχετικά εύκολα, όπως αντίστοιχα ανιχνεύονται και διορθώνονται παρόμοια λάθη στην κλήση του κώδικα LIGHT\_WASP<sup>20</sup>. Αναλυτικότερα:

1. Αν δεν καθορισθεί σωστά ο διακόπτης JS (πρέπει JS=1) τυπώνεται σχετικό μήνυμα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου του χρήστη, στον υπολογιστή που αυτός εργάζεται και η εκτέλεση σταματάει.
2. Αν δεν καθορισθεί σωστά ο διακόπτης JP (πρέπει ο JP να είναι μεταξύ του 0 και του 63) τυπώνεται σχετικό μήνυμα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου του χρήστη, όπως προηγούμενα και η εκτέλεση σταματάει.
3. Αν οι τιμές των P,T βρίσκονται έξω από την περιοχή ισχύος τυπώνεται ομοίως μήνυμα και η εκτέλεση σταματάει.
4. Αν ζητείται μια κατάσταση κορεσμού αλλά από λάθος η πίεση ή η θερμοκρασία εισόδου είναι υπερκρίσιμες τυπώνεται ομοίως μήνυμα και η εκτέλεση σταματάει.
5. Αν η σύνταξη της απαραίτητης για την κλήση του κώδικα ομάδας εντολών, δηλαδή των IMPLICIT..., DOUBLE PRECISION..., COMMON /PROPERTY... και CALL HEAVY\_WASP(..., είναι εσφαλμένη τότε καταλαβαίνει κανείς, ότι υπάρχει μια ποικιλία λαθών που μπορεί να συμβεί, τα περισσότερα των οποίων είναι βέβαια μοιραία (fatal) και η εκτέλεση σταματάει. Συνήθως τότε τυπώνεται και κατάλληλο μήνυμα λάθους που προέρχεται όμως από τον ίδιο τον υπολογιστή και όχι από τον κώδικα.

Λοιπά μηνύματα που μπορεί να εμφανισθούν κατά την εκτέλεση του κώδικα είναι αυτοεξηγηούμενα.

---

<sup>20</sup> Βλέπε και § 4.6.3

## 5.7 Τα υποπρογράμματα του κώδικα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα υποπρογράμματα του κώδικα HEAVY\_WASP μπορούν να διακριθούν σε υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου, υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού, υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου δεδομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου, υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς, υποπρογράμματα μαθηματικών υπολογισμών και τέλος άλλα επικουρικά υποπρογράμματα<sup>21</sup>. Στη συνέχεια θα περιγραφούν με συνοπτικό τρόπο όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα κατατασσόμενα κατά την πιό πάνω κατηγοριοποίηση.

### 5.7.1 Υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου.

Τα υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες HEAVY\_WASP, CHECKPT και οι συνεργαζόμενες συναρτήσεις FPS και PRL.

#### 5.7.1.1 Υπορουτίνα HEAVY\_WASP(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JP,JS).

Είναι το υποπρόγραμμα που πρέπει να κληθεί από το πρόγραμμα του χρήστη αν αυτός θέλει να χρησιμοποιήσει τον κώδικα. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτή η κλήση ήδη παρουσιάστηκε στην § 5.6.2. Η υπορουτίνα αποτελείται από μία ομάδα εντολών που φροντίζει κυρίως για την ομαλή είσοδο στον κώδικα και την ομαλή έξοδο από αυτόν. Εκεί ελέγχεται η ορθότητα των τιμών των διακοπών JS και JP, δίνεται η εντολή για τον έλεγχο της ορθότητας της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου, αρχικοποιούνται οι τιμές όλων των ιδιοτήτων στο μηδέν και συντονίζονται οι κυριότερες λειτουργίες του κώδικα. Κατά τη διαδικασία εξόδου και μέσω της λίστας παραμέτρων η υπορουτίνα HEAVY\_WASP πληροφορεί το πρόγραμμα του χρήστη για τις τιμές που παίρνει ο ειδικός όγκος του υγρού (SVF σε m<sup>3</sup>/kg) ή/και ο ειδικός όγκος του ατμού (SVG σε m<sup>3</sup>/kg) του βαρέος ύδατος για το ζεύγος πίεσεως - θερμοκρασίας, στο οποίο ζητήθηκε να γίνουν υπολογισμοί.

---

<sup>21</sup> Όλα τα υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα HEAVY\_WASP βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα ΙΙ.

### **5.7.1.2 Υπορουτίνα CHECKPT(TS,JR,IS).**

Όπως φαίνεται και από το όνομά της πρόκειται για την υπορουτίνα στην οποία το υποπρόγραμμα HEAVY\_WASP αναθέτει τον έλεγχο της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου. Η υπορουτίνα μετατρέπει τις μονάδες της πίεσης και της θερμοκρασίας από bar και °C σε MPa και K αντίστοιχα, προκειμένου να διευκολύνεται ο χρήστης αλλά και να γίνονται σωστά οι υπολογισμοί στον κώδικα. Υπολογίζεται η πίεση κορεσμού αν το μόνο δεδομένο είναι η θερμοκρασία κορεσμού TS με χρήση της συνάρτησης FPS. Υπολογίζεται αντίστροφα η θερμοκρασία κορεσμού TS αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού, με χρήση των συναρτήσεων FPS, DFPS, FTS και της μαθηματικής υπορουτίνας SOLVE. Αποφασίζεται επίσης εκεί η τιμή της μεταβλητής εξόδου JR σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στον Πίνακα 4-1 και με τη βοήθεια της συνάρτησης PRL, καθώς και η τιμή της μεταβλητής εξόδου IS σύμφωνα με όσα αναφέρονται στον Πίνακα 5-3.

### **5.7.1.3 Συνάρτηση FPS(TS).**

Είναι η υλοποίηση της εξίσωσης κορεσμού του βαρέος ύδατος [σχέση (3-43)] η οποία χρησιμοποιείται από την υπορουτίνα CHECKPT για τον υπολογισμό της πίεσης κορεσμού FPS σε MPa δεδομένης της θερμοκρασίας κορεσμού TS σε K.

### **5.7.1.4 Συνάρτηση PRL(TR).**

Είναι η υλοποίηση της εξίσωσης (4-19) που αναπαριστά το όριο μεταξύ των υποπεριοχών όπου JR = 2 και JR = 3 για καταστάσεις της υπερκρίσιμης φάσης. PRL είναι η ανηγμένη πίεση, TR είναι η ανηγμένη θερμοκρασία. Χρησιμοποιείται από την υπορουτίνα CHECKPT, προκειμένου να αποφασισθεί η τιμή του δείκτη JR.

### **5.7.2 Υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού.**

Η θερμοκρασία κορεσμού TS υπολογίζεται, αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού, με χρήση των συναρτήσεων FPS, DFPS, FTS και της μαθηματικής υπορουτίνας SOLVE.

### **5.7.2.1 Συνάρτηση FTS(PP).**

Είναι η υλοποίηση της συστέλισης (5-2) η οποία αναπτύχθηκε στην παρούσα  $\Delta\Delta$  με σκοπό τον υπολογισμό αρχικών εκτιμήσεων για τη θερμοκρασία κορεσμού σε K ως



συνάρτηση της πίεσης κορεσμού σε bar. Οι εκτιμήσεις αυτές είναι απαραίτητες για την επίλυση της εξίσωσης κορεσμού (3-43) -όπως αυτή υλοποιείται στη συνάρτηση FPS, ως προς τη θερμοκρασία με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson -όπως αυτή υλοποιείται στο μαθηματική υπορουτίνα SOLVE. FTS είναι η θερμοκρασία κορεσμού σε K. PP είναι η πίεση σε MPa.

### **5.7.2.2 Συνάρτηση DFPS(TS).**

Είναι η υλοποίηση της παραγώγου (5-1) της εξίσωσης κορεσμού (3-43) ως προς τη θερμοκρασία, απαραίτητη για την επίλυση της εξίσωσης (3-23) ως προς τη θερμοκρασία κορεσμού TS, όταν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού δεδομένου ότι χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Newton - Raphson. Η μέθοδος Newton - Raphson υλοποιείται στην μαθηματική υπορουτίνα SOLVE.

### **5.7.3 Υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου.**

Τα υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου δεδομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες DENSF, DENSG, SVLWL, SVLWV και QMUST και οι συνεργαζόμενες συναρτήσεις FPR4, DFPR4, FPR3, DFPR3, FP και DFPPD.

Επισημαίνεται ότι αυτή η ομάδα των υποπρογραμμάτων υπολογίζει τον ειδικό όγκο του βαρέος ύδατος ακόμα και ακριβώς στο κρίσιμο σημείο και φυσικά σε όλη την περιοχή που γειτνιάζει με αυτό, παρόλο που η καταστατική εξίσωση που χρησιμοποιείται στον κώδικα δεν θεωρείται ακριβής γύρω από το ζεύγος ( $P_c, T_c$ ). Αυτό γίνεται διότι για το σαφή καθορισμό των ορίων της γειτονιάς του κρίσιμου σημείου για την οποία ο κώδικας δεν ισχύει<sup>22</sup> είναι απαραίτητο να είναι γνωστές όχι μόνο οι οριακές πιέσεις και θερμοκρασίες αλλά και οι οριακές πυκνότητες. Η προγραμματιστική προσπάθεια για τον υπολογισμό της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος στο κρίσιμο σημείο απαιτήσε τη σύνταξη των υποπρογραμμάτων FPR3, DFPR3, FPR4 και DFPR4.

---

<sup>22</sup> Βλέπε και §5.3

### **5.7.3.1 Υπορουτίνα DENSF(DF).**

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου στο υποπρόγραμμα CHECKPT και αν η μεταβλητή JR έχει την τιμή 1, 4, 5 ή 6 το υποπρόγραμμα HEAVY\_WASP αναθέτει στο υποπρόγραμμα DENSF να υπολογίσει την πυκνότητα του βαρέος ύδατος DF σε  $g/cm^3$  στις αντίστοιχες της JR υποπεριοχές (υγρή φάση, κορεσμένο υγρό, μέρος της υπερκρίσιμης φάσης).

### **5.7.3.2 Υπορουτίνα DENS(DG).**

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου στο υποπρόγραμμα CHECKPT και αν η μεταβλητή JR έχει την τιμή 2, 3, 5 ή 6 το υποπρόγραμμα HEAVY\_WASP αναθέτει στο υποπρόγραμμα DENS(DG) να υπολογίσει την πυκνότητα του βαρέος ύδατος DG σε  $g/cm^3$  στις αντίστοιχες της JR υποπεριοχές (ατμώδης φάση, κορεσμένος ατμός, μέρος της υπερκρίσιμης φάσης).

### **5.7.3.3 Υπορουτίνα SVLWL(DL).**

Το υποπρόγραμμα αυτό καλείται από την υπορουτίνα DENSF και χρησιμεύει για τον υπολογισμό της αρχικής εκτίμησης DL της πυκνότητας σε  $g/cm^3$  στις υποπεριοχές 1, 4, 5, ή 6 χρησιμοποιώντας κυρίως τις σχέσεις (4-18) και (4-26). Στη συνέχεια, η αρχική εκτίμηση DL χρησιμοποιείται από την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson, που εφαρμόζεται για την επίλυση της καταστατικής εξίσωσης (3-7) της μορφής  $P = P(\rho, T)$  ως προς την πυκνότητα του βαρέος ύδατος. Η μέθοδος Newton - Raphson υλοποιείται στη μαθηματική υπορουτίνα SOLVE.

### **5.7.3.4 Συνάρτηση FPR4(X4).**

Είναι η υλοποίηση της εξίσωσης (4-26) απαραίτητης για τον υπολογισμό της αρχικής εκτίμησης της πυκνότητας DL για τις υποπεριοχές 4 και 5 (για την επίλυση της ως προς τη πυκνότητα χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Newton - Raphson). FPR4 είναι η ανηγμένη πίεση  $P_r$ . X4 είναι ο ανηγμένος ειδικός όγκος (το αντίστροφο της ανηγμένης πυκνότητας).

#### **5.7.3.5 Συνάρτηση DFPR4(X4).**

Είναι η υλοποίηση της παραγωγού (4-30) της εξίσωσης (4-26) ως προς την πυκνότητα. Η παράγωγος αυτή είναι απαραίτητη για την επίλυση της εξίσωσης (4-26) ως προς την πυκνότητα με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson.

#### **5.7.3.6 Υπορουτίνα SVLWV(DV).**

Το υποπρόγραμμα αυτό καλείται από την υπορουτίνα DENSQ και χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό της αρχικής εκτίμησης DV της πυκνότητας σε  $\text{g/cm}^3$  στις υποπεριοχές 2, 3, 5, ή 6, χρησιμοποιώντας κυρίως τις σχέσεις (4-21) και (4-25). Στη συνέχεια, η αρχική εκτίμηση DV χρησιμοποιείται από την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson, που εφαρμόζεται για την επίλυση της καταστατικής εξίσωσης (3-7)<sup>23</sup> της μορφής  $P = P(\rho, T)$  ως προς την πυκνότητα του βαρέος ύδατος. Η μέθοδος Newton - Raphson υλοποιείται στη μαθηματική υπορουτίνα SOLVE.

#### **5.7.3.7 Συνάρτηση FPR3(X3).**

Είναι η υλοποίηση της εξίσωσης (4-25) απαραίτητης για τον υπολογισμό της αρχικής εκτίμησης της πυκνότητας DV για τις υποπεριοχές 3 και 5 (για την επίλυση της ως προς τη πυκνότητα χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Newton - Raphson). FPR3 είναι η ανηγμένη πίεση  $P_r$ . X3 είναι ο ανηγμένος ειδικός όγκος (το αντίστροφο της ανηγμένης πυκνότητας).

#### **5.7.3.8 Συνάρτηση DFPR3(X3).**

Είναι η υλοποίηση της παραγωγού (4-29) της εξίσωσης (4-25) ως προς την πυκνότητα. Η παράγωγος αυτή είναι απαραίτητη για την επίλυση της εξίσωσης (4-25) ως προς την πυκνότητα με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson.

---

<sup>23</sup> Κατ' αναλογία με όσα αναφέρονται στην § 3.3.2, στην § 3.3.3 και στην § 3.4.3 και δεδομένης της κοινής μαθηματικής μορφής των καταστατικών εξισώσεων του ελαφρού και του βαρέος ύδατος, είναι φανερό ότι η σχέση (3-3) και οι σχέσεις (3-6) έως και (3-23) που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος αντίστοιχα.

### 5.7.3.9 Συνάρτηση FP(DD).

Είναι η υλοποίηση της καταστατικής εξίσωσης (3-7)  $P = P(\rho, T)$  όπως αυτή χρησιμοποιείται από την μαθηματική υπορουτίνα SOLVE προκειμένου να επιλυθεί ως προς την πυκνότητα με χρήση της αριθμητικής μεθόδου Newton - Raphson. FP είναι η πίεση σε MPa. DD είναι η πυκνότητα σε  $g/cm^3$ . Για τον υπολογισμό της ποσότητας Q και της ποσότητας  $(\partial Q/\partial \rho)_T$  οι οποίες είναι απαραίτητες για την εξίσωση (3-7) χρησιμοποιείται η υπορουτίνα QMUST.

### 5.7.3.10 Συνάρτηση DFPD(DD).

Είναι η υλοποίηση της παραγώγου (4-1) της καταστατικής εξίσωσης (3-7)  $P = P(\rho, T)$  ως προς την πυκνότητα. Η παράγωγος αυτή είναι απαραίτητη για την επίλυση της εξίσωσης (3-7) ως προς την πυκνότητα με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson. Η μέθοδος Newton - Raphson υλοποιείται στην μαθηματική υπορουτίνα SOLVE. Για τον υπολογισμό των ποσοτήτων Q,  $(\partial Q/\partial \rho)_T$  και  $(\partial^2 Q/\partial \rho^2)_T$ , οι οποίες είναι απαραίτητες για την εξίσωση (4-1) χρησιμοποιείται η υπορουτίνα QMUST.

### 5.7.3.11 Υπορουτίνα QMUST.

Πρόκειται για ένα από τα βασικότερα υποπρογράμματα του κώδικα. Ασχολείται με τον υπολογισμό των απαραίτητων ποσοτήτων Q,  $(\partial Q/\partial \tau)_\rho$  (μεταβλητή QTD),  $(\partial Q/\partial \rho)_T$  (μεταβλητή QDT),  $\partial^2 Q/(\partial \rho \partial \tau)$  (μεταβλητή Q2DT),  $(\partial^2 Q/\partial \rho^2)_T$  (μεταβλητή Q2D2T) και  $(\partial^2 Q/\partial^2 \tau)_\rho$  (μεταβλητή Q2T2D). Επίσης προσδιορίζει την ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς  $\psi_0$  (μεταβλητή PSI0), την παράγωγο  $d(\psi_0)/dT$  (μεταβλητή PSI0T), την παράγωγο  $d^2(\psi_0)/dT^2$  (μεταβλητή PSI02T2), την παράγωγο  $\equiv (\partial P_r/\partial T)_\rho$  (μεταβλητή PRTRDR) και τέλος την ποσότητα  $\rho_r (\partial \rho_r/\partial P_r)_T$  (μεταβλητή XTR). Γίνεται χρήση των εξισώσεων (3-4), (4-7), (4-8), (4-9), (4-10), (4-11), (4-12) και (4-14) αντίστοιχα.

### 5.7.4 Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.

Τα υποπρογράμματα υπολογισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες TOTAL, ENERGY, ENTHALPY, ENTROPY, SHP, SHV, SHR\_SOLVE και IBM\_JTC.

#### **5.7.4.1 Υπορουτίνα TOTAL(JP,U,H,S,B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4,CP,CV,IBM,JTC,GAMMA,A,MU,K,PRANDTL,SIGMA).**

Όταν υπολογισθεί η πυκνότητα του βαρέος ύδατος, το υποπρόγραμμα HEAVY\_WASP καλεί το υποπρόγραμμα TOTAL, το οποίο με τη σειρά του αναθέτει σε διάφορα μικρότερα υποπρογράμματα -η σύντομη περιγραφή των οποίων ακολουθεί- τον υπολογισμό των ζητούμενων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων μεταφοράς του βαρέος ύδατος ανάλογα με την τιμή του διακόπτη JP. Πολλές από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος απαιτούν κοινούς υπολογισμούς διαφόρων ποσοτήτων. Οι υπολογισμοί αυτοί γίνονται από την υπορουτίνα QMUST και κοινοποιούνται στα υποπρογράμματα που τους χρειάζονται μέσω εντολών COMMON.

#### **5.7.4.2 Υπορουτίνα ENERGY(U).**

Υπολογίζει την ειδική εσωτερική ενέργεια U [σχέσεις (3-9) και (4-16)] και την ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια PSI [σχέση (3-40)] του βαρέος ύδατος σε kJ/kg.

#### **5.7.4.3 Υπορουτίνα ENTHALPY(H).**

Υπολογίζει την ειδική ενθαλπία H του βαρέος ύδατος σε kJ/kg [σχέσεις (3-13) και (4-16)].

#### **5.7.4.4 Υπορουτίνα ENTROPY(S).**

Υπολογίζει την ειδική εντροπία S του βαρέος ύδατος σε kJ/(kgK) [σχέση (3-11)].

#### **5.7.4.5 Υπορουτίνα SHP(CP).**

Υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση CP σε kJ/(kgK) [σχέση (3-15)] -με τη βοήθεια και των σχέσεων (4-1), (4-2), (4-3), (4-4) και (4-5)].

#### **5.7.4.6 Υπορουτίνα SHV(CV).**

Υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο CV σε kJ/(kgK) [σχέση (3-17)]

#### **5.7.4.7 Υπορουτίνα SHR\_SOVE(GAMMA,A).**

Υπολογίζει το λόγο των ειδικών θερμοχωρητικότητων GAMMA =  $c_p/c_v$  και την ταχύτητα του ήχου A σε m/sec. Χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3-18) και (3-22) αντίστοιχα.

#### **5.7.4.8 Υπορουτίνα IBM\_JTC(IBM,JTC).**

Υπολογίζει την ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα IBM σε  $\text{MPa}^{-1}$  και τον συντελεστή Joule - Thomson JTC σε  $\text{K/MPa}$ . Χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις (3-20) και (3-21) αντίστοιχα.

#### **5.7.5 Υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς.**

Τα υποπρογράμματα υπολογισμού των ιδιοτήτων μεταφοράς του ελαφρού ύδατος είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες VISCOSITY, CONDUCTIVE και TENSION.

#### **5.7.5.1 Υπορουτίνα VISCOSITY(MU).**

Υπολογίζει τη δυναμική συνεκτικότητα MU του βαρέος ύδατος σε  $\text{kg/(ms)}$  [σχέση (3-50)].

#### **5.7.5.2 Υπορουτίνα CONDUCTIVE(K).**

Υπολογίζει τη θερμική αγωγιμότητα K του βαρέος ύδατος σε  $\text{W/(mK)}$  [σχέση (3-52)].

#### **5.7.5.3 Υπορουτίνα TENSION(SIGMA).**

Υπολογίζει την επιφανειακή τάση SIGMA μεταξύ υγρού και ατμού σε  $\text{N/m}$  [σχέση (3-61)].

#### **5.7.6 Υποπρογράμματα μαθηματικών υπολογισμών.**

Το μοναδικό υποπρόγραμμα μαθηματικών υπολογισμών είναι η υπορουτίνα SOLVE.

#### **5.7.6.1 Υπορουτίνα SOLVE(F,DF,EPS,NDEC,X,ITMAX,IER).**

Είναι η υλοποίηση της αριθμητικής μεθόδου Newton - Raphson. Ο τρόπος υλοποίησης είναι όμοιος με αυτόν που έχει περιγραφεί αναλυτικά στην § 4.7.6.1.

## **5.7.7 Άλλα επικουρικά υποπρογράμματα.**

### **5.7.7.1 Υποπρόγραμμα δεδομένων CONSTANTS.**

Είναι ένα FORTRAN blockdata στο οποίο εμπεριέχονται οι περισσότερες από τις σταθερές που είναι απαραίτητες για τις διάφορες συσχετίσεις που υλοποιούνται στον κώδικα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις σταθερές συμπεριλαμβάνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες πιέσεις και θερμοκρασίες για τις οποίες λειτουργεί ο κώδικας, τα κρίσιμα καταστατικά μεγέθη και άλλες σταθερές που αφορούν την ουσία "βαρύ ύδωρ", τα όρια των υποπεριοχών με βάση τα οποία καθορίζεται η μεταβλητή JR κά. Σημειώνεται ότι στο υποπρόγραμμα αυτό δίνονται μόνο σταθερές που κατά κανόνα χρησιμοποιούνται σε περισσότερα από ένα υποπρογράμματα (υπάρχουν μικρές εξαιρέσεις).

### **5.7.7.2 Κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE και συγκριτικά αποτελέσματα.**

Στο Παράρτημα II συμπεριλαμβάνεται, εκτός των υποπρογραμμάτων του κώδικα HEAVY\_WASP και ένα κυρίως πρόγραμμα εφαρμογής-παράδειγμα ειδικά για να κατανοήσει ο χρήστης του κώδικα πως πρέπει να καλεί το υποπρόγραμμα HEAVY\_WASP. Το κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE παρέχει και μία στοιχειώδη έξοδο για τις περισσότερες από τις ιδιότητες του βαρέος ύδατος που είναι δυνατόν να υπολογισθούν από τον κώδικα HEAVY\_WASP, για ένα ζεύγος πίεσης - θερμοκρασίας. Ο Πίνακας 5-5 παρουσιάζει ένα μικρό απόσπασμα των αποτελεσμάτων του κώδικα στην περιοχή του υπέρθερμου υδρατμού, για τρεις πιέσεις 4.5, 5.0, και 5.5 bar (450, 500 και 550 kPa αντίστοιχα) και 25 θερμοκρασίες (από 275 έως 395 °C, βήμα 5 °C). Περιλαμβάνονται μόνο τα αποτελέσματα για τον ειδικό όγκο, την ειδική ενθαλπία και την ειδική εσωτερική ενέργεια. Ο Πίνακας 5-6 περιέχει το ίδιο απόσπασμα των αποτελεσμάτων όπως αυτό δίνεται από τους Πίνακες των Hill P.G. et al., 1981. Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα των δύο πινάκων συμφωνούν. Στο Παράρτημα II, στην παράγραφο II.3, δίνονται συμπληρωματικά και αποτελέσματα με βάση το κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE, όπως ακριβώς αυτά λαμβάνονται στην οθόνη του Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.

## 5.8 Λειτουργία του κώδικα HEAVY\_WASP.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η δομή και η στρατηγική του κώδικα HEAVY\_WASP σε βήματα τα οποία αναλύονται με λεπτομέρεια.

1. Ο κώδικας δέχεται σαν είσοδο την πίεση P σε bar και τη θερμοκρασία T σε βαθμούς Κελσίου. Τα δεδομένα αυτά πρέπει να βρίσκονται μέσα στην περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών για τις οποίες ισχύει ο κώδικας.

Ο κώδικας αποδίδει στην έξοδο τα ακόλουθα μεγέθη (οι μονάδες τους δηλώνονται σε αγκύλες [.])

$P_s$	Πίεση κορεσμού αντίστοιχη στην θερμοκρασία T [bar]
$T_s$	Θερμοκρασία κορεσμού αντίστοιχη στην πίεση P [°C]
v	Ειδικός όγκος [ $m^3/kg$ ]
u	Ειδική εσωτερική ενέργεια [kJ/kg]
$\psi$	Ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια [kJ/kg]
h	Ειδική ενθαλπία [kJ/kg]
s	Ειδική εντροπία [kJ/(kgK)]
cp	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση [kJ/(kgK)]
cn	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο [kJ/(kgK)]
$\gamma$	Συντελεστής ισεντροπικής εκτόνωσης $c_p/c_v$
a	Ταχύτητα του ήχου [m/sec]
$\mu$	Συντελεστής Joule - Thomson [K/MPa]
$k_T$	Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα [ $MPa^{-1}$ ]
$\eta$	Δυναμική συνεκτικότητα kg/(ms)
$\lambda$	Θερμική αγωγιμότητα W/(mK)

2. Η πρώτη κίνηση που κάνει ο κώδικας είναι να διαπιστώσει αν οι παράμετροι κλήσεως του έχουν διατυπωθεί με ορθότητα και αν έχουν πάρει αποδεκτές τιμές<sup>24</sup>. Αν αυτό δεν συμβαίνει η εκτέλεση σταματάει και τυπώνονται σχετικά μηνύματα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου του χρήστη.

---

<sup>24</sup> Βλέπε τον Πίνακα 5-4 και την υπορουτίνα HEAVY\_WASP.



3. Στη συνέχεια ο κώδικας αναθέτει στην υπορουτίνα CHECKPT να ελέγξει εάν η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου βρίσκονται μέσα στην περιοχή για την οποία αυτός μπορεί να λειτουργήσει. Αν η πίεση εισόδου έχει την τιμή 0 (ζητείται δηλαδή μια κατάσταση κορεσμού) ελέγχεται αν η θερμοκρασία εισόδου βρίσκεται στο διάστημα στο οποίο υπάρχουν καταστάσεις κορεσμού. Στην περίπτωση που ο έλεγχος είναι θετικός ανατίθεται στην function FPS να υπολογίσει την πίεση κορεσμού του βαρέος ύδατος [εξίσωση (3-43)]. Αν η θερμοκρασία εισόδου έχει την τιμή 0 (ζητείται δηλαδή και πάλι μια κατάσταση κορεσμού) ελέγχεται αν η πίεση εισόδου βρίσκεται στο διάστημα στο οποίο υπάρχουν καταστάσεις κορεσμού. Αν και εδώ είναι θετικός ο έλεγχος καλείται η function FTS [συσχέτιση (5-2)] με σκοπό να υπολογισθεί μία αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας κορεσμού (TS) του βαρέος ύδατος σε συνάρτηση με την πίεση κορεσμού. Στη συνέχεια δίνεται εντολή στην υπορουτίνα SOLVE να λύσει την εξίσωση κορεσμού  $P_s = P_s(T_s)$  του βαρέος ύδατος [σχέση (3-43)] στη function FPS] ως προς την ακριβή θερμοκρασία κορεσμού χρησιμοποιώντας ως τιμή εκκίνησης για την εύρεση της λύσης την προηγούμενη αρχική εκτίμηση και βέβαια την παράγωγο της εξίσωσης  $P_s = P_s(T_s)$  ως προς τη θερμοκρασία [σχέση (4-31), function DFPS]. Με καθορισμένη την πίεση και την θερμοκρασία εξακριβώνεται πόσο κοντά είναι η κατάσταση εισόδου σε κάποια κατάσταση κορεσμού (το κριτήριο είναι πόσο κοντά είναι η θερμοκρασία εισόδου στη θερμοκρασία κορεσμού για την πίεση εισόδου -καθορίζεται ο δείκτης IS<sup>25</sup>). Υπολογίζονται η ανηγμένη πίεση  $P_r$  (PR) και η ανηγμένη θερμοκρασία  $T_r$  (TR). Με τη βοήθειά τους και με τη χρησιμοποίηση των υποπρογραμμάτων function FPS [σχέση (3-43)] και function PRL [σχέση (4-24)] που καθορίζουν τα όρια των υποπεριοχών προσδιορίζεται ακριβώς η υποπεριοχή του διαγράμματος PT στην οποία βρίσκεται η πίεση και η θερμοκρασία που επιλέχθηκαν σαν είσοδος για τον κώδικα<sup>26</sup>. Με την ολοκλήρωση αυτών των διεργασιών η υπορουτίνα CHECKPT έχει ενημερώσει τις COMMON εντολές επικοινωνίας

COMMON/K1/PP,PR (PP πίεση σε bar)

COMMON/K2/TT,TR (TT θερμοκρασία σε K)

<sup>25</sup> Βλέπε και τον Πίνακα 5-3.

<sup>26</sup> Βλέπε και τον Πίνακα 4-1.

και τη λίστα παραμέτρων (TS, JR, IS)

και επιστρέφει τον έλεγχο στην υπορουτίνα HEAVY\_WASP.

4. Η υπορουτίνα HEAVY\_WASP ενημερώνει με τη σειρά της την COMMON εντολή επικοινωνίας COMMON/K4/J ( $J = JR$ ) και ανάλογα με την τιμή που έχει πάρει ακριβώς ο δείκτης JR η υπορουτίνα HEAVY\_WASP αναθέτει είτε στην υπορουτίνα DENSF, είτε στην υπορουτίνα DENSJ, είτε και στις δύο αυτές υπορουτίνες αν πρόκειται για την κατάσταση κορεσμού, να υπολογίσουν την πυκνότητα του βαρέος ύδατος.
5. Στην περίπτωση που καλείται η υπορουτίνα DENSF επιδιώκεται να υπολογισθεί η πυκνότητα του βαρέος ύδατος στην υγρή φάση, σε καταστάσεις κορεσμένου υγρού και σε ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης (εκείνου που φαίνεται να είναι συνέχεια της υγρής φάσεως). Η υπορουτίνα DENSF καλεί με τη σειρά της την υπορουτίνα SVLWL. Στην τελευταία έχει ανατεθεί ο υπολογισμός μιας πρώτης προσέγγισης για την πυκνότητα (DL σε  $g/cm^3$ ) του βαρέος ύδατος αποκλειστικά για τις υποπεριοχές που απασχολούν την υπορουτίνα DENSF (πρόκειται για αυτές που χαρακτηρίζονται από τις τιμές 1,4,5 και 6 του δείκτη JR). Αναλυτικότερα, αν είναι  $JR = 1$  ή  $JR = 6$  χρησιμοποιείται η εξίσωση (4-18). Αν είναι  $JR = 4$  ή  $JR = 5$  χρησιμοποιείται η εξίσωση (4-26) - function FPR4, η οποία εξαιτίας του ότι είναι πεπλεγμένη ως προς την πυκνότητα επιλύεται αριθμητικά. Για την αριθμητική επίλυση της καλείται και πάλι η υπορουτίνα SOLVE, η οποία χρησιμοποιεί την παράγωγο της εξίσωσης (4-26) ως προς την πυκνότητα [σχέση (4-30), function DFPR4]. Ως τιμή εκκινήσεως χρησιμοποιείται μία "ψευδοπυκνότητα" η οποία προκύπτει με την υπόθεση ότι η εξίσωση για τις υποπεριοχές όπου  $JR = 1$  ή  $JR = 6$  ισχύει και στις υποπεριοχές όπου  $JR = 4$  ή  $JR = 5$ . Όταν ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της πρώτης προσέγγισης για την πυκνότητα, ο έλεγχος επιστρέφει στην υπορουτίνα DENSF και καλείται η SOLVE για την επίλυση της εξίσωσης  $P = P(\rho, T)$  [σχέση (3-7) - function FP] ως προς την ακριβή τιμή της πυκνότητας του βαρέος ύδατος. Τιμή εκκίνησης για τη λύση είναι βέβαια αυτή η αρχική προσέγγιση και χρειάζεται επιπλέον και η εξίσωση της παραγώγου της  $P = P(\rho, T)$

ως προς την πυκνότητα [σχέση (4-1), function DFP]. Σημειώνεται ότι σε κάθε έξοδο από την υπορουτίνα DENSF (μετά την κλήση της SOLVE) ενημερώνεται η COMMON εντολή επικοινωνίας COMMON/K3/DD (DD η πυκνότητα σε  $\text{g/cm}^3$ ). Με την εύρεση και της πυκνότητας του βαρέος ύδατος για την πίεση και τη θερμοκρασία εισόδου, παίρνει τιμή η μεταβλητή DF (DF η πυκνότητα σε  $\text{g/cm}^3$ ) και η ροή του κώδικα οδηγεί και πάλι στην υπορουτίνα HEAVY\_WASP.

6. Στην άλλη περίπτωση που καλείται η υπορουτίνα DENSJ επιδιώκεται να υπολογισθεί η πυκνότητα του βαρέος ύδατος στην ατμώδη φάση, σε καταστάσεις κορεσμένου ατμού και σε ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσεως (εκείνου που φαίνεται να είναι συνέχεια της ατμώδους φάσεως). Η υπορουτίνα DENSJ καλεί στη συνέχεια την υπορουτίνα SVLWV. Εκεί υπολογίζεται μία πρώτη προσέγγιση για την πυκνότητα (DV σε  $\text{g/cm}^3$ ) του βαρέος ύδατος μόνο για τις υποπεριοχές που απασχολούν την υπορουτίνα DENSJ (πρόκειται για αυτές που χαρακτηρίζονται από τις τιμές 2, 3, 5 και 6 του δείκτη JR). Αναλυτικότερα, αν είναι JR = 2 ή JR = 6 χρησιμοποιείται η εξίσωση (4-21). Αν είναι JR = 3 ή JR = 5 χρησιμοποιείται η εξίσωση (4-25) - function FPR3, η οποία εξαιτίας του ότι είναι και αυτή πεπλεγμένη ως προς την πυκνότητα επιλύεται αριθμητικά. Η εύρεση της λύσης ανατίθεται στην υπορουτίνα SOLVE. Χρησιμοποιείται η παράγωγος της εξίσωσης (4-26) ως προς την πυκνότητα [σχέση (4-29), function DFPR3]. Η τιμή εκκινήσεως είναι μία "ψευδοπυκνότητα" που προκύπτει αν θεωρηθεί ότι η εξίσωση για τις υποπεριοχές όπου JR= 2 ή JR = 6 ισχύει και στις υποπεριοχές όπου JR = 3 ή JR = 5. Δεδομένου ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου η τιμή εκκινήσεως που υπολογίζεται με αυτόν τον τρόπο δεν είναι ικανοποιητικά "κοντά" στην πραγματική ώστε να υπολογίζεται η λύση από την υπορουτίνα SOLVE, τότε χρησιμοποιείται η καταστατική εξίσωση του τελείου αερίου για να προκύψει μια "ψευδοπυκνότητα" ως τιμή εκκινήσεως. Όταν ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της πρώτης προσέγγισης για την πυκνότητα, ο έλεγχος επιστρέφει στην υπορουτίνα DENSJ και καλείται η SOLVE για την επίλυση της εξίσωσης  $P = P(\rho, T)$  [σχέση (3-7) function FP] ως προς την ακριβή τιμή της πυκνότητας του βαρέος ύδατος. Τιμή εκκίνησης για τη λύση είναι βέβαια αυτή η αρχική προσέγγιση και χρειάζεται επιπλέον και η εξίσωση της παραγώγου της  $P = P(\rho, T)$  ως προς την πυκνότητα [σχέση (4-1), function DFP]. Σημειώνεται ότι σε κάθε έξοδο από την υπορουτίνα DENSJ (μετά την κλήση της SOLVE) ενημερώνεται η

COMMON εντολή επικοινωνίας COMMON/K3/DD (DD η πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>). Με την εύρεση και της πυκνότητας του ελαφρού ύδατος για την πίεση και τη θερμοκρασία εισόδου, παίρνει τιμή η μεταβλητή DG (DG η πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>) και η ροή του κώδικα οδηγεί και πάλι στην υπορουτίνα HEAVY\_WASP.

7. Κάθε κλήση της function FP και της function DFP συνεπάγεται και την κλήση της υπορουτίνας QMUST για τον υπολογισμό ενός πλήθους ποσοτήτων που είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας και της πυκνότητας [βλέπε και την εξίσωση (3-41) και τις (4-7) έως και (4-17)]. Αυτό χρησιμεύει όχι μόνο για τους υπολογισμούς που αφορούν αποκλειστικά στα υποπρογράμματα FP και DFP αλλά και για την ενημέρωση της COMMON εντολής επικοινωνίας

COMMON/QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2

η οποία χρησιμοποιείται σε πολλά άλλα υποπρογράμματα.

8. Η υπορουτίνα HEAVY\_WASP υπολογίζει τώρα τον ειδικό όγκο του βαρέος ύδατος SVF ή SVG σε m<sup>3</sup>/kg. Σε αυτήν την φάση εξετάζει επίσης μήπως τυχάνει η πυκνότητα που υπολογίσθηκε από τις υπορουτίνες DENSEF και DENSEG και η θερμοκρασία εισόδου (ως θερμοκρασία εισόδου εννοείται και η θερμοκρασία κορεσμού που υπολογίσθηκε από την υπορουτίνα CHECKPT για μία πίεση κορεσμού -πραγματική θερμοκρασία εισόδου 0) να βρίσκονται στη γειτονιά του κρίσιμου σημείου. Αν πράγματι συμβαίνει αυτό η εκτέλεση σταματάει και τυπώνεται σχετικό μήνυμα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου. Αν όχι τότε καλείται η υπορουτίνα TOTAL με σκοπό τον υπολογισμό των άλλων θερμοφυσικών ιδιοτήτων που μπορεί να δώσει ο κώδικας. Η υπορουτίνα TOTAL καλείται μία μόνο φορά αν ο δείκτης JR παίρνει τις τιμές 1, 2, 3 και 4. Συγκεκριμένα, αν είναι JR = 1 ή JR = 4 η υπορουτίνα TOTAL φροντίζει για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος στην υγρή φάση και σε ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης. Αλλιώς, αν είναι JR = 2 ή JR = 3 η υπορουτίνα TOTAL φροντίζει για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος στην ατμώδη φάση και σε ένα μέρος της υπερκρίσιμης φάσης. Στην περίπτωση που JR = 6 ή JR = 5 τότε η υπορουτίνα TOTAL καλείται δύο φορές διότι αυτές οι τιμές του δείκτη JR αντιπροσωπεύουν καταστάσεις

κορεσμού για τις οποίες οι θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος πρέπει να υπολογισθούν δύο φορές -μία φορά για το κορεσμένο υγρό και μία φορά για τον κορεσμένο ατμό.

9. Ανάλογα με την τιμή που έχει πάρει ο διακόπτης JP κατά την κλήση του κώδικα η υπορουτίνα TOTAL καλεί μία, ή δύο, ή τρεις, κτλ ή και όλες από τις ακόλουθες υπορουτίνες: ENERGY, ENTHALPY, ENTROPY, SHP, SHV, SHR\_SOVE, IBM\_JTC, VISCOSITY, CONDUCTIVE και TENSION. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιούνται αυτές οι κλήσεις εξηγήθηκε σαφώς στην § 5.6.2. Το σύνολο αυτών των υπορουτινών (και της υπορουτίνας TOTAL συμπεριλαμβανομένης) ανήκει στα προαιρετικά υποπρογράμματα του κώδικα, στα υποπρογράμματα δηλαδή που μπορούν να αφαιρεθούν (ένα - ένα, κατά τυχίες ομάδες ή και όλα) χωρίς με αυτό να επηρεάζονται κατά κανένα τρόπο οι υπόλοιπες λειτουργίες του κώδικα που περιγράφθηκαν προηγούμενα και αφορούν κυρίως στον υπολογισμό του ειδικού όγκου του βαρέος ύδατος για μία πίεση και μία θερμοκρασία εισόδου. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα προαιρετικά υποπρογράμματα του κώδικα θα δοθούν στην επόμενη παράγραφο 5.10. Από την υπορουτίνα ENERGY υπολογίζεται η ειδική εσωτερική ενέργεια U [σχέση (3-9)] και η ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια PSI [σχέση (3-40)]. Από την υπορουτίνα ENTHALPY υπολογίζεται η ειδική ενθαλπία H [σχέσεις (3-13) και (4-16)]. Η υπορουτίνα ENTROPY προσδιορίζει την ειδική εντροπία S [σχέση (3-11)]. Οι υπορουτίνες SHP και SHV υπολογίζουν τις ειδικές θερμοχωρητικότητες CP και CV αντίστοιχα [σχέσεις (3-15) και (3-17)]. Η υπορουτίνα SHR\_SOVE ασχολείται με τον ισηντροπικό εκθέτη GAMMA [σχέση (3-18)] και την ταχύτητα του ήχου A [σχέση (3-22)] ενώ η υπορουτίνα IBM\_JTC προσδιορίζει το συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπίεστικότητας IBM [σχέση (3-21)] και το συντελεστή Joule - Thomson JTC [σχέση (3-20)]. Η εύρεση της δυναμικής συνεκτικότητας MU και της θερμικής αγωγιμότητας K έχει ανατεθεί στις υπορουτίνες VISCOSITY και CONDUCTIVE αντίστοιχα. Λειτουργία της υπορουτίνας TENSION είναι να υπολογίζει την επιφανειακή τάση SIGMA μεταξύ νερού και ατμού στην κατάσταση κορεσμού [σχέση (3-61)]. Όλες οι παραπάνω υπορουτίνες δέχονται σαν είσοδο την πίεση και την πυκνότητα με την βοήθεια των COMMON εντολών επικοινωνίας

COMMON/K2/TT,TR  
COMMON/K3/DD

(με εξαίρεση την TENSION οι οποία δέχεται σαν είσοδο μόνο τη θερμοκρασία - επικοινωνία μέσω της COMMON/K2/TT,TR).

Για τις υπορουτίνες που υπολογίζουν θερμοδυναμικές ιδιότητες είναι απαραίτητη και η χρησιμοποίηση της COMMON εντολής επικοινωνίας

COMMON/QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2

η οποία αποκαθιστά την επαφή τους με την υπορουτίνα QMUST και με τις ποσότητες που αυτή υπολογίζει (αναγκαίες στις σχέσεις υπολογισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων).

Η COMMON/QAUX/ δεν χρειάζεται στις υπορουτίνες VISCOSITY, CONDUCTIVE και TENSION για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων μεταφοράς.

Με την συμπλήρωση των κλήσεων των ζητούμενων να κληθούν (διακόπτης JP) υπορουτινών για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων (όλων των υπορουτινών αν ζητούνται όλες -JP = 31 ή JP = 63) ενημερώνεται με τις υπολογισθείσες τιμές η λίστα παραμέτρων

(JP,B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4,U,PSI,H,S,CP,CV,  
IBM,JTC,GAMMA,A,MU,K,PRANDTL,SIGMA)

JP μεταβλητή ΕΙΣΟΔΟΥ

[οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι μεταβλητές ΕΞΟΔΟΥ]

της υπορουτίνας TOTAL και τέλος ο έλεγχος επιστρέφει στην υπορουτίνα HEAVY\_WASP.

10. Στην υπορουτίνα HEAVY\_WASP δρομολογούνται τώρα οι τελευταίες υπολογιστικές ενέργειες, οι οποίες πρέπει να γίνουν πριν ο έλεγχος της ροής επιστρέψει στο κυρίως πρόγραμμα του χρήστη. Ενημερώνονται δηλαδή αυτόματα

οι COMMON εντολές επικοινωνίας της υπορουτίνας HEAVY\_WASP με το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη καθώς και η λίστα παραμέτρων της (κατ'επέκταση δηλαδή αποκαθίσταται πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία του κώδικα με τον χρήστη). Πρόκειται βέβαια για τις γνωστές COMMON εντολές

COMMON/PROPERTY1/...

COMMON/PROPERTY2/...

και

COMMON/PROPERTY3/...

και για τη λίστα παραμέτρων

(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,JS)

JS,JP μεταβλητές ΕΙΣΟΔΟΥ

P,T μεταβλητές ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ

TS, SVF, SVG, JR, IS μεταβλητές ΕΞΟΔΟΥ

Μετά από αυτά ο έλεγχος επιστρέφει στο κυρίως πρόγραμμα του χρήστη. Μία πολύ απλή μορφή τέτοιου προγράμματος μπορεί να είναι αυτή του κυρίως προγράμματος EXAMPLE.

Πέρα από τις COMMON εντολές επικοινωνίας ο κώδικας χρησιμοποιεί και άλλες COMMON εντολές οι οποίες ονομάστηκαν COMMON εντολές σταθερών. Πρόκειται για Labelled Common Blocks, με το χαρακτηριστικό /Zi/, τα οποία παίρνουν τιμές στο υποπρόγραμμα blockdata CONSTANTS και αφορούν, όπως ήδη σημειώθηκε σταθερές, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σε περισσότερα από ένα υποπρογράμματα του κώδικα HEAVY\_WASP (ή γενικότερα περισσότερο από μία φορά).

Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 5-7 παρουσιάζονται όσες από τις μεταβλητές του κώδικα δεν συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα 5-1, των οποίων η γνώση είναι απαραίτητη σε εκείνον το χρήστη που επιθυμεί να ασχοληθεί σε βάθος με την

προγραμματιστική υλοποίηση του πλέγματος των εξισώσεων για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος. Επιπλέον σε ειδική παράγραφο του Παραρτήματος II παρουσιάζονται με ακόμα πιο λεπτομερή τρόπο όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα και κατά το δυνατόν με τη σειρά που αυτά χρησιμοποιούνται. Η παρουσίαση εστιάζει στα θέματα μεταβλητών εισόδου, μεταβλητών εξόδου, τοπικών μεταβλητών και επικοινωνίας με άλλα υποπρογράμματα.

## **5.9 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά των υποπρογραμμάτων του κώδικα.**

Τα υποπρογράμματα του κώδικα είναι δυνατό να καταταγούν σε υποσύνολα με τη χρησιμοποίηση διαφόρων κριτηρίων, όπως ο βαθμός αλληλεξάρτησης τους (ισοδύναμα δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο αυτά επικοινωνούν), η θέση του κάθε ενός από αυτά στη συνολική δομή του κώδικα και τέλος ο ρόλος και τα καθήκοντά τους μέσα σε αυτόν. Η κατάταξη αυτή αναπτύσσεται στις επόμενες τρεις παραγράφους.

### **5.9.1 Βαθμός αλληλεξάρτησης των υποπρογραμμάτων.**

Για να αποδοθεί η έννοια της αλληλεξάρτησης, τα υποπρογράμματα μπορούν να καταταγούν σε **ανεξάρτητα**, **μετρίως εξηρημένα** και **τέλος σε πλήρως εξηρημένα υποπρογράμματα**. Η κατάταξη αυτή γίνεται σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο ένα υποπρόγραμμα επικοινωνεί με τις συνεργαζόμενες υπορουτίνες (subroutines) και συναρτήσεις (functions). Ο γράφων επιδίωξε κατά την κατάστρωση αυτών των υποπρογραμμάτων να εφαρμόσει τον ακόλουθο τύπο επικοινωνίας:

**Τα υποπρογράμματα δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου από εντολές COMMON (Labelled Common Blocks) και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους (Parameter List).**

Όπως ήταν φυσικό αυτός ο τρόπος επικοινωνίας δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοσθεί σε όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα διότι αυτό δεν αποτελούσε πάντοτε την ορθότερη λύση. Δημιουργήθηκαν έτσι και ορισμένες παραλλαγές, σύμφωνα με τις οποίες μπορούν να καταταγούν τα υποπρογράμματα.



Υπενθυμίζεται ότι οι μεταβλητές (ή παράμετροι) ενός υποπρογράμματος από πλευράς τυπικού της γλώσσας FORTRAN εντάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- μεταβλητές εισόδου,
- μεταβλητές εξόδου,
- τοπικές μεταβλητές, και τέλος
- κοινές μεταβλητές όλων των υποπρογραμμάτων, οι οποίες καταλαμβάνουν κοινή περιοχή μνήμης (common memory area -μεταβλητές των Labelled Common Blocks)

Η εννοιολογική σημασία των τριών πρώτων κατηγοριών μεταβλητών είναι λίγο ως πολύ σαφής. Για τις μεταβλητές όμως της τέταρτης κατηγορίας υπάρχει μεγάλη προγραμματιστική ελευθερία. Αυτό σημαίνει ότι οι COMMON μεταβλητές μπορούν να έχουν "διπλό" ρόλο, μπορούν να παίζουν δηλαδή τόσο το ρόλο της μεταβλητής εισόδου όσο και εκείνο της μεταβλητής εξόδου.

Ειδικά τώρα για όσα υποπρογράμματα δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου με τη βοήθεια εντολών COMMON, αυτές (οι εντολές) μπορούν να διαχωρισθούν στις

**COMMON εντολές επικοινωνίας** (με χαρακτηριστικούς κωδικούς /Ki/,  $i = 1, 2, 3$  και 4 και /PROPERTY/,  $i = 1, 2$  και 3)

και στις

**COMMON εντολές σταθερών** (με χαρακτηριστικό κωδικό /Zi/,  $i = 1, 2, 3, \dots$  και 11)

Μέσω COMMON εντολών σταθερών δίνονται, όπως γίνεται κατανοητό, τιμές μόνο σε μεταβλητές εισόδου που αντιπροσωπεύουν σταθερές του κώδικα (σταθερές για τις συσχετίσεις, όρια περιοχών ισχύος κτλ).

Αντίθετα μέσω COMMON εντολών επικοινωνίας παίρνουν τιμές τόσο διάφορες μεταβλητές εισόδου σε υποπρογράμματα, όσο και πολλές μεταβλητές εξόδου από αυτά. Οι COMMON εντολές επικοινωνίας είναι κοινές για πολλά από τα υποπρογράμματα και αποκαθιστούν την τυπική τους επαφή καθώς και την αρμονική τους συνεργασία.

### 5.9.2 **Ανεξάρτητα υποπρογράμματα.**

Ως ανεξάρτητα χαρακτηρίζονται τα υποπρογράμματα που δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου αποκλειστικά μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους. Αν μάλιστα είναι ακριβώς γνωστή η εργασία που έχει ανατεθεί σε αυτά τα υποπρογράμματα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τα αντικαταστήσει με άλλα δικής του επινόησης που να κάνουν όμως την ίδια ακριβώς εργασία. Σε άλλη περίπτωση δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να τα χρησιμοποιήσει σε δικούς του εντελώς διαφορετικούς κώδικες. Τα ανεξάρτητα υποπρογράμματα δηλαδή μπορούν να θεωρούνται από τον χρήστη ως μιάρα κουτιά (black boxes). Ιδιώτερα αν πρόκειται για μαθηματικά υποπρογράμματα (όπως για παράδειγμα η μέθοδος Newton - Raphson για την αριθμητική επίλυση πεπλεγμένων εξισώσεων) ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει στη θέση τους έτοιμα υποπρογράμματα από βιβλιοθήκες μαθηματικών υποπρογραμμάτων (π.χ. IMSL -International Mathematical and Statistical Library κτλ), άσχετα αν κάτι τέτοιο υπονομεύει τελικά την γενικότερη ανεξαρτησία του παρουσιαζόμενου κώδικα. Τονίζεται ότι **ο κώδικας HEAVY\_WASP δεν καλεί υποπρογράμματα από βιβλιοθήκες (Library Free Code).**

Στην περίπτωση μας ανεξάρτητη είναι η υπορουτίνα SOLVE.

### 5.9.3 **Μετρίως εξηρημένα υποπρογράμματα.**

Ως μετρίως εξηρημένα χαρακτηρίζονται τα υποπρογράμματα που τηρούν το τυπικό επικοινωνίας που θεωρήθηκε καταλληλότερο και χρησιμοποιήθηκε περισσότερο. Τα υποπρογράμματα αυτά δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου από εντολές COMMON (Labelled Common Blocks) και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους (Parameter List).

Μικρή εξαίρεση αποτελούν οι συναρτήσεις (functions) οι οποίες γενικά δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου τόσο από εντολές COMMON, όσο και μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου μόνο μέσα από τη λίστα παραμέτρων. Ο λόγος που υιοθετήθηκε αυτή η επικοινωνία για τις functions οφείλεται αφενός στην ανάγκη απόδοσης της έννοιας "συνάρτηση" και προγραμματιστικά και αφετέρου στην εξυπηρέτηση της επικοινωνίας ορισμένων από αυτές με την μαθηματική υπορουτίνα SOLVE.

Άλλη εξαίρεση είναι η κεντρική υπορουτίνα HEAVY\_WASP. Αυτή χρησιμοποιεί COMMON εντολές και λίστα παραμέτρων για να εξυπηρετήσει τόσο την είσοδο όσο και την έξοδο. Παρόλαυτά εντάσσεται στα μετρίως εξηρητημένα υποπρογράμματα.

Αν ο χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει ένα από αυτά τα μετρίως εξηρητημένα υποπρογράμματα σαν μέρος ενός δικού του διαφορετικού κώδικα θα συναντήσει σημαντικές δυσκολίες για την υπερπήδηση των οποίων δεν απαιτείται μόνο προγραμματιστική εμπειρία αλλά και πολύ καλή γνώση του κώδικα HEAVY\_WASP. Σχετικά ευκολότερη φαίνεται ότι είναι η αποκλειστική χρησιμοποίηση των υπορουτινών VISCOSITY και CONDUCTIVE για τον υπολογισμό της δυναμικής συνεκτικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας αντίστοιχα αν είναι γνωστές η θερμοκρασία και η πυκνότητα στις κατάλληλες μονάδες. Το ίδιο ισχύει και για την υπορουτίνα TENSION για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης αν είναι γνωστή η θερμοκρασία κορεσμού. Τα παραπάνω δεν σημαίνουν καθόλου ότι πολλά από τα μετρίως εξηρητημένα υποπρογράμματα δεν μπορούν να αφαιρεθούν από τον κώδικα με σκοπό να εξυπηρετήσουν την εξοικονόμηση στη χρήση κεντρικής μνήμης ή την αύξηση της ταχύτητας υπολογισμών στο υπολογιστικό σύστημα του χρήστη (αν και είναι φανερό ότι η αύξηση της ταχύτητας ανταπόκρισης του κώδικα HEAVY\_WASP μπορεί να γίνει με την κατάλληλη χρήση του διακόπτη JP). Ο τρόπος με τον οποίο ο κώδικας HEAVY\_WASP μπορεί να λειτουργήσει και μετά την αφαίρεση πολλών από τις υπορουτίνες του θα εξετασθεί σε επόμενη παράγραφο. Τα ονόματα των μετρίως εξηρητημένων υποπρογραμμάτων του κώδικα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-8.

#### **5.9.4 Πλήρως εξηρητημένα υποπρογράμματα.**

Ως πλήρως εξηρητημένα υποπρογράμματα χαρακτηρίζονται εκείνα τα οποία επικοινωνούν με τα συνεργαζόμενα υποπρογράμματα μόνο διά μέσου εντολών COMMON. Στην περίπτωση που εξετάζεται αυτά είναι η υπορουτίνα QMUST και το blockdata CONSTANTS. Οποιαδήποτε, έστω και μικρή, επέμβαση σε αυτά τα δύο υποπρογράμματα πρέπει να γίνεται από τον χρήστη μόνο αν κρίνεται απόλυτα απαραίτητη και με πάρα πολλή προσοχή. Η αθέλητη εισαγωγή κάποιου εκ πρώτης όψεως αμελητέου λάθους σε αυτά τα υποπρογράμματα είναι δυνατόν να ανατρέψει την ορθότητα των υπολογισμών στο σύνολο του κώδικα ή ακόμα και να οδηγήσει την εκτέλεση του κώδικα σε μοιραία λάθη (fatal errors -κυρίως διαιρέσεις με το μηδέν

και υψώσεις αρνητικών σε ρητές δυνάμεις). Αν ο χρήστης έχει αρκετή εμπειρία και το επιθυμεί μπορεί να αποσπάσει την υπορουτίνα QMUST από τον κώδικα και να την χρησιμοποιήσει ανεξάρτητα για να υπολογίσει τα μεμονωμένα μεγέθη που παρέχονται από αυτή.

## 5.10 Η δομική ευελιξία του κώδικα.

Κατά τη σύνταξη του κώδικα χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονες αρχές δομημένου προγραμματισμού. Επιδιώχθηκε η τμηματική δομή του κώδικα (code modular design) με τρόπο ώστε, αν ο χρήστης το επιθυμεί, να επιλέγει μόνο εκείνες τις υπορουτίνες, που είναι απαραίτητες στους υπολογισμούς του. Με βάση αυτή τη λογική τα υποπρογράμματα του κώδικα μπορούν να κατατάσσονται σε ομάδες που πραγματοποιούν συναφείς λειτουργίες. Η διάκριση αυτή επιτρέπει το διαχωρισμό των υποπρογραμμάτων σε **απαραίτητα** και **προαιρετικά**.

Απαραίτητα θεωρούνται τα υποπρογράμματα χωρίς τα οποία ο κώδικας δεν μπορεί να λειτουργήσει. Αντίθετα προαιρετικά είναι τα υποπρογράμματα που μπορούν να αφαιρεθούν από τον κώδικα· αυτό βέβαια έχει ως συνέπεια τη μείωση του αριθμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος που είναι δυνατόν να υπολογισθούν.

**Αν αφαιρεθεί από τον κώδικα το σύνολο των προαιρετικών υποπρογραμμάτων τότε η μόνη ιδιότητα που μπορεί αυτός να υπολογίσει με δεδομένα την πίεση και τη θερμοκρασία είναι ο ειδικός όγκος του βαρέος ύδατος.** Τα ονόματα των προαιρετικών υποπρογραμμάτων του κώδικα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5-9, όπου σημειώνονται επίσης και οι μετατροπές που πρέπει να γίνουν στα απαραίτητα υποπρογράμματα του κώδικα για να επιτευχθεί η αφαίρεσή τους. Όλα τα υπόλοιπα υποπρογράμματα χαρακτηρίζονται απαραίτητα για λόγους που γίνονται προφανείς αν ανατρέξει κανείς στο ρόλο τους που περιγράφεται στην παράγραφο "Λειτουργία του κώδικα".

Παρατηρείται ότι τα προαιρετικά υποπρογράμματα συμπεριλαμβάνουν αποκλειστικά τις υπορουτίνες που υπολογίζουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του ελαφρού ύδατος εκτός βέβαια από τον ειδικό του όγκο.

## Πίνακες του Κεφαλαίου

**Πίνακας 5-1:** Σύμβολα, ονοματολογία και μονάδες βασικών μεταβλητών.

AF	ταχύτητα του ήχου $a$ στο υγρό σε $m/s$ (F - Fluid)
AG	ταχύτητα του ήχου $a$ στον ατμό σε $m/s$ (G - Gas)
CPF	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p$ του υγρού υπό σταθερή πίεση σε $kJ/(kgK)$ (Heat Capacity of Fluid at constant Pressure)
CPG	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p$ του ατμού υπό σταθερή πίεση σε $kJ/(kgK)$ (Heat Capacity of Gas at constant Pressure)
CVF	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_v$ του υγρού υπό σταθερό όγκο σε $kJ/(kgK)$ (Heat Capacity of Fluid at constant Volume)
CVG	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_v$ του ατμού υπό σταθερό όγκο σε $kJ/(kgK)$ (Heat Capacity of Gas at constant Volume)
GAMMAF	λόγος των ειδικών θερμοχωρητικότητων του υγρού $CPF/CVF$
GAMMAG	λόγος των ειδικών θερμοχωρητικότητων του ατμού $CPG/CVG$
HF	ειδική ενθαλπία $h$ του υγρού σε $kJ/kg$
HG	ειδική ενθαλπία $h$ του ατμού σε $kJ/kg$
HFG	λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης $r$ σε $kJ/kg$ (F = Fluid, G = Gas)
IBMF	ισοθερμοκρασιακή συμπιεστικότητα $K_T$ του υγρού σε $MPa^{-1}$ (Isothermal Bulk Modulus of Fluid)
IBMG	ισοθερμοκρασιακή συμπιεστικότητα $K_T$ του ατμού σε $MPa^{-1}$ (Isothermal Bulk Modulus of Gas)
IS	δείκτης σύγκρισης με την κατάσταση κορεσμού (S = Saturation)
JP	καθορισμός των ζητούμενων ιδιοτήτων
JR	καθορισμός της περιοχής του διαγράμματος PT (R = Region)
JS	καθορισμός των μεταβλητών εισόδου
JTCF	συντελεστής Joule - Thomson $\mu$ για το υγρό σε $K/MPa$ (Joule - Thomson Coefficient of Fluid)
JTCG	συντελεστής Joule - Thomson $\mu$ για τον ατμό σε $K/MPa$ (Joule - Thomson Coefficient of Gas)
KF	θερμική αγωγιμότητα $\lambda$ του υγρού σε $W/(mK)$
KG	θερμική αγωγιμότητα $\lambda$ του ατμού σε $W/(mK)$
MUF	δυναμική συνεκτικότητα $\eta$ του υγρού σε $kg/(ms)$

MUG	δυναμική συνεκτικότητα η του ατμού σε kg/(ms)
P	πίεση P σε bar
PRANDTLF	αριθμός Prandtl (Pr) του υγρού
PRANDTLG	αριθμός Prandtl (Pr) του ατμού
PSIF	ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια ψ του υγρού σε kJ/kg
PSIG	ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια ψ του ατμού σε kJ/kg
SIGMAFG	επιφανειακή τάση σ μεταξύ υγρού και ατμού στην κατάσταση κορεσμού σε N/m <sup>2</sup>
SF	ειδική εντροπία s του υγρού σε kJ/(kgK)
SG	ειδική εντροπία s του ατμού σε kJ/(kgK)
SVF	ειδικός όγκος v του υγρού σε m <sup>3</sup> /kg (Specific Volume of Fluid)
SVG	ειδικός όγκος v του ατμού σε m <sup>3</sup> /kg (Specific Volume of Gas)
T	θερμοκρασία T σε μονάδες K
TS	θερμοκρασία κορεσμού Ts σε μονάδες K (Saturation Temperature)
UF	ειδική εσωτερική ενέργεια u του υγρού σε kJ/kg
UG	ειδική εσωτερική ενέργεια u του ατμού σε kJ/kg

Σημείωση:

Το επίθεμα F ≡ Fluid αναφέρεται βέβαια κυρίως στις θερμοφυσικές ιδιότητες της υγρής φάσης αλλά καλύπτει και τις ιδιότητες του κορεσμένου υγρού και ενός μέρους της υπερκρίσιμης φάσης.

Ομοίως το επίθεμα G ≡ Gas αναφέρεται κυρίως στις θερμοφυσικές ιδιότητες της ατμώδους φάσεως αλλά καλύπτει και τις ιδιότητες του κορεσμένου ατμού και ενός διαφορετικού μέρους της υπερκρίσιμης φάσης.

**Πίνακας 5-2: Υπολογισμός ιδιοτήτων ανάλογα με τις τιμές του διακόπτη JP.**

JP = 0	δεν υπολογίζεται καμία ιδιότητα,
JP = 1 = 2 <sup>0</sup>	υπολογίζεται η εσωτερική ενέργεια,
JP = 2 = 2 <sup>1</sup>	υπολογίζονται η ενθαλπία και η εντροπία,
JP = 4 = 2 <sup>2</sup>	
	υπολογίζονται η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο, ο λόγος των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων, η ταχύτητα του ήχου, η ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα και ο συντελεστής Joule - Thomson,
JP = 8 = 2 <sup>3</sup>	
	υπολογίζονται η δυναμική συνεκτικότητα, η θερμική αγωγιμότητα και ο αριθμός Prandtl,
JP = 16 = 2 <sup>4</sup>	υπολογίζεται η επιφανειακή τάση, και
JP = 32 = 2 <sup>5</sup>	φυλάσσεται για μελλοντική χρήση
	Ο διακόπτης JP καθορίζει ποιές ιδιότητες ζητάει ο χρήστης να υπολογισθούν από τον κώδικα. Ο διακόπτης αυτός μπορεί να πάρει τις ακέραιες τιμές από 0 έως και 63. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν κάποιο άθροισμα των αριθμών 0, 2, 4, 8, 16 και 32 - δηλαδή ισodύναμα των αριθμών 0, 2 <sup>0</sup> , 2 <sup>1</sup> , 2 <sup>2</sup> , 2 <sup>3</sup> , 2 <sup>4</sup> και 2 <sup>5</sup> . Κάθε τέτοιο δυαδικό άθροισμα εξυπηρετεί τον με μοναδικό τρόπο τον προσδιορισμό του συνδυασμού των ιδιοτήτων που ζητούνται.

**Πίνακας 5-3: Τιμές του δείκτη IS.**

IS είναι 0

όταν η πίεση ή/και η θερμοκρασία εισόδου είναι υπερκρίσιμες

IS είναι 1

όταν για αυτή την πίεση εισόδου υπάρχει κατάσταση κορεσμού. Υπολογίζεται η αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού σε μονάδες K.

IS είναι 2

όταν η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου αντιστοιχούν ακριβώς -ή βρίσκονται πολύ κοντά (θερμοκρασιακή απόσταση  $\pm 1$  °C)- στην κατάσταση κορεσμού.



**Πίνακας 5-4: Πίνακας λειτουργίας του κώδικα.**

**Κλήση του κώδικα:**

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

DOUBLE PRECISION IBMF,IBMG,JTCF,JTCG,KF,KG,LACFG,MUF,MUG

COMMON/PROPERTY1/B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F,UF,PSIF,HF,SF,CPF,CVF,

\*IBMF,JTCF,GAMMAF,AF,MUF,KF,PRANDTLF

COMMON/PROPERTY2/B2G,B3G,B4G,DB2G,DB3G,DB4G,UG,PSIG,HG,SG,CPG,CVG,

\*IBMG,JTCG,GAMMAG,AG,MUG,KG,PRANDTLG

COMMON/PROPERTY3/HFG,SIGMAFG,LACFG

CALL HEAVY\_WASP (JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS)

**Μεταβλητές:**

1. αν JS = 1 με δεδομένα P,T υπολόγισε τις ιδιότητες που ζητούνται με το διακόπτη JP (Πίνακας 5-2)
2. με τον διακόπτη JP καθόρισε τις ζητούμενες θερμοδυναμικές ιδιότητες και ιδιότητες μεταφοράς
3. P είναι η πίεση εισόδου
4. T είναι η θερμοκρασία εισόδου
5. TS είναι η θερμοκρασία κορεσμού
6. SVF είναι ο ειδικός όγκος του υγρού
7. SVG είναι ο ειδικός όγκος του ατμού
8. JR είναι ο δείκτης που πληροφορεί σε ποió σημείο του διαγράμματος PT βρίσκεται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου (βλέπε και τα σχετικά Διαγράμματα 4-1 και 4-2). Ο κανόνας προσδιορισμού του δείκτη JR είναι στην ουσία ο Πίνακας 4-1.
9. IS είναι ο δείκτης που πληροφορεί πόσο κοντά στην κατάσταση κορεσμού βρίσκονται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου (Πίνακας 5-3).
10. Άλλες μεταβλητές σύμφωνα με τον Πίνακα 5-1.

**Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα του κώδικα HEAVY\_WASP για τις ιδιότητες βαρέος υδραερίου υδρατμού.**

t (C)	P (kPa)	Volume, m <sup>3</sup> /kg	Enthalpy, kJ/kg	Energy, kJ/kg	Entropy, kJ/kgK							
275	.4990	.4484	.4070	2797.8	2796.4	2795.0	2573.3	2572.2	2571.2	6.8816	6.8360	6.7945
280	.5038	.4527	.4110	2807.7	2806.3	2805.0	2581.0	2580.0	2579.0	6.8995	6.8540	6.8126
285	.5086	.4570	.4149	2817.5	2816.2	2814.9	2588.7	2587.7	2586.8	6.9173	6.8718	6.8305
290	.5133	.4614	.4189	2827.4	2826.2	2824.9	2596.4	2595.5	2594.5	6.9349	6.8895	6.8483
295	.5181	.4657	.4228	2837.3	2836.1	2834.9	2604.1	2603.2	2602.3	6.9524	6.9070	6.8659
300	.5229	.4700	.4267	2847.2	2846.0	2844.8	2611.9	2611.0	2610.1	6.9697	6.9244	6.8833
305	.5276	.4743	.4306	2857.1	2855.9	2854.8	2619.6	2618.8	2617.9	6.9869	6.9417	6.9006
310	.5324	.4786	.4346	2867.0	2865.9	2864.7	2627.4	2626.6	2625.7	7.0039	6.9588	6.9178
315	.5372	.4829	.4385	2876.9	2875.8	2874.7	2635.2	2634.4	2633.6	7.0208	6.9757	6.9348
320	.5419	.4872	.4424	2886.8	2885.7	2884.7	2642.9	2642.2	2641.4	7.0376	6.9926	6.9517
325	.5466	.4914	.4463	2896.7	2895.7	2894.7	2650.7	2650.0	2649.2	7.0543	7.0093	6.9685
330	.5514	.4957	.4502	2906.7	2905.7	2904.7	2658.5	2657.8	2657.1	7.0709	7.0259	6.9851
335	.5561	.5000	.4541	2916.6	2915.6	2914.7	2666.4	2665.6	2664.9	7.0873	7.0424	7.0016
340	.5608	.5043	.4580	2926.6	2925.6	2924.7	2674.2	2673.5	2672.8	7.1036	7.0587	7.0180

345	.5656	.5085	.4619	2936.5	2935.6	2934.7	2682.0	2681.4	2680.7	7.1198	7.0750	7.0343	345
350	.5703	.5128	.4657	2946.5	2945.6	2944.8	2689.9	2689.3	2688.6	7.1359	7.0911	7.0505	350
355	.5750	.5170	.4696	2956.5	2955.7	2954.8	2697.8	2697.1	2696.5	7.1519	7.1071	7.0665	355
360	.5797	.5213	.4735	2966.5	2965.7	2964.9	2705.7	2705.1	2704.4	7.1678	7.1230	7.0825	360
365	.5844	.5255	.4774	2976.6	2975.8	2974.9	2713.6	2713.0	2712.4	7.1835	7.1388	7.0983	365
370	.5891	.5298	.4812	2986.6	2985.8	2985.0	2721.5	2720.9	2720.3	7.1992	7.1546	7.1141	370
375	.5938	.5340	.4851	2996.7	2995.9	2995.1	2729.5	2728.9	2728.3	7.2148	7.1702	7.1297	375
380	.5985	.5383	.4890	3006.8	3006.0	3005.2	2737.4	2736.9	2736.3	7.2303	7.1857	7.1452	380
385	.6032	.5425	.4928	3016.8	3016.1	3015.3	2745.4	2744.8	2744.3	7.2457	7.2011	7.1607	385
390	.6079	.5467	.4967	3026.9	3026.2	3025.5	2753.4	2752.8	2752.3	7.2610	7.2164	7.1760	390
395	.6126	.5510	.5005	3037.1	3036.4	3035.6	2761.4	2760.9	2760.3	7.2762	7.2316	7.1913	395



**Πίνακας 5-7: Σύμβολα, ονοματολογία και μονάδες δευτερευόντων**

**μεταβλητών (αλφαβητικά).**

A	ταχύτητα του ήχου σε m/sec (υπορουτίνες SHR_SOVE και TOTAL)
CP	ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση σε kJ/(kgK) (υπορουτίνες SHP και TOTAL)
CV	ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σε kJ/(kgK) (υπορουτίνες SHV και TOTAL)
DF	πυκνότητα του υγρού σε g/cm <sup>3</sup> (D ≡ Density, F ≡ Fluid) (υπορουτίνες DENSF και HEAVY_WASP)
DF	παράγωγος της συνάρτησης F (υπορουτίνα SOLVE)
DG	πυκνότητα του αερίου σε g/cm <sup>3</sup> (D ≡ Density, G ≡ Gas) (υπορουτίνες DENSF και HEAVY_WASP)
DL	πυκνότητα του υγρού σε g/cm <sup>3</sup> (L - Liquid) (υπορουτίνες SVLWL και DENSF)
DV	πυκνότητα του αερίου σε g/cm <sup>3</sup> (V - Vapor) (υπορουτίνες SVLWV και DENSF)
EPS	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (παίρνει τιμές στις υπορουτίνες SVLWL, SVLWV, DENSF, DENSF και CHECKPT)
GAMMA	λόγος ειδικών θερμοχωρητικοτήτων (υπορουτίνες SHR_SOVE και TOTAL)
H	ενθαλπία σε kJ/kg (υπορουτίνες ENTHALPY και TOTAL)
HDT	$(\partial h/\partial p)_t$
HTD	$(\partial h/\partial T)_p$
Q	(υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE και SHP) ποσότητα που δίνεται από τη σχέση (3-4) (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP, ENTROPY, ENTHALPY, ENERGY, FP, DFPD και QMUST)

QDT	$(\partial Q/\partial p)_t$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP, ENTHALPY, FP, DFPD και QMUST)
QTD	$(\partial Q/\partial t)_p$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP, ENTROPY, ENTHALPY, ENERGY και QMUST)
Q2DT	$\partial^2 Q/(\partial p \partial t)$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP και QMUST)
Q2D2T	$(\partial^2 Q/\partial^2 p)_t$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHP, DFPD και QMUST)
Q2T2D	$(\partial^2 Q/\partial^2 \tau)_p$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHV και QMUST)
IBM	ισοθερμοκρασιακή συμπιεστικότητα σε $\text{MPa}^{-1}$ (υπορουτίνες IBM_JTC και TOTAL)
IER	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (βλέπε και τις υπορουτίνες SVLWL, SVLWV, DENSF, DENSJ και CHECKPT)
ITMAX	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (βλέπε και τις υπορουτίνες SVLWL, SVLWV, DENSF, DENSJ και CHECKPT)
JTC	Συντελεστής Joule - Thomson σε $\text{K/MPa}$ (υπορουτίνες IBM_JTC και TOTAL)
K	Θερμική Αγωγιμότητα σε $\text{W/(mK)}$ (υπορουτίνες CONDUCTIVE και TOTAL)
MU	Δυναμική Συνεκτικότητα σε $\text{kg/(ms)}$
NDEC	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (παίρνει τιμές στις υπορουτίνες SVLWL, SVLWV, DENSF, DENSJ και CHECKPT)
PRANDTL	αριθμός Prandtl
PC	κρίσιμη πίεση σε bar
PMAX	(blockdata CONSTANTS και υπορουτίνες DFPS, FPS και CHECKPT) το άνω όριο της πίεσης λειτουργίας του κώδικα σε bar (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)

PMIN	το κάτω όριο της πίεσης λειτουργίας του κώδικα σε bar (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)
PDT	$(\partial P/\partial p)_T$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE και SHP)
PP	πίεση σε bar (υπορουτίνες CHECKPT και HEAVY_WASP και functions FP, FPS και FTS)
PR	αηγημένη πίεση (υπορουτίνες SVLWL, SVLWV, CHECKPT και HEAVY_WASP και function FPR3)
PRTRDR	$(\partial P_r/\partial T_r)_{pr}$ (υπορουτίνα CONDUCTIVE)
PSI	ελεύθερη εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg (υπορουτίνες ENERGY και TOTAL)
PSI0	ελεύθερη εσωτερική ενέργεια αναφοράς σε kJ/kg (υπορουτίνες ENERGY και ENTHALPY)
PSI0T	$d\psi_0/dT$ (υπορουτίνες ENTROPY, ENTHALPY, ENERGY και QMUST)
PSI02T2	$d^2\psi_0/d^2T$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE, SHV, SHP και QMUST)
PTD	$(\partial P/\partial T)_p$ (υπορουτίνες IBM_JTC, SHR_SOVE και SHP)
S	εντροπία σε kJ/(kgK) (υπορουτίνες ENTROPY και TOTAL)
SIGMA	επιφανειακή τάση σε N/m (υπορουτίνες TENSION και TOTAL)
TC	κρίσιμη θερμοκρασία σε K (blockdata CONSTANTS, υπορουτίνες CHECKPT και HEAVY_WASP και functions PRS, FPS και DFPS)
TMAX	το άνω θερμοκρασιακό όριο λειτουργίας του κώδικα σε K (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)
TMIN	το κάτω θερμοκρασιακό όριο λειτουργίας του κώδικα σε K (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)

TR	<p>ανηγγιμένη θερμοκρασία  (υπορουτίνες SVLWL, SVLWV, CHECKPT και HEAVY_WASP και  functions FPR4, DFPR4, FPR3, DFPR3, PRL και PRS)  θερμοκρασία σε K  (υπορουτίνες VISCOSITY, IBM_JTC, SHR_SOVE, SHV, SHP,  ENTROPY, ENTHALPY, ENERGY και QMUST)  εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg  (υπορουτίνες ENERGY και TOTAL)</p>
U	κρίσιμος ειδικός όγκος (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνες SVLWL και SVLWV)
VC	
XTR	$\rho_r (\partial \rho_r / \partial P_r)_T$ (υπορουτίνες VISCOSITY και CONDUCTIVE)
X1	ανηγγιμένος ειδικός όγκος στις υλοπεριοχές 1 και 6 (υπορουτίνια SVLWL)
X2	ανηγγιμένος ειδικός όγκος στις υλοπεριοχές 2 και 6 (υπορουτίνια SVLWV)
X3	ανηγγιμένος ειδικός όγκος στις υλοπεριοχές 3 και 5 (υπορουτίνες FPR3, DFPR3 και SVLWV)
X4	ανηγγιμένος ειδικός όγκος στις υλοπεριοχές 4 και 5 (υπορουτίνες FPR4, DFPR4 και SVLWL)



**Πίνακας 5-8: Μετρίως Εξηρημένα Υποπρογράμματα  
(αλφαβητικά)**

<u>Subroutines</u>	<u>Functions</u>
CHECKPT	DFPD
CONDUCTIVE	DFPR3
DENSF	DFPR4
DENSG	DFPS
ENERGY	FP
ENTHALPY	FPR3
ENTROPY	FPR4
HEAVY_WASP	FPS
IBM_JTC	FTS
SHP	PRL
SHR_SOVE	
SHV	
SVLWL	
SVLWV	
TENSION	
TOTAL	
VISCOSITY	

**Πίνακας 5-9: Προαιρετικά υποπρογράμματα**

ΟΝΟΜΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΝΤΟΛΩΝ (~)	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ
CONDUCTIVE	50	Τροποποίηση της TOTAL.
ENERGY	15	"
ENTHALPY	15	"
ENTROPY	15	"
IBM_JTC	35	"
SHP	35	"
SHR_SOVE	40	"
SHV	15	"
TENSION	20	"
VISCOSITY	40	"
και βέβαια		
TOTAL	70	Αφαίρεση όλων των προηγουμένων υποπρογραμμάτων. Τροποποίηση της HEAVY_WASP.

## 6. ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΝΑΤΡΙΟΥ

### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

6.	ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΝΑΤΡΙΟΥ .....	6-1
6.1	Εισαγωγή.....	6-1
6.2	Η σημασία της γνώσης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου.....	6-2
6.3	Το πρόβλημα του αριθμητικού υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου.....	6-5
6.3.1	Οι απόλυτα απαραίτητες σχέσεις.....	6-6
6.3.2	Άλλες δευτερεύουσες αλλά αναγκαίες σχέσεις ή/και αριθμητικές μέθοδοι.....	6-7
6.3.2.1	Παραγωγή για τον όρο (I) της σχέσης (3-85).	6-9
6.3.2.2	Ολοκλήρωση για τον όρο (II) της σχέσης (3-83).	6-11
6.4	Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες.....	6-11
6.5	Ο αριθμητικός κώδικας SODIUM_LISP.....	6-12
6.5.1	Γενικά χαρακτηριστικά του κώδικα.....	6-13
6.5.2	Οδηγίες χρήσεως του κώδικα.....	6-15
6.5.3	Αντιμετώπιση λαθών (troubleshooting).....	6-17
6.6	Τα υποπρογράμματα του κώδικα.....	6-18
6.6.1	Υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου.....	6-19
6.6.1.1	Υπορουτίνα SODIUM_LISP(JS,JP,P,T,TS,JR,IS).	6-19
6.6.1.2	Υπορουτίνα CHECKPT(TS,JR,IS).	6-19
6.6.1.3	Συνάρτηση FFPS(TS).	6-20
6.6.2	Υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού.....	6-20
6.6.2.1	Συνάρτηση FTS(PP).	6-20
6.6.2.2	Συνάρτηση DFPS(TS).	6-20
6.6.3	Υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου.....	6-20
6.6.3.1	Συνάρτηση FDENSF(DF).	6-21
6.6.3.2	Συνάρτηση FDENSG(DG).	6-21
6.6.4	Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.....	6-21
6.6.4.1	Υπορουτίνα TOTAL(JP,HF,UF,CPF, CVF,SF,IBMF,AF,KF,MF,HG, UG,CPG,CVG,SG,IBMG,AG,KG,MG,SIGMAFG).	6-21
6.6.4.2	Υπορουτίνα ENTHALPYF(HF,UF).	6-21

6.6.4.3	Υπορουτίνα ENTHALPYG(HG,UG).	6-22
6.6.4.4	Υπορουτίνα ENTROPYF(SF).	6-22
6.6.4.5	Υπορουτίνα ENTROPYG(SG).	6-22
6.6.4.6	Υπορουτίνα SHF(CPF,CVF).	6-22
6.6.4.7	Υπορουτίνα SHG(CPG,CVG).	6-23
6.6.4.8	Υπορουτίνα SOVEF(AF).	6-23
6.6.4.9	Υπορουτίνες SIBMF(IBMFB) και SIBMG(IBMGB).	6-24
6.6.5	Υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς.....	6-24
6.6.5.1	Υπορουτίνα VISCOSITYF(MF).	6-25
6.6.5.2	Υπορουτίνα CONDUCTIVEF(KF).	6-25
6.6.5.3	Υπορουτίνα TENSION(SIGMAFG).	6-25
6.6.6	Υποπρογράμματα μαθηματικών υπολογισμών.....	6-25
6.6.7	Άλλα επικουρικά υποπρογράμματα.....	6-25
6.6.7.1	Υποπρόγραμμα δεδομένων CONSTANTS.	6-25
6.6.7.2	Κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE και συγκριτικά αποτελέσματα.	6-26
6.7	Λειτουργία του κώδικα SODIUM_LISP.....	6-26
6.8	Μορφολογικά χαρακτηριστικά των υποπρογραμμάτων του κώδικα.....	6-31
6.8.1	Βαθμός αλληλεξάρτησης των υποπρογραμμάτων.....	6-31
6.8.2	Ανεξάρτητα υποπρογράμματα.....	6-33
6.8.3	Μετρίως εξηρητημένα υποπρογράμματα.....	6-34
6.8.4	Πλήρως εξηρητημένα υποπρογράμματα.....	6-35
6.9	Η δομική ευελιξία του κώδικα.....	6-35

# ΚΩΔΙΚΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΝΑΤΡΙΟΥ

### 6.1 Εισαγωγή.

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά ο κώδικας ηλεκτρονικού υπολογιστή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του νατρίου (Na). Στα πλαίσια του αναπτυχθέντος κώδικα οι θερμοφυσικές ιδιότητες του νατρίου υπολογίζονται –όπως και για τις περιπτώσεις του ελαφρού ύδατος και του βαρέος ύδατος– για δεδομένη πίεση P και θερμοκρασία T, πράγμα που ειδικά εξυπηρετεί σε προβλήματα Θερμυδραυλικής Ανάλυσης Πυρηνικών Αντδραστήρων Ισχύος που ψύχονται με τετηγμένα άλατα. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες (κυρίως πυκνότητα, ενθαλπία, ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και υπό σταθερό όγκο) στις καταστάσεις κορεσμένου υγρού και ατμού και για τις ιδιότητες μεταφοράς (θερμική αγωγιμότητα, δυναμική συνεκτικότητα και επιφανειακή τάση) στην υγρή φάση. Αρχικά αναφέρονται συνοπτικά οι σχέσεις εκείνες που θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες, και ακριβείς για τη σύνταξη του κώδικα, και οι οποίες παρουσιάστηκαν ήδη στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Στη συνέχεια διατυπώνεται η κοινή περιοχή ισχύος όλων των χρησιμοποιούμενων σχέσεων. Κατ' ακολουθία, αυτή θεωρείται και η περιοχή ισχύος του κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Na. Τέλος, όπως ακριβώς συμβαίνει και για τους αντίστοιχους κώδικες του ε.υ. και του β.υ. οι οποίοι παρουσιάστηκαν στο 4<sup>ο</sup> και στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αντίστοιχα, αφιερώνονται ειδικές παράγραφοι στην διεξοδική και λεπτομερή περιγραφή του κώδικα.

Ο κώδικας συντάχθηκε σε γλώσσα FORTRAN 77, κάτω από το Λειτουργικό Σύστημα UNIX HP-UX 7.05 B, το οποίο υποστηρίζεται από τον super-mini H/Y του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας HP 9000/380. Για τη συγκρότηση του κώδικα ακολουθήθηκαν αρχές δομημένου προγραμματισμού, προκειμένου να εξασφαλίζεται α) ευκολία στη χρήση,

β) ευκολία στην τροποποίηση και στην άρση τυχόν λαθών

γ) ευκολία στη μετατροπή του κώδικα προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί για άλλη έκδοση της γλώσσας FORTRAN ή/και για άλλο λειτουργικό σύστημα ή/και σε άλλου τύπου ηλεκτρονικό υπολογιστή, και τέλος

δ) συμβατότητα –κατά το δυνατόν– στον τρόπο ανάπτυξης και στον τρόπο λειτουργίας με τους αντίστοιχους κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος και του βαρέος ύδατος, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάστηκαν στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο και το 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αντίστοιχα. Μία τέτοια συμβατότητα στον τρόπο ανάπτυξης και λειτουργίας των τριών αυτών κωδίκων κρίθηκε αναγκαία στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ, προκειμένου ο χρήστης των κωδίκων να έχει τη δυνατότητα να παρακολουθήσει το πώς αναπτύχθηκαν και λειτουργούν στη βάση της ίδιας κοινής προγραμματιστικής λογικής. Σημειώνεται ότι αντίστοιχοι εμπειρικοί κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Na δεν είναι σήμερα διαθέσιμοι στην αγορά.

Όλα τα υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Na παρατίθενται στο Παράρτημα III της Διδακτορικής Διατριβής.

## **6.2 Η σημασία της γνώσης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου.**

Από τα μέσα του περασμένου αιώνα μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί τρεις γενεές Πυρηνικών Αντιδραστήρων. Η πρώτη γενεά, από το 1950 έως και περίπου το 1965 περιλαμβάνει τους πειραματικούς ΠΑΙ, καθώς και τους πρώτους εμπειρικά εκμεταλλεύσιμοι τύπους με πιο γνωστό τον αερίψυκτο αντιδραστήρα MAGNOX.

Η δεύτερη γενεά από το 1965 έως και περίπου το 1995 περιλαμβάνει όλους τους εν λειτουργία σήμερα (2002) εμπειρικά εκμεταλλεύσιμους τύπους των ΠΑΙ. Οι πλέον γνωστοί είναι:

- Οι αντιδραστήρες ζέοντος ή πεπιεσμένου ελαφρού ύδατος με τους χαρακτηριστικούς συμβολισμούς τύπων LWR (Light Water Reactor), BWR (Boiling Water Reactor) και PWR (Pressurized Water Reactor), που χρησιμοποιούνται κυρίως στη Δυτική Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες.

- Οι αντιδραστήρες ζέοντος ή πεπιεσμένου ελαφρού ύδατος με τους χαρακτηριστικούς συμβολισμούς τύπων RBMK και VVER, που χρησιμοποιούνται κυρίως στην πρώην Ανατολική Ευρώπη και τις πρώην Σοβιετικές Δημοκρατίες
- Οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου βαρέος ύδατος με τον χαρακτηριστικό συμβολισμό τύπου CANDU (CANada Deuterium Uranium), που χρησιμοποιούνται κυρίως στον Καναδά, την Ίαϊβάν, τη Νότιο Κορέα και τη Ρουμανία.

Στη δεύτερη γενεά αντιδραστήρων περιλαμβάνονται και αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο τα τετηγμένα άλατα των μετάλλων Na και K, ή και κράματα τέτοιων τετηγμένων αλάτων, ή και τα ίδια αυτά τα μέταλλα Na και K και τα κράματά τους. Τέτοιοι αντιδραστήρες βρίσκονται υπό εμπορική εκμετάλλευση κυρίως στη Γαλλία.

Η τρίτη γενεά αντιδραστήρων, της οποίας ο κύκλος ξεκίνησε το 1995 και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2020, περιλαμβάνει στην ουσία τεχνολογικές βελτιώσεις των τύπων της δεύτερης γενεάς, σε επίπεδο υλικών, και σχεδιασμού με στόχο την αύξηση της ασφάλειας και την διευκόλυνση της συντήρησης.

Το έτος 2000 ξεκίνησε η συζήτηση στην επιστημονική και την οικονομική κοινότητα για τους λεγόμενους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος Τέταρτης Γενεάς (Generation IV). Η συζήτηση αυτή ενθαρρύνθηκε πρώτα στις Η.Π.Α. Πολύ σύντομα όμως δημιουργήθηκε το λεγόμενο Διεθνές Forum της Τέταρτης Γενεάς (GIF - Generation-IV International Forum). Στόχος του Forum είναι

*"... η ανάπτυξη και η επίδειξη ενός ή περισσοτέρων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πυρηνικό τρόπο, τα οποία να πλεονεκτούν σαφώς από τα υπάρχοντα στην ασφάλεια και την αξιοπιστία, στη διάρκεια ζωής, στην οικονομικά συμφέρουσα παραγωγή ενέργειας,ι στην ικανοποιητική συμβολή τους στη μη διάδοση των σχάσιμων υλικών για την κατασκευή πυρηνικών όπλων και τέλος στην ελαχιστοποίηση της παραγωγής πυρηνικών αποβλήτων....".*

Ο χρονικός ορίζοντας της σχετικής έρευνας και της παρουσίασης ενός εμπορικά εκμεταλλεύσιμου αποτελέσματος προσδιορίζεται το 2030.

Οι χώρες που συμμετέχουν στο GIF είναι εκτός των ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γαλλία, ο Καναδάς, η Αργεντινή, η Νότια Κορέα, η Νότια Αφρική, η Ελβετία και η Βραζιλία. Οι χώρες αυτές, το 2001, θεώρησαν σκόπιμο να ζητήσουν και από την Υπηρεσία Πυρηνικής Ενέργειας (NEA – Nuclear Energy Agency) του ΟΟΣΑ (Οργανισμός για την Οικονομική Συνεργασία και Ανάπτυξη) να συμμετέχει στο Forum, πράγμα που έγινε δεκτό. Το Διάγραμμα 6-1 περιέχει σχετική παρουσίαση από την 105<sup>η</sup> Συνεδρίαση της Συντονιστικής Ομάδας της NEA του ΟΟΣΑ, τον Οκτώβριο του 2002.

Το Forum έχει επιλέξει να εξετάσει την ανάπτυξη των ακόλουθων 6 τύπων Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος στα πλαίσια του ποπάνω αναφερόμενου στόχου:

- Αερίψυκτος, Ταχέων Νετρονίων
- Υπερψηλής θερμοκρασίας, Θερμικών Νετρονίων
- Υπερκρίσιμου ύδατος, Θερμικών και Ταχέων Νετρονίων
- Ψυχόμενος με Νάτριο, Ταχέων Νετρονίων
- Ψυχόμενος με Μόλυβδο, Ταχέων Νετρονίων
- Ψυχόμενος με τεττημένα άλατα, Θερμικών Νετρονίων

Από τους ποπάνω προτεινόμενους αντιδραστήρες ο τύπος "Ψυχόμενος με Νάτριο, Ταχέων Νετρονίων", ικανοποιεί σημαντικό μέρος –αν όχι και το όλον– του αναφερόμενου στόχου. Ειδικότερα, σε σχέση με την μείωση των αποβλήτων και τη μη διάδοση σχασίμων υλικών για την κατασκευή πυρηνικών όπλων, ο υπόψιν αντιδραστήρας μπορεί να χρησιμοποιεί ως καύσιμο, απόβλητα αντιδραστήρων δεύτερης και τρίτης γενεάς, απεμπλουτισμένο ουράνιο και επεξεργασμένες πυρηνικές γομώσεις αποσυρθέντων πυρηνικών όπλων. Επιπλέον σε σχέση με την ασφάλεια, τέτοιοι αντιδραστήρες, σε θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού 550 οC, η αναπτυσσόμενη πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα είναι κοντά στην ατμοσφαιρική.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται κατανοητή η σημασία της καλής γνώσης των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου και η απόδοσή τους από κώδικες υπολογισμών για τη διευκόλυνση του σχεδιασμού και της χρησιμοποίησης της υπόψιν τεχνολογίας.



### 6.3 Το πρόβλημα του αριθμητικού υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου.

Με βάση τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύχθηκε, στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής, κώδικας για τον αριθμητικό υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου. Ο κώδικας ονομάστηκε **SODIUM\_LISP (SODIUM Liquid and Steam Properties)** και κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετεί τους πολύπλοκους υπολογισμούς που αφορούν στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία των υπερσύγχρονων Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος, οι οποίοι εργάζονται με τετηγμένα άλατα, εν προκειμένω το Na.

Ο κώδικας αυτός δέχεται ως είσοδο μόνο την πίεση σε bar ή μόνο την θερμοκρασία σε μονάδες K. Αυτό γίνεται διότι ο κώδικας –με βάση τις συσχετίσεις για τις ιδιότητες τις οποίες χρησιμοποιεί και υλοποιεί– έχει κατασκευασθεί ώστε να πραγματοποιεί υπολογισμούς μόνο για καταστάσεις κορεσμού υπό τις οποίες λειτουργούν οι υπόψιν ΠΑΙ· και όπως είναι γνωστό, για τον προσδιορισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων σε μία κατάσταση κορεσμού αρκεί να δίνεται μόνο η αντίστοιχη πίεση ή η αντίστοιχη θερμοκρασία. Το γεγονός ότι οι εξισώσεις για τις ιδιότητες μεταφοράς [σχέσεις (3-100), (3-101) και (3-102)] ισχύουν όχι μόνο για την κορεσμένη υγρή φάση αλλά για το σύνολο της υγρής φάσης δεν δημιουργεί πρόβλημα διότι:

- (α) οι ιδιότητες μεταφοράς για την υγρή φάση φαίνεται να είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας και μόνο (ασυμπίεστο ρευστό) και
- (β) η περιοχή θερμοκρασιών ισχύος των σχέσεων (3-100), (3-101) και (3-102) ταυτίζεται με το εύρος των θερμοκρασιών κορεσμού, δηλ. από το σημείο τήξεως  $T_m = 371 \text{ K}$  έως το κρίσιμο σημείο  $T_c = T^* = 2503.7 \text{ K}$ .

Τα αποτελέσματα που παρέχει ο κώδικας είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν ένα μέρος ή και το σύνολο των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων μεταφοράς του Na ανάλογα με τις ανάγκες και τις επιλογές του χρήστη.

Δύο είναι τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζονται προκειμένου για την υλοποίηση των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Na στον κώδικα **SODIUM\_LISP**.

1. Οι συσχετίσεις και γενικά οι εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες, που παρουσιάστηκαν στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, δεν είναι αρκετές για να συγκροτήσουν τον κώδικα που ζητείται. Αυτό συμβαίνει διότι οι σχέσεις αυτές περιλαμβάνουν και όρους παραγώγων και ολοκληρωμάτων των οποίων η αναλυτική μορφή είναι άγνωστη και ως εκ τούτου πρέπει να υπολογισθεί. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό οι άγνωστες παράγωγοι και τα ολοκληρώματα πρέπει να προσεγγισθούν με αριθμητικό τρόπο.
2. Πρέπει να διατυπωθεί η κοινή περιοχή ισχύος πιέσεων και θερμοκρασιών, όλων των εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Na, η οποία κατ' ακολουθία είναι η περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών για την οποία ισχύει ο κώδικας.

### **6.3.1 Οι απόλυτα απαραίτητες σχέσεις.**

Στην παρουσίαση που έγινε στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο επισημάνθηκαν οι καταλληλότερες σχέσεις και συσχετίσεις που επελέγησαν να χρησιμοποιηθούν στο υπολογιστικό μέρος αυτής της Διδακτορικής Διατριβής σε ό,τι αφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου. Οι σχέσεις αυτές ορίζονται ως οι **απόλυτα απαραίτητες σχέσεις** για την κατασκευή του κώδικα, και εννοείται ότι χωρίς αυτές δεν μπορεί να γίνει δυνατή η ανάπτυξή του. Συγκεκριμένα, στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν σχέσεις για τις ακόλουθες θερμοφυσικές ιδιότητες (§ 3.5.1 – αριθμημένες σχέσεις):

- πίεση κορεσμού  $P_s = P_s(T_s)$  σε MPa (συνάρτηση της θερμοκρασίας κορεσμού)
- θερμοκρασία κορεσμού  $T_s = T_s(P_s)$  σε K (συνάρτηση της πίεσης κορεσμού)
- πυκνότητα κορεσμένου υγρού  $\rho_{is}$  σε  $\text{kgm}^{-3}$
- ισόθλιπτη διαστολικότητα κορεσμένου υγρού  $\alpha_{is}$  σε  $\text{K}^{-1}$
- ισοθερμοκρασιακή συμπίεσιότητα κορεσμένου υγρού  $k_{Tis}$  σε  $\text{MPa}^{-1}$
- συντελεστής θερμικής διαστολής κορεσμένου υγρού  $\alpha_{pis}$  σε  $\text{K}^{-1}$
- ειδική ενθαλπία κορεσμένου υγρού  $h_{is}$  σε  $\text{kJ/kg}$
- ειδική θερμοχωρητικότητα κορεσμένου υγρού  $c_{is}$  σε  $\text{kJ}/(\text{kgK})$
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση κορεσμένου υγρού  $c_{pis}$  σε  $\text{kJ}/(\text{kgK})$
- ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο κορεσμένου υγρού  $c_{vis}$  σε  $\text{kJ}/(\text{kgK})$
- ταχύτητα του ήχου στο κορεσμένο υγρό  $a_{is}$  σε  $\text{ms}^{-1}$
- εντροπία κορεσμένου υγρού  $s_{is}$  σε  $\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
- πυκνότητα κορεσμένου ατμού  $\rho_{gs}$  σε  $\text{kgm}^{-3}$
- ισόθλιπτη διαστολικότητα κορεσμένου ατμού  $\alpha_{gs}$  σε  $\text{K}^{-1}$

- ισοθερμοκρασιακή συμπίεστότητα κορεσμένου υγρού  $k_{Tis}$  σε  $\text{MPa}^{-1}$
- συντελεστής θερμικής διαστολής κορεσμένου ατμού  $\alpha_{pgs}$  σε  $\text{K}^{-1}$ 
  - ειδική ενθαλπία κορεσμένου ατμού  $h_{gs}$  σε  $\text{kJ/kg}$
  - ειδική θερμοχωρητικότητα κορεσμένου ατμού  $c_{gs}$  σε  $\text{kJ/(kgK)}$
  - ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση κορεσμένου ατμού  $c_{pgs}$  σε  $\text{kJ/(kgK)}$
- εντροπία κορεσμένου ατμού  $s_{gs}$  σε  $\text{kJ/(kgK)}$
- δυναμική συνεκτικότητα  $\eta$  σε  $\text{Pas}$
- θερμική αγωγιμότητα  $\lambda$  σε  $\text{W/(mK)}$
- επιφανειακή τάση  $\sigma$  σε  $\text{N/m}$

### 6.3.2 ΑΛΛΕΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΑΛΛΑ ΑΝΑΓΚΑΙΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ Ή/ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.

Οι απόλυτα απαραίτητες σχέσεις περιλαμβάνουν και όρους παραγώγων και ολοκληρωμάτων για τους οποίους πρέπει να βρεθεί τρόπος υπολογισμού. Το σύνολο αυτών των άγνωστων όρων οι οποίοι είναι αναγκαίοι στους υπολογισμούς έχουν ως εξής:

$$(I) \quad d\rho_{gs}/dT \quad [στη \text{σχέση (3-85)}]$$

και

$$(II) \quad \int_{T_m}^T (c_{is}/T)dT \quad [στη \text{σχέση (3-83)}]$$

Για τον υπολογισμό των αγνώστων αυτών όρων (I) και (II) μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε αριθμητικές μέθοδοι, είτε να καταβληθεί προσπάθεια ώστε να διατυπωθούν κλειστές μορφές εξισώσεων με βάση τις εξισώσεις για τις ποσότητες  $\rho_{gs}$  [σχέση (3-84)] και  $c_{is}$  [σχέσεις (3-76) και (3-77)]. Όπως ήδη έχει σχολιασθεί για την περίπτωση του υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ε.υ. και του β.υ., η χρήση αριθμητικών μεθόδων προϋποθέτει κόστος προγραμματιστικής προσπάθειας και χρόνου ηλεκτρονικού υπολογιστή, πράγμα που δεν εξυπηρετεί την ταχύτητα των υπολογισμών. Από την άλλη πλευρά οι κλειστές μορφές εξισώσεων για τον υπολογισμό αυτών των παραγώγων και των ολοκληρωμάτων συνεπάγονται

πολύπλοκες διατυπώσεις δεδομένου του συνθέτου των εξισώσεων (3-84) και (3-76), (3-77). Προκειμένου να ληφθεί απόφαση ως προς το αν πρέπει να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι ή κλειστές λύσεις εξετάστηκαν οι μαθηματικές μορφές των εξισώσεων (3-84) και (3-76), (3-77) και διαπιστώθηκε ότι:

#### **Για την εξίσωση (3-84):**

Η υπό εξέταση συσχέτιση υπολογίζει την πυκνότητα του κορεσμένου ατμού  $\rho_{gs}$  του Na. Η πυκνότητα αυτή υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, της πυκνότητας του κορεσμένου υγρού  $\rho_{ls}$  του Na [σχέση (3-66)] και της παραγώγου  $\gamma_s$  της πίεσης κορεσμού ως προς τη θερμοκρασία T [σχέση (3-63)].

#### **Για την εξίσωση (3-76):**

Η υπό εξέταση συσχέτιση υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα του κορεσμένου υγρού  $c_{is}$  του Na στην περιοχή θερμοκρασιών 371 – 2000 K. Η ειδική αυτή θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του κορεσμένου υγρού  $\rho_{is}$  του Na [σχέση (3-66)].

#### **Για την εξίσωση (3-77):**

Η υπό εξέταση συσχέτιση υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα του κορεσμένου υγρού  $c_{is}$  του Na στην περιοχή θερμοκρασιών 2000 – 2503.7 K. Η ειδική αυτή θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του κορεσμένου υγρού  $\rho_{is}$  του Na [σχέση (3-66)].

Με δεδομένα:

- (α) την πολυπλοκότητα των σχέσεων (3-84) και (3-76), (3-77),
- (β) την εμπλοκή στους υπολογισμούς και άλλων σχέσεων, δηλ. των (3-63) και (3-66) και
- (γ) της απλής δομής του συνόλου των σχέσεων, των οποίων επιχειρείται η υλοποίηση στον κώδικα SODIUM\_LISP

κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού για τα πιστά άγνωστη παράγωγο (I) και άγνωστο ολοκλήρωμα (II). Ειδικά λοιπόν για τις ανάγκες του κώδικα SODIUM\_LISP και σε αντίθεση με την τακτική που υιοθετήθηκε στους ήδη παρουσιασθέντες κώδικες LIGHT\_WASP και HEAVY\_WASP προτιμώνται αριθμητικές μέθοδοι έναντι κλειστών διατυπώσεων,

διότι εξασφαλίζουν το βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ ταχύτητας υπολογισμών και ανάγκης δημιουργίας κώδικα για την υλοποίηση κλειστών διατυπώσεων. Οι αριθμητικές αυτές μέθοδοι για τον υπολογισμό των όρων (I) και (II) ονομάστηκαν **δευτερεύουσες αλλά αναγκαίες αριθμητικές μέθοδοι**. Συνολικά οι μέθοδοι αυτές περιγράφονται στις υποπαραγράφους που ακολουθούν:

### 6.3.2.1 Παραγωγή για τον όρο (I) της σχέσης (3-85).

Για την παραγωγή χρησιμοποιείται η μέθοδος που προτείνεται από τον Ridders (1982), όπως αυτή παρουσιάζεται στο βιβλίο των Press W.H. et al. (1989). Επειδή η μέθοδος δεν συμπεριλαμβάνεται στα διδακτικά συγγράμματα αριθμητικής ανάλυσης, θα παρουσιασθούν εδώ τα βασικότερα σημεία της.

Είναι γνωστό ότι δεδομένης συναρτήσεως  $f(x)$ , η παράγωγός της  $f'(x)$  ως προς  $x$  ορίζεται ως το όριο της ποσότητας

$$f'(x) \equiv [f(x+h) - f(x)]/h \quad h \rightarrow 0 \quad (6-1)$$

ή καλύτερα της ποσότητας

$$f'(x) \equiv [f(x+h) - f(x-h)]/(2h) \quad h \rightarrow 0 \quad (6-2)$$

Για τη σχέση (6-1) από προγραμματιστικής απόψεως αυτό πρακτικά συνεπάγεται:

- (α) Να υπολογισθεί η τιμή  $f(x)$ ,
- (β) Να επιλεγεί μία τιμή για το  $h$  «αρκετά μικρή», και
- (γ) Να εφαρμοσθεί η σχέση (6-1).

Αντίστοιχα για τη σχέση (6-2):

- (α) Να επιλεγεί μία τιμή για το  $h$  «αρκετά μικρή»
- (β) Να υπολογισθεί η τιμή  $f(x+h)$ ,
- (γ) Να υπολογισθεί η τιμή  $f(x-h)$ , και
- (δ) Να εφαρμοσθεί η σχέση (6-2).

Φυσικά τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά. Σχέσεις όπως οι (6-1) και (6-2) πρέπει να χρησιμοποιούνται με περιορισμούς και προσοχή, όταν κλειστές μορφές της  $f'$  είναι δύσκολο να υπολογισθούν και προγραμματιστικά επίπονο να υλοποιηθούν, όταν

μάλιστα η εφαρμογή σχέσεων, όπως η (6-1), εξασφαλίζει τον υπολογισμό μιας παραγώγου με εύλογα λίγες πράξεις και επαναλήψεις - όπως ακριβώς στην περίπτωση που εξετάζεται στο σημείο αυτό, για τον κώδικα SODIUM\_LISP.

Το κλειδί για τη σωστή εφαρμογή είναι η ορθή επιλογή του μεγέθους της ποσότητας  $h$ , ώστε να αποφεύγονται σφάλματα **προσέγγισης** (truncation errors), π.χ. αυτά που προκύπτουν από τους όρους μεγάλου βαθμού ενός αναπτύγματος Taylor και σφάλματα **στρογγύλευσης** (round-off errors), δηλ. αυτά που οφείλονται στην εσωτερική ακρίβεια της παράστασης της ποσότητας  $h$  στον H/Y στον οποίο υλοποιείται η αριθμητική μέθοδος.

Ο Ridders (1982) προκειμένου να υπολογίσει αριθμητικά μία παράγωγο ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. εφαρμόζει τη σχέση (6-2) για μία “εύλογα μικρή” ποσότητα  $h_i$  και υπολογίζει την τιμή  $a(j,i)$  για τη ζητούμενη παράγωγο.
2. μειώνει την ποσότητα  $h_i$  σε  $h_{i+1} < h_i$
3. εφαρμόζει τη σχέση (6-2) για τη νέα ποσότητα  $h_{i+1}$  και υπολογίζει την επόμενη τιμή  $a(j,i+1)$  για τη ζητούμενη παράγωγο.
4. υπολογίζει με χρήση του αλγόριθμου Neville<sup>1</sup> μία προσέγγιση ανώτερης τάξης τόσο για την παράγωγο  $a(j,i)$ , όσο και για την παράγωγο  $a(j,i+1)$ , τις  $a(j+1,i)$  και  $a(j+1,i+1)$  αντίστοιχα.
5. υπολογίζει την απόλυτη τιμή της ποσότητας  $a(j,i)-a(j-1,i)$
6. υπολογίζει την απόλυτη τιμή της ποσότητας  $a(j,i)-a(j-1,i-1)$
7. υπολογίζει το μέγιστο των δύο διαφορών
8. ελέγχει αν είναι το μέγιστο αυτό μικρότερο από το προηγούμενο μέγιστο και αποφασίζει ανάλογα:

ΝΑΙ, η μέχρι στιγμής αποδεκτή τιμή της παραγώγου είναι η  $a(j,i)$  και η μέθοδος επανέρχεται στο πρώτο βήμα, για να υπολογίσει τη νέα πιθανώς καλύτερη τιμή δηλ. την  $a(j,i+1)$  για  $h_{i+1}$

ΟΧΙ, η μέχρι στιγμής αποδεκτή τιμή της παραγώγου παραμένει η  $a(j,i-1)$  και η μέθοδος επανέρχεται στο πρώτο βήμα, για να υπολογίσει τη νέα πιθανώς καλύτερη τιμή δηλ. την  $a(j,i+1)$  για  $h_{i+1}$

---

<sup>1</sup> Βλέπε και Press W.H. et al. (1989) σελ. 81, 84 και 114

Η όλη διαδικασία καταλήγει σε υπολογισμό της ζητούμενης παραγώγου με ικανοποιητική ακρίβεια μετά από συνήθως 6 έως 12 επαναλήψεις.

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου και στο Παράρτημα III παρουσιάζεται ο τρόπος που υλοποιείται η μέθοδος παραγωγισής Ridders στον κώδικα SODIUM\_LISP (συνάρτηση FUNCTION DFRIDR).

### **6.3.2.2 Ολοκλήρωση για τον όρο (II) της σχέσης (3-83).**

Για την ολοκλήρωση χρησιμοποιείται η γνωστή μέθοδος του τραπέζιου, όπως αυτή περιγράφεται π.χ. από τον Μπακόπουλο (1983). Στη συνέχεια του Κεφαλαίου και στο Παράρτημα III παρουσιάζεται ο τρόπος που υλοποιείται η μέθοδος του τραπέζιου στον κώδικα SODIUM\_LISP (υπορουτίνα SUBROUTINE INTEGRAL).

## **6.4 Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες.**

Αναφέρθηκε ήδη ότι οι καταλληλότερες σχέσεις και συσχετίσεις που επελέγησαν να χρησιμοποιηθούν στο υπολογιστικό μέρος αυτής της Δοκτορικής Διατριβής σε ό,τι αφορά στις θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου αναπτύχθηκαν από τους<sup>2</sup>:

- Fink J.K. και Leibowitz L., 1995  
(καταστατική εξίσωση, εξίσωση κορεσμού, θερμοδυναμικές ιδιότητες, επιφανειακή τάση)
- Cook J.G. και Fritsch G., 1985  
(θερμική αγωγιμότητα) και
- Shpil'tain E. et al., 1985  
(δυναμική συνεκτικότητα)

Στις σχετικές παραγράφους του 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, παρουσιάστηκαν επίσης οι αντίστοιχες περιοχές πιέσεων και θερμοκρασιών για τις οποίες ισχύουν οι χρησιμοποιούμενες συσχετίσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου.

Από τη μελέτη των σχετικών δεδομένων προκύπτει ότι:

---

<sup>2</sup> Βλέπε § 3.5.1

Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων συσχετίσεων σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου μπορεί να οριστεί ως η περιοχή θερμοκρασιών κορεσμού από το σημείο τήξεως  $T_m = 371 \text{ K}$  έως και το κρίσιμο σημείο  $T_c = T^* = 2503.7 \text{ K}$ . Σύμφωνα με την εξίσωση κορεσμού (3-62) η αντίστοιχη περιοχή πιέσεων κορεσμού είναι  $P_m \approx 1.6 \times 10^{-10} \text{ bar}$  ως  $P_c = P^* = 256.4 \text{ bar}$ .

Η κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες εξυπηρετεί σε θερμοδυναμικούς υπολογισμούς για την περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών στην οποία εργάζονται υπό κανονικές συνθήκες οι Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Ισχύος που ψύχονται με Νάτριο.

## 6.5 Ο αριθμητικός κώδικας SODIUM\_LISP.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται η αναλυτική παρουσίαση του αριθμητικού κώδικα με το όνομα SODIUM\_LISP (SODIUM Liquid and Steam Properties), ο οποίος κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσης  $\Delta\Delta$ , με σκοπό να εξυπηρετήσει υπολογισμούς για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του Νατρίου σε επίπεδο ακρίβειας κατάλληλο για βιομηχανική χρήση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για υπολογισμούς σε προβλήματα θερμοδυναμικής ανάλυσης Πυρηνικών Αντιδραστήρων Ισχύος. Ο κώδικας SODIUM\_LISP συντάχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Το σύνολο των αναγκαίων συσχετίσεων και των άλλων εξισώσεων που υλοποιούνται προγραμματιστικά παρουσιάστηκαν ήδη με λεπτομέρεια τόσο στο 3<sup>ο</sup> όσο και στο παρόν Κεφάλαιο. Η περιοχή ισχύος του κώδικα SODIUM\_LISP είναι αυτή που σημειώνεται στην προηγούμενη παράγραφο 6.4.

Ο κώδικας δέχεται ως είσοδο την πίεση κορεσμού ή την θερμοκρασία κορεσμού. Αν η είσοδος είναι η πίεση κορεσμού τότε η θερμοκρασία κορεσμού πρέπει να τεθεί ίση με το μηδέν. Αν η είσοδος είναι η θερμοκρασία κορεσμού τότε η πίεση κορεσμού πρέπει να τεθεί ίση με το μηδέν. Η έξοδος παρέχει τις τιμή του ειδικού όγκου του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού, της εσωτερικής ενέργειας του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού, της ενθαλπίας του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού, της εντροπίας του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού, των ειδικών θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση και υπό σταθερό όγκο του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού, της ταχύτητας του ήχου στο



κορεσμένο υγρό και στον κορεσμένο ατμό, της ισοθερμοκρασιακής συμπεριφοράς του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού, της συνεκτικότητας του κορεσμένου υγρού, της θερμικής αγωγιμότητας του κορεσμένου υγρού και της επιφανειακής τάσης.

Ακολουθεί μια διεξοδική παρουσίαση των γενικών χαρακτηριστικών του κώδικα και των αναγκαίων οδηγιών χρήσεως. Οι οδηγίες χρήσεως συμπληρώνονται από ορισμένες υποδείξεις σχετικά με τους τρόπους με τους οποίους ο χρήστης μπορεί να αντιμετωπίσει τα συνηθέστερα λάθη του. Όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα εξετάζονται στη συνέχεια κατά ομάδες ανάλογα και με τις λειτουργίες που αυτά διεκπεραιώνουν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του κώδικα, στην ουσία δηλαδή η ροή της εκτέλεσης ανάλογα και με τα ζητούμενα που καθορίζει ο χρήστης. Επιπλέον, συμπληρωματικά, εξετάζονται και ορισμένα άλλα μορφολογικά χαρακτηριστικά των υποπρογραμμάτων προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία τους. Τέλος, επεξηγείται η δομική ευελιξία (code modular design) του κώδικα. Η συνολική παρουσίαση συνοδεύεται από συγκεκριμένους πίνακες που χρησιμεύουν ως περιληπτική αναφορά στα κυριότερα σημεία του κώδικα. Τέτοιοι πίνακες συμβάλλουν όχι μόνο στην καλύτερη κατανόηση του κώδικα, αλλά και στην γρήγορη αναδρομή σε αυτούς όταν ζητείται κάποια λεπτομέρεια που ενδιαφέρει. Σημειώνεται ότι όλα τα επιμέρους υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα SODIUM\_LISP βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα ΙΙΙ.

### **6.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά του κώδικα.**

Ο κώδικας SODIUM\_LISP για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου είναι στην ουσία μια ομάδα υποπρογραμμάτων σχεδιασμένη για να χρησιμοποιείται ως υποπρόγραμμα στο πρόγραμμα του χρήστη. Τα υποπρογράμματα αυτά διακρίνονται σε:

- α) Υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου.
- β) Υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού.
- γ) Υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου.
- δ) Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.
- ε) Υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς.
- στ) Υποπρογράμματα γενικών μαθηματικών υπολογισμών.
- ζ) Λοιπά υποπρογράμματα επικοινωνίας φύσεως.

Τα υποπρογράμματα αυτά υλοποιήθηκαν προγραμματιστικά με τη μορφή **υπορουτινών** (FORTRAN subroutines) και **συναρτήσεων** (FORTRAN functions). Υπάρχει ακόμα ένα **υποπρόγραμμα δεδομένων** (FORTRAN blockdata). Σημειώνεται ότι όλα τα υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα SODIUM\_LISP βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα III.

Συνοπτικά η λειτουργία του κώδικα μπορεί να περιγραφεί με τα ακόλουθα κύρια βήματα:

- Διαβάζεται η πίεση κορεσμού εισόδου ή η θερμοκρασία κορεσμού εισόδου σε bar και °C αντίστοιχα, καθώς και ένας ειδικός κλειδιάριθμος (μία ακέραια μεταβλητή), η τιμή του οποίου καθορίζει για ποιές από τις διαθέσιμες θερμοφυσικές ιδιότητες θα γίνουν υπολογισμοί.
- Γίνεται έλεγχος αν η πίεση κορεσμού εισόδου ή η θερμοκρασία εισόδου κορεσμού είναι συμβατές με την περιοχή ισχύος των υλοποιούμενων εξισώσεων για τις ιδιότητες.
- Αν η είσοδος είναι η πίεση κορεσμού, υπολογίζεται η θερμοκρασία κορεσμού για την πίεση εισόδου.
- Αν η είσοδος είναι η θερμοκρασία κορεσμού, υπολογίζεται η πίεση κορεσμού για τη θερμοκρασία εισόδου.
- Υπολογίζεται ο ειδικός όγκος για την πίεση και τη θερμοκρασία εισόδου.
- Υπολογίζονται οι βασικές παράμετροι της χρησιμοποιούμενης καταστατικής εξίσωσης, δεδομένων της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου.
- Υπολογίζονται οι ζητούμενες με τον ειδικό κλειδιάριθμο οι ζητούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες.
- Παρέχονται στον χρήστη τα αποτελέσματα.

Ο Πίνακας 6-1 παρουσιάζει τα σύμβολα, την ονοματολογία και τις μονάδες των βασικών μεταβλητών του κώδικα SODIUM\_LISP σε αλφαβητική σειρά. Ως βασικές μεταβλητές εννοούνται εδώ κυρίως τα καταστατικά μεγέθη και οι θερμοφυσικές ιδιότητες του Νατρίου καθώς και ορισμένες άλλες παράμετροι με τις οποίες ο χρήστης έρχεται σε άμεση επαφή. Τα σύμβολα των μεταβλητών συνοδεύονται από τις διαστάσεις τους σε μονάδες στις οποίες γίνεται η είσοδος ή η έξοδος. Σημειώνεται πάντως ότι ο κώδικας SODIUM\_LISP χρησιμοποιεί εσωτερικά σε αρκετά σημεία του και διαφορετικές μονάδες για το ίδιο μέγεθος ή ιδιότητα, με σκοπό να εξυπηρετήσει ανάγκες τοπικών, εσωτερικών υπολογισμών.

### 6.5.2 Οδηγίες χρήσεως του κώδικα.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι απαραίτητες οδηγίες για τη σωστή κλήση και εκμετάλλευση του κώδικα SODIUM\_LISP από προγράμματα εφαρμογής του χρήστη<sup>3</sup>.

Η τυπική επικοινωνία του προγράμματος του χρήστη και του κώδικα αποκαθίσταται με την ακόλουθη ομάδα εντολών, οι οποίες περιέχουν τις μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους εισόδου / εξόδου<sup>4</sup>.

↓ *αυτή είναι η έβδομη στήλη*

7

**IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)**

**DOUBLE PRECISION IBMF, IBMG, JTCF, KF, LACFG, MF**

**COMMON/PROPERTY1/SVF, HF, UF, CPF, CVF, SF, IBMF, AF, KF, MF**

**COMMON/PROPERTY2/SVG, HG, UG, CPG, CVG, SG, IBMG, AG, KG, MG**

**COMMON/PROPERTY3/HFG, SIGMAFG, LACFG**

**CALL SODIUM\_LISP (JS, JP, P, T, TS, JR, IS)**

Είνα:

JS, JP διακόπτες, ο ρόλος των οποίων είναι αντίστοιχος με τον ρόλο των ομώνυμων διακοπών του κώδικα LIGHT\_WASP, όπως περιγράφεται στην § 4.6.2

P πίεση σε bar (μεταβλητή εισόδου)

T θερμοκρασία σε K (μεταβλητή εισόδου)

TS θερμοκρασία κορεσμού στην πίεση P (σε K -μεταβλητή εξόδου)

---

<sup>3</sup> Βλέπε και το παράδειγμα κυρίου προγράμματος εφαρμογής example.f στο Παράρτημα III.

<sup>4</sup> Βλέπε και το παράδειγμα κυρίου προγράμματος εφαρμογής example.f στο Παράρτημα III

JR, IS δείκτες (μεταβλητές εξόδου -παίρνουν τιμές με τρόπο που περιγράφεται στη συνέχεια)

Τα Common Blocks PROPERTY1, PROPERTY2 και PROPERTY3 περιέχουν τις υπόλοιπες μεταβλητές εξόδου. Οι μεταβλητές αυτές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6-1.

Για την επιτυχή κλήση του κώδικα πρέπει να τηρούνται δύο προϋποθέσεις:

1. Η εντολές COMMON /PROPERTY ... πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στο κυρίως πρόγραμμα του χρήστη ή στην υπορουτίνα του, η οποία καλεί τον κώδικα. Όλες οι μεταβλητές που περιέχονται στις εντολές COMMON πρέπει να δηλώνονται διπλής ακρίβειας (DOUBLE PRECISION). Οποσδήποτε επιτρέπεται στο χρήστη να αλλάξει τα ονόματα των μεταβλητών που εμφανίζονται στις εντολές COMMON/PROPERTY ... καθώς και στην εντολή CALL SODIUM\_LISP(... κατά τον τρόπο που αυτός νομίζει ότι τον εξυπηρετεί. Προσοχή χρειάζεται ώστε να αποφευχθεί η χρησιμοποίηση των μεταβλητών που εμφανίζονται στις εντολές COMMON/PROPERTY... και CALL SODIUM\_LISP(... ως δείκτες για στοιχεία πινάκων.

2. Οι διακόπτες JS και JP, τις τιμές των οποίων παρέχει ο χρήστης, πληροφορούν τον κώδικα σχετικά με το ποιές μεταβλητές θα χρησιμοποιήσουν ως εισόδους και με το ποιές ιδιότητες ζητείται να αποτελέσουν την έξοδο. Πρέπει να πάρουν τις κατάλληλες αρχικές τιμές. Ο διακόπτης JS καθορίζει ποιές από τις μεταβλητές θερμοκρασία, πίεση, ειδικός όγκος, ενθαλπία ή εντροπία, ή ποιόν συνδυασμό τους ανά δύο θέλει ο χρήστης σαν εισόδο. Στην παρουσιαζόμενη έκδοση του κώδικα, η μόνη τιμή που επιτρέπεται να πάρει ο διακόπτης JS είναι η μονάδα («1»), που αντιστοιχεί στα ζεύγη εισόδου (P,0) και (0,T). Ο διακόπτης JP καθορίζει ποιές ιδιότητες ζητάει ο χρήστης να υπολογισθούν από τον κώδικα. Ο διακόπτης αυτός μπορεί να πάρει τις ακέραιες τιμές από 0 έως και 63. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν κάποιο άθροισμα των αριθμών 0, 2, 4, 8, 16 και 32 -δηλαδή ισόδυναμα των αριθμών 0, 2<sup>0</sup>, 2<sup>1</sup>, 2<sup>2</sup>, 2<sup>3</sup>, 2<sup>4</sup> και 2<sup>5</sup>. Κάθε τέτοιο δυαδικό άθροισμα εξυπηρετεί τον με μοναδικό τρόπο τον προσδιορισμό του συνδυασμού των ιδιοτήτων που ζητούνται. Ο Πίνακας 6-2 συνοψίζει ποιες ιδιότητες υπολογίζονται αν ο διακόπτης JP πάρει τις τιμές 0, 2<sup>0</sup>, 2<sup>1</sup>, 2<sup>2</sup>, 2<sup>3</sup>, 2<sup>4</sup> και 2<sup>5</sup>.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η λειτουργία του διακόπτη JP, βοηθούν τα παραδείγματα που παρουσιάζονται σχετικά στην § 4.6.2 του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.

Ο διακόπτης JP βοηθάει στην αύξηση της ταχύτητας με την οποία ο κώδικας SODIUM\_LISP υπολογίζει τις ζητούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος αφού από την αρχή της εκτελέσεως πληροφορείσιά από τα τμήματα του κώδικα θα παραμείνουν ανενεργά. Για μικρές τιμές του JP αυτό σημαίνει την αδρανοποίηση μέχρι περίπου και του ενός τρίτου των εντολών του.

Εκτός από τους διακόπτες JS και JP και τις άλλες μεταβλητές εισόδου ο κώδικας περιέχει στη λίστα των παραμέτρων του και τους δείκτες JR και IS, οι οποίοι παίρνουν τιμές μόνο μετά από μια επιτυχημένη κλήση και εκτέλεση του κώδικα.

Στην παρουσιάζόμενη έκδοση του κώδικα, η μόνη τιμή που λαμβάνει ο δείκτης JR είναι το "έξι" ("6"), πράγμα που -κατά αντιστοιχία με όσα περιγράφονται για τους κώδικες LIGHT\_WASP και HEAVY\_WASP- δηλώνει ότι η περιοχή του διαγράμματος PT για την οποία γίνονται υπολογισμοί θερμοφυσικών ιδιοτήτων είναι η κατάσταση κορεσμού.

Ο δείκτης IS πληροφορεί το χρήστη σε τι σχέση βρίσκονται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου που καθόρισε, ως προς την κατάσταση κορεσμού για την πίεση εισόδου. Παίρνει τις τιμές 0 και 1. Ο Πίνακας 6-3 εξηγεί αναλυτικά τι σημαίνει κάθε τιμή του δείκτη IS.

Όλες οι πιο πάνω πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του κώδικα SODIUM\_LISP παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6-4.

### **6.5.3 Αντιμετώπιση λαθών (troubleshooting).**

Ο τρόπος με τον οποίο είναι κατασκευασμένος ο κώδικας SODIUM\_LISP αντιμετωπίζει τα συνήθη λάθη που τυχόν συμβαίνουν κατά την κλήση του. Αυτά τα λάθη ανιχνεύονται και μπορούν να διορθωθούν σχεπικά εύκολα, όπως αντιστοιχα ανιχνεύονται και διορθώνονται παρόμοια λάθη στην κλήση του κώδικα

LIGHT\_WASP<sup>5</sup> και βεβαίως και στην κλήση του κώδικα HEAVY\_WASP.

Αναλυτικότερα:

1. Αν δεν καθορισθεί σωστά ο διακόπτης JS (πρέπει JS=1) τυπώνεται σχετικό μήνυμα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου του χρήστη, στον υπολογιστή που αυτός εργάζεται και η εκτέλεση σταματάει.
2. Αν δεν καθορισθεί σωστά ο διακόπτης JP (πρέπει ο JP να είναι μεταξύ του 0 και του 63) τυπώνεται σχετικό μήνυμα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου του χρήστη, όπως προηγούμενα και η εκτέλεση σταματάει.
3. Αν οι τιμές των P,T βρίσκονται έξω από την περιοχή ισχύος τυπώνεται ομοίως μήνυμα και η εκτέλεση σταματάει.
4. Αν ζητείται μια κατάσταση κορεσμού αλλά από λάθος η πίεση ή η θερμοκρασία εισόδου είναι υπερκρίσιμες τυπώνεται ομοίως μήνυμα και η εκτέλεση σταματάει.
5. Αν η σύνταξη της απαραίτητης για την κλήση του κώδικα ομάδας εντολών, δηλαδή των IMPLICIT..., DOUBLE PRECISION..., COMMON /PROPERTY... και CALL SODIUM\_LISP(..., είναι εσφαλμένη τότε καταλαβαίνει κανείς, ότι υπάρχει μια ποικιλία λαθών που μπορεί να συμβεί, τα περισσότερα των οποίων είναι βέβαια μοιραία (fatal) και η εκτέλεση σταματάει. Συνήθως τότε τυπώνεται και κατάλληλο μήνυμα λάθους που προέρχεται όμως από τον ίδιο τον υπολογιστή και όχι από τον κώδικα.

Λοιπά μηνύματα που μπορεί να εμφανισθούν κατά την εκτέλεση του κώδικα είναι αυτοεξηγούμενα.

## 6.6 Τα υποπρογράμματα του κώδικα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα υποπρογράμματα του κώδικα SODIUM\_LISP μπορούν να διακριθούν σε υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου, υποπρογράμματα υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού, υποπρογράμματα υπολογισμού του ειδικού όγκου δεδομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου, υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς, υποπρογράμματα μαθηματικών υπολογισμών και τέλος άλλα επικουρικά

---

<sup>5</sup> Βλέπε και § 4.6.3

υποπρογράμματα<sup>6</sup>. Στη συνέχεια θα περιγραφούν με συνοπτικό τρόπο όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα κατατασσόμενα κατά την πιωπάνω κατηγοριοποίηση.

### **6.6.1 Υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου.**

Τα υποπρογράμματα εισόδου - εξόδου είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες SODIUM\_LISP , CHECKPT και η συνεργαζόμενη συνάρτηση FPS.

#### **6.6.1.1 Υπορουτίνα SODIUM\_LISP(JS,JP,P,T,TS,JR,IS).**

Είναι το υποπρόγραμμα που πρέπει να κληθεί από το πρόγραμμα του χρήστη αν αυτός θέλει να χρησιμοποιήσει τον κώδικα. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτή η κλήση ήδη παρουσιάσθηκε στην § 6.5.2. Η υπορουτίνα αποτελείται από μία ομάδα εντολών που φροντίζει κυρίως για την ομαλή είσοδο στον κώδικα και την ομαλή έξοδο από αυτόν. Εκεί ελέγχεται η ορθότητα των τμών των διακοπών JS και JP, δίνεται η εντολή για τον έλεγχο της ορθότητας της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου, αρχικοποιούνται οι τιμές όλων των ιδιοτήτων στο μηδέν και συντονίζονται οι κυριότερες λειτουργίες του κώδικα. Κατά τη διαδικασία εξόδου και μέσω της λίστας παραμέτρων η υπορουτίνα SODIUM\_LISP πληροφορεί το πρόγραμμα του χρήστη για τις τιμές του ζεύγους πίεσεως – θερμοκρασίας κορεσμού του Νατρίου, στο οποίο ζητήθηκε να γίνουν υπολογισμοί.

#### **6.6.1.2 Υπορουτίνα CHECKPT(TS,JR,IS).**

Όπως φαίνεται και από το όνομά της πρόκειται για την υπορουτίνα στην οποία το υποπρόγραμμα SODIUM\_LISP αναθέτει τον έλεγχο της πίεσης και της θερμοκρασίας εισόδου. Η υπορουτίνα μετατρέπει τις μονάδες της πίεσης και της θερμοκρασίας από bar και °C σε MPa και K αντίστοιχα, προκειμένου να διευκολύνονται οι υπολογισμοί στον κώδικα. Υπολογίζεται η πίεση κορεσμού αν το μόνο δεδομένο είναι η θερμοκρασία κορεσμού TS με χρήση της συνάρτησης FPS. Υπολογίζεται αντίστροφα η θερμοκρασία κορεσμού TS αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού, με χρήση των συναρτήσεων FFPS, DFPS, FTS και της μαθηματικής υπορουτίνας SOLVE. Αποφασίζεται επίσης εκεί η τιμή της μεταβλητής εξόδου μεταβλητής εξόδου IS σύμφωνα με όσα αναφέρονται στον Πίνακα 6-3.

---

<sup>6</sup> Όλα τα υποπρογράμματα που συγκροτούν τον κώδικα SODIUM\_LISP βρίσκονται συγκεντρωμένα στο Παράρτημα ΙΙΙ.

#### **6.6.3.1 Συνάρτηση FDENSF(DF).**

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου στο υποπρόγραμμα CHECKPT το υποπρόγραμμα SODIUM\_LISP αναθέτει στο υποπρόγραμμα συνάρτησης FDENSF να υπολογίσει την πυκνότητα του κορεσμένου υγρού  $\rho_s$  του Νατρίου DF σε  $\text{kg/m}^3$  υλοποιώντας την σχέση (3-66).

#### **6.6.3.2 Συνάρτηση FDENSG(DG).**

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου στο υποπρόγραμμα CHECKPT το υποπρόγραμμα SODIUM\_LISP αναθέτει στο υποπρόγραμμα συνάρτησης FDENSG να υπολογίσει την πυκνότητα του κορεσμένου ατμού  $\rho_{gs}$  του Νατρίου DG σε  $\text{kg/m}^3$  υλοποιώντας τη σχέση (3-84). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το υποπρόγραμμα συνάρτησης DFPS1000, το οποίο είναι η υλοποίηση της παραγωγού (3-63) στις κατάλληλες μονάδες για χρήση στη σχέση (3-84).

#### **6.6.4 Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.**

Τα υποπρογράμματα υπολογισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του Νατρίου είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες TOTAL, ENTHALPYF, ENTHALPYG, ENTROPYF, ENTROPYG, SHF, SHG, SOVEF, SIBMF και SIBMG.

#### **6.6.4.1 Υπορουτίνα TOTAL(JP,HF,UF,CPF,CVF,SF,IBMF,AF,KF,MF,HG,UG,CPG,CVG,SG,IBMG,AG,KG,MG,SIGMAFG).**

Όταν υπολογισθεί η πυκνότητα του Νατρίου, το υποπρόγραμμα SODIUM\_LISP καλεί το υποπρόγραμμα TOTAL, το οποίο με τη σειρά του αναθέτει σε διάφορα μικρότερα υποπρογράμματα -η σύντομη περιγραφή των οποίων ακολουθεί- τον υπολογισμό των ζητούμενων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων μεταφοράς του Νατρίου ανάλογα με την τιμή του διακόπτη JP.

#### **6.6.4.2 Υπορουτίνα ENTHALPYF(HF,UF).**

Υπολογίζει την ειδική ενθαλπία HF [σχέσεις (3-73) και (3-74)] και την ειδική εσωτερική ενέργεια UF του κορεσμένου υγρού του Νατρίου σε  $\text{kJ/kg}$ . Η ειδική εσωτερική ενέργεια UF προκύπτει ως η διαφορά  $HF - Ps/\rho_s$ , Ps σε MPa.



#### **6.6.3.1 Συνάρτηση FDENSF(DF).**

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου στο υποπρόγραμμα CHECKPT το υποπρόγραμμα SODIUM\_LISP αναθέτει στο υποπρόγραμμα συνάρτησης FDENSF να υπολογίσει την πυκνότητα του κορεσμένου υγρού  $\rho_{is}$  του Νατρίου DF σε  $\text{kg/m}^3$  υλοποιώντας την σχέση (3-66).

#### **6.6.3.2 Συνάρτηση FDENSG(DG).**

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου στο υποπρόγραμμα CHECKPT το υποπρόγραμμα SODIUM\_LISP αναθέτει στο υποπρόγραμμα συνάρτησης FDENSG να υπολογίσει την πυκνότητα του κορεσμένου ατμού  $\rho_{gs}$  του Νατρίου DG σε  $\text{kg/m}^3$  υλοποιώντας τη σχέση (3-84). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το υποπρόγραμμα συνάρτησης DFPS1000, το οποίο είναι η υλοποίηση της παραγωγού (3-63) στις κατάλληλες μονάδες για χρήση στη σχέση (3-84).

#### **6.6.4 Υποπρογράμματα υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.**

Τα υποπρογράμματα υπολογισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του Νατρίου είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες TOTAL, ENTHALPYF, ENTHALPYG, ENTROPYF, ENTROPYG, SHF, SHG, SOVEF, SIBMF και SIBMG.

##### **6.6.4.1 Υπορουτίνα TOTAL(JP,HF,UF,CPF,CVF,SF,IBMF,AF,KF,MF,HG,UG,CPG,CVG,SG,IBMG,AG,KG,MG,SIGMAFG).**

Όταν υπολογισθεί η πυκνότητα του Νατρίου, το υποπρόγραμμα SODIUM\_LISP καλεί το υποπρόγραμμα TOTAL, το οποίο με τη σειρά του αναθέτει σε διάφορα μικρότερα υποπρογράμματα -η σύντομη περιγραφή των οποίων ακολουθεί- τον υπολογισμό των ζητούμενων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων μεταφοράς του Νατρίου ανάλογα με την τιμή του διακόπτη JP.

##### **6.6.4.2 Υπορουτίνα ENTHALPYF(HF,UF).**

Υπολογίζει την ειδική ενθαλπία HF [σχέσεις (3-73) και (3-74)] και την ειδική εσωτερική ενέργεια UF του κορεσμένου υγρού του Νατρίου σε  $\text{kJ/kg}$ . Η ειδική εσωτερική ενέργεια UF προκύπτει ως η διαφορά HF – Ps/ $\rho_{is}$ , Ps σε MPa.

#### **6.6.4.3 Υπορουτίνα ENTHALPYG(HG,UG).**

Υπολογίζει την ειδική ενθαλπία HG [σχέσεις (3-91) και (3-92)] και την ειδική εσωτερική ενέργεια UG του κορεσμένου ατμού του Νατρίου σε kJ/kg. Η ειδική εσωτερική ενέργεια UG προκύπτει ως η διαφορά  $HG - Ps/\rho_{gs}$ , Ps σε MPa.

#### **6.6.4.4 Υπορουτίνα ENTROPYF(SF).**

Υπολογίζει την ειδική εντροπία SF [σχέσεις (3-82) και (3-83)] του κορεσμένου υγρού του Νατρίου σε kJ/(kgK). Το ολοκλήρωμα που είναι απαραίτητο στους υπολογισμούς που αφορούν στην υλοποίηση της σχέσης (3-83) προσδιορίζεται, όπως ήδη σημειώθηκε, με τη μέθοδο του τραπέζιου<sup>7</sup> (υπορουτίνα SUBROUTINE INTEGRAL). Το υπόψιν ολοκλήρωμα είναι συνάρτηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υγρού σε κατάσταση κορεσμού  $c_{is}$ . Η ποσότητα αυτή δίνεται από τη σχέση (3-76) και (3-77). Η υλοποίηση αυτών των δύο σχέσεων στον κώδικα SODIUM\_LISP γίνεται με τη βοήθεια του υποπρογράμματος συναρτήσεως FUNCTION CF.

#### **6.6.4.5 Υπορουτίνα ENTROPYG(SG).**

Υπολογίζει την ειδική εντροπία SG [σχέσεις (3-98) και (3-99)] του κορεσμένου ατμού του Νατρίου σε kJ/(kgK). Δεδομένου ότι η σχέση (3-98) εμπλέκει και την εντροπία του κορεσμένου υγρού Νατρίου στους υπολογισμούς, η υπορουτίνα ENTROPYG καλεί την υπορουτίνα ENTROPYF, η οποία αναλαμβάνει το τμήμα των υπολογισμών που της αντιστοιχεί.

#### **6.6.4.6 Υπορουτίνα SHF(CPF,CVF).**

Υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση CPF σε kJ/(kgK) και την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο CVF του κορεσμένου υγρού του Νατρίου [σχέση (3-78) και σχέση (3-79) αντίστοιχα] -με τη βοήθεια και των ακόλουθων σχέσεων επίσης για το κορεσμένο υγρό:

- (3-68) για την ισόθλιπτη διαστολικότητα AF σε  $K^{-1}$ ,
- (3-69) για την αδιαβατική συμπίεστικότητα KAF σε  $MPa^{-1}$ ,
- (3-71) για την ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα IBMF σε  $MPa^{-1}$ ,
- (3-72) για το συντελεστή θερμοκής διαστολής APF σε  $K^{-1}$ ,

---

<sup>7</sup> Βλέπε και § 6.3.2

- (3-63) για την παράγωγο  $dPs/dT$  όπως αυτή υπολογίζεται από το υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION DFPS, και τέλος
- (3-66) για την πυκνότητα  $\rho_{is}$  όπως αυτή υπολογίζεται από το υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION FDENSF.

Οι πιεσικές σχέσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μεγεθών CPF και CVF, καθώς και υπολογίζουν όλα τα ενδιάμεσα μεγέθη που απαιτούνται στις σχέσεις (3-78) και (3-79).

#### 6.6.4.7 Υπορουτίνα SHG(CPG,CVG).

Υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση CPG σε  $kJ/(kgK)$  και την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο CVG του κορεσμένου ατμού του Νατρίου σε  $kJ/(kgK)$  [σχέση (3-96) και σχέση (3-97) αντίστοιχα] - με τη βοήθεια και των ακόλουθων σχέσεων επίσης για τον κορεσμένο ατμό:

- (3-94) και (3-95) για την ειδική θερμοχωρητικότητα CG του ατμού σε συνθήκες κορεσμού σε  $kJ/(kgK)$ ,
- (3-85) για την ισόθλιπη διαστολικότητα AG  $K^{-1}$ ,
- (3-87), (3-88) και (3-89) για το συντελεστή θερμικής διαστολής APG σε  $K^{-1}$ ,
- (3-63) για την παράγωγο  $dPs/dT$  όπως αυτή υπολογίζεται από το υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION DFPS, και τέλος
- (3-84) για την πυκνότητα  $\rho_{gs}$  όπως αυτή υπολογίζεται από το υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION FDENSG.

Οι πιεσικές σχέσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μεγεθών CPG και CVG, καθώς και υπολογίζουν όλα τα ενδιάμεσα μεγέθη που απαιτούνται στις σχέσεις (3-96) και (3-97). Η παράγωγος που είναι απαραίτητη στους υπολογισμούς που αφορούν στην υλοποίηση της σχέσης (3-85) προσδιορίζεται, όπως ήδη σημειώθηκε, με τη μέθοδο Ridder<sup>8</sup> (υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION DFRIDR).

#### 6.6.4.8 Υπορουτίνα SOVEF(AF).

Υπολογίζει την ταχύτητα του ήχου AF στο κορεσμένο υγρό σε  $m/sec$ . Χρησιμοποιείται η εξίσωση (3-80).

---

<sup>8</sup> Βλέπε και § 6.3.2

#### 6.6.4.9 Υπορουτίνες SIBMF(IBMFM) και SIBMG(IBMGM).

Η υπορουτίνα SIBMF υπολογίζει την ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα IBMF του κορεσμένου υγρού σε MPa<sup>-1</sup>. Χρησιμοποιείται η εξίσωση (3-71) με τη βοήθεια των ακόλουθων σχέσεων:

- (3-68) για την ισόθλιπτη διαστολικότητα AF του κορεσμένου υγρού σε K<sup>-1</sup>.
- (3-69) αδιαβατική συμπιεστότητα KAF του κορεσμένου υγρού σε MPa<sup>-1</sup>.
- (3-76) και (3-77) για την ειδική θερμοχωρητικότητα c<sub>is</sub> του υγρού σε συνθήκες κορεσμού σε kJ/(kgK), όπως αυτή υπολογίζεται από το υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION CF.
- (3-63) για την παράγωγο dPs/dT, όπως αυτή υπολογίζεται από το υποπρογράμματα συνάρτησης FUNCTION DFPS και FUNCTION DFPS1000, και τέλος
- (3-66) για την πυκνότητα ρ<sub>is</sub> όπως αυτή υπολογίζεται από το υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION FDENSG.

Η υπορουτίνα SIBMG υπολογίζει την ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα k<sub>1gs</sub> (μεταβλητή IBMGM) του κορεσμένου ατμού σε MPa<sup>-1</sup> με βάση την εξίσωση (3-86).

Για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιούνται και οι σχέσεις (3-85) ως και (3-89) που εμπλέκονται στον προσδιορισμό της ισόθλιπτης διαστολικότητας α<sub>pgs</sub> του κορεσμένου ατμού και της ποσότητας γ. Ειδικά για τον προσδιορισμό της παραγώγου dr<sub>gs</sub>/dT που εμπλέκεται στη σχέση (3-85) χρησιμοποιείται και εδώ η μέθοδος Ridders<sup>9</sup> (υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION DFRIDR).

#### 6.6.5 Υποπρογράμματα υπολογισμού ιδιοτήτων μεταφοράς.

Τα υποπρογράμματα υπολογισμού των ιδιοτήτων μεταφοράς του Νατρίου είναι ονομαστικά οι υπορουτίνες VISCOSITYF, CONDUCTIVEF για τη δυναμική συνεκτικότητα και την θερμική αγωγιμότητα στην γρή φάση στην περιοχή θερμοκρασιών για την οποία ισχύει ο κώδικας, και TENSION για την επιφανειακή τάση του κορεσμένου Νατρίου.

---

<sup>9</sup> Βλέπε και § 6.3.2

#### **6.6.5.1 Υπορουτίνα VISCOSITYF(MF).**

Υπολογίζει τη δυναμική συνεκτικότητα MF του υγρού Νατρίου σε Pas [σχέση (3-101)].

#### **6.6.5.2 Υπορουτίνα CONDUCTIVEF(KF).**

Υπολογίζει τη θερμική αγωγιμότητα K του βαρέος ύδατος σε W/(mK) [σχέση (3-100)].

#### **6.6.5.3 Υπορουτίνα TENSION(SIGMAFG).**

Υπολογίζει την επιφανειακή τάση SIGMAFG μεταξύ υγρού και ατμού σε N/m [σχέση (3-102)].

#### **6.6.6 Υποπρογράμματα μαθηματικών υπολογισμών.**

Τρία είναι τα βασικά υποπρογράμματα μαθηματικών υπολογισμών. Το υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION DFRIDR, η υπορουτίνα INTEGRAL και η υπορουτίνα SOLVE. Για το υποπρόγραμμα DFRIDR έχει ήδη προηγηθεί εμπειριστατωμένη ανάλυση στην § 6.3.2. Το υποπρόγραμμα INTEGRAL, δεν είναι αναγκαίο να παρουσιασθεί, καθώςον έχει ήδη σημειωθεί ότι είναι η υλοποίηση της μεθόδου τραπεζίου για αριθμητικές ολοκληρώσεις. Τέλος η υπορουτίνα SOLVE είναι ακριβώς εκείνη που χρησιμοποιείται και στους κώδικες LIGHT\_WASP<sup>10</sup> και HEAVY\_WASP και η οποία έχει ήδη παρουσιασθεί στα προηγούμενα Κεφάλαια 4.

#### **6.6.7 Άλλα επικουρικά υποπρογράμματα.**

##### **6.6.7.1 Υποπρόγραμμα δεδομένων CONSTANTS.**

Είναι ένα FORTRAN blockdata στο οποίο εμπεριέχονται οι περισσότερες από τις σταθερές που είναι απαραίτητες για τις διάφορες συσχετίσεις που υλοποιούνται στον κώδικα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στις σταθερές συμπεριλαμβανονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες πιέσεις και θερμοκρασίες για τις οποίες λειτουργεί ο κώδικας, τα κρίσιμα καταστατικά μεγέθη και άλλες σταθερές που αφορούν την ουσία «Νάτριο»,

---

<sup>10</sup> Ο τρόπος υλοποίησης είναι όμοιος με αυτόν που έχει περιγραφεί αναλυτικά στην § 4.7.6.1.

κά. Σημειώνεται ότι στο υποπρόγραμμα αυτό δίνονται μόνο σταθερές που κατά κανόνα χρησιμοποιούνται σε περισσότερα από ένα υποπρογράμματα (υπάρχουν μικρές εξαιρέσεις).

#### **6.6.7.2 Κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE και συγκριτικά αποτελέσματα.**

Στο Παράρτημα III συμπεριλαμβάνεται, εκτός των υποπρογραμμάτων του κώδικα SODIUM\_LISP και ένα κυρίως πρόγραμμα εφαρμογής-πράδειγμα ειδικά για να κατανοήσει ο χρήστης του κώδικα πως πρέπει να καλεί το υποπρόγραμμα SODIUM\_LISP. Το κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE παρέχει και μία στοιχειώδη έξοδο για τις περισσότερες από τις ιδιότητες του Νατρίου που είναι δυνατόν να υπολογισθούν από τον κώδικα SODIUM\_LISP, για ένα ζεύγος πίεσης - θερμοκρασίας. Ο Πίνακας 6-5 παρουσιάζει ένα μικρό απόσπασμα των αποτελεσμάτων του κώδικα, συγκεκριμένα τις πιέσεις κορεσμού για διάφορες θερμοκρασίες κορεσμού. (από 900 έως 2400 K, βήμα 100 K). Ο Πίνακας 6-6 περιέχει το ίδιο απόσπασμα των αποτελεσμάτων όπως αυτό δίνεται στην αναφορά των Fink J.K και Leibowitz L., 1995, σελ. 56. Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα των δύο πινάκων συμφωνούν. Στο Παράρτημα III, στην παράγραφο III.3, δίνονται συμπληρωματικά και αποτελέσματα με βάση το κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE, όπως ακριβώς αυτά λαμβάνονται στην οθόνη του Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.

#### **6.7 Λειτουργία του κώδικα SODIUM\_LISP.**

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η δομή και η στρατηγική του κώδικα SODIUM\_LISP σε βήματα τα οποία αναλύονται με λεπτομέρεια.

1. Ο κώδικας δέχεται σαν είσοδο την πίεση κορεσμού P σε bar και μηδενική θερμοκρασία, ή μηδενική πίεση και την θερμοκρασία κορεσμού T σε βαθμούς Κελσίου. Τα δεδομένα πίεσης ή θερμοκρασίας πρέπει να βρίσκονται μέσα στην περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών για τις οποίες ισχύει ο κώδικας.

Ο κώδικας αποδίδει στην έξοδο τα ακόλουθα μεγέθη για το κορεσμένο υγρό Νάτριο και τον κορεσμένο ατμό Νατρίου –εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά (σι μονάδες τους δηλώνονται σε αγκύλες [...])

P<sub>s</sub> Πίεση κορεσμού αντίστοιχη στην θερμοκρασία T [bar]

$T_s$	Θερμοκρασία κορεσμού αντίστοιχη στην πίεση $P$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$v$	Ειδικό όγκο [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]
$u$	Ειδική εσωτερική ενέργεια [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]
$h$	Ειδική ενθαλπία [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]
$s$	Ειδική εντροπία [ $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ]
$c_p$	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση [ $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ]
$c_v$	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο [ $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ]
$a$	Ταχύτητα του ήχου στο κορεσμένο υγρό [ $\text{m}/\text{sec}$ ]
$k_T$	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα [ $\text{MPa}^{-1}$ ]
$\eta$	Δυναμική συνεκτικότητα του υγρού στη θερμοκρασία $T_s$ [ $\text{Pas}$ ]
$\lambda$	Θερμική αγωγιμότητα του υγρού στη θερμοκρασία $T_s$ [ $\text{W}/(\text{mK})$ ]
$\sigma$	Επιφανειακή τάση [ $\text{Nm}^{-1}$ ]

2. Η πρώτη κίνηση που κάνει ο κώδικας είναι να διαπιστώσει αν οι παράμετροι κλήσεως του έχουν διατυπωθεί με ορθότητα και αν έχουν πάρει αποδεκτές τιμές<sup>11</sup>. Αν αυτό δεν συμβαίνει η εκτέλεση σταματάει και τυπώνονται σχετικά μηνύματα στην εκ ταυτότητας μονάδα εξόδου του χρήστη.
3. Στη συνέχεια ο κώδικας αναθέτει στην υπορουτίνα CHECKPT να ελέγξει εάν η πίεση ή η θερμοκρασία εισόδου βρίσκονται μέσα στην περιοχή για την οποία αυτός μπορεί να λειτουργήσει. Όταν η πίεση εισόδου έχει την τιμή 0 (υπενθυμίζεται ότι έτσι ζητείται μια κατάσταση κορεσμού) ελέγχεται αν η θερμοκρασία εισόδου βρίσκεται στο διάστημα στο οποίο υπάρχουν καταστάσεις κορεσμού. Στην περίπτωση που ο έλεγχος είναι θετικός ανατίθεται στην function FPS να υπολογίσει την πίεση κορεσμού του Νατρίου [εξίσωση (3-62)]. Αν η θερμοκρασία εισόδου έχει την τιμή 0 (ζητείται δηλαδή και πάλι μια κατάσταση κορεσμού) ελέγχεται αν η πίεση εισόδου βρίσκεται στο διάστημα στο οποίο υπάρχουν καταστάσεις κορεσμού. Αν και εδώ είναι θετικός ο έλεγχος καλείται η function FTS [συσχέτιση (3-64)] με σκοπό να υπολογισθεί μία αρχική εκτίμηση της θερμοκρασίας κορεσμού (TS) του Νατρίου σε συνάρτηση με την πίεση κορεσμού. Στη συνέχεια δίνεται εντολή στην υπορουτίνα SOLVE να λύσει την εξίσωση κορεσμού  $P_s = P_s(T_s)$  του Νατρίου [σχέση (3-62) στη function FFPS] ως προς την ακριβή θερμοκρασία κορεσμού χρησιμοποιώντας ως τιμή εκκίνησης για

την εύρεση της λύσης την προηγούμενη αρχική εκτίμηση και βέβαια την παράγωγο της εξίσωσης  $P_s = P_s(T_s)$  ως προς τη θερμοκρασία [σχέση (3-63), function DFPS]. Υπολογίζονται η ανηγμένη πίεση  $P_r$  (PR) και η ανηγμένη θερμοκρασία  $T_r$  (TR). Με την ολοκλήρωση αυτών των διεργασιών η υπορουτίνα CHECKPT έχει ενημερώσει τις COMMON εντολές επικοινωνίας

COMMON/K1/PP,PR (PP πίεση σε bar)

COMMON/K2/TT,TR (TT θερμοκρασία σε K)

και τη λίστα παραμέτρων (TS, JR, IS)

και επιστρέφει τον έλεγχο στην υπορουτίνα SODIUM\_LISP.

4. Η υπορουτίνα SODIUM\_LISP στη συνέχεια αναθέτει στα υποπρογράμματα συναρτήσεων FUNCTION FDENSF, και FUNCTION FDENSG, να υπολογίσουν την πυκνότητα του Νατρίου, για το κορεσμένο υγρό και τον κορεσμένο ατμό αντίστοιχα.
5. Η υπορουτίνα SODIUM\_LISP υπολογίζει τώρα τον ειδικό όγκο του Νατρίου SVF (για το κορεσμένο υγρό) και SVG (για τον κορεσμένο ατμό) σε  $m^3/kg$ . Καλείται στη συνέχεια η υπορουτίνα TOTAL με σκοπό τον υπολογισμό των άλλων θερμοφυσικών ιδιοτήτων που μπορεί να δώσει ο κώδικας. για το κορεσμένο υγρό και για τον κορεσμένο ατμό.
6. Ανάλογα με την τιμή που έχει πάρει ο διακόπτης JP κατά την κλήση του κώδικα η υπορουτίνα TOTAL καλεί μία, ή δύο, ή τρεις, κτλ ή και όλες από τις ακόλουθες υπορουτίνες: ENTHALPYi (i = "F" ή "G"), ENTROPYi (i = "F" ή "G"), SH (i = "F" ή "G"), SOVEF, SIBMi (i = "F" ή "G"), VISCOSITY, CONDUCTIVEF και TENSION. Ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιούνται αυτές οι κλήσεις εξηγήθηκε σαφώς στην § 6.5.2. Το σύνολο αυτών των υπορουτινών (και της υπορουτίνας TOTAL συμπεριλαμβανομένης) ανήκει στα προαιρετικά υποπρογράμματα του κώδικα, στα υποπρογράμματα δηλαδή που μπορούν να αφαιρεθούν (ένα - ένα, κατά τυχαίες ομάδες ή και όλα) χωρίς με αυτό να επηρεάζονται κατά κανένα τρόπο οι υπόλοιπες λειτουργίες του κώδικα που περιγράφηκαν προηγουμένα και αφορούν κυρίως στον υπολογισμό του ειδικού

---

<sup>11</sup> Βλέπε τον Πίνακα 6-4 και την υπορουτίνα SODIUM\_LISP.



όγκου του Νατρίου για το κορεσμένο υγρό και τον κορεσμένο ατμό. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα προαιρετικά υποπρογράμματα του κώδικα θα δοθούν στην επόμενη παράγραφο 6.8. Από τις υπορουτίνες ENTHALPYi (i = "F" ή "G"), υπολογίζεται η ειδική ενθαλπία Hi και η ειδική εσωτερική ενέργεια Ui (i = "F" ή "G") για το κορεσμένο υγρό και τον κορεσμένο ατμό [σχέσεις (3-73), (3-74) και (3-91), (3-92)]. Υπενθυμίζεται ότι η ειδική εσωτερική ενέργεια Ui προκύπτει ως η διαφορά HF – Ps/ρi, Ps σε MPa. Οι υπορουτίνες ENTROPYi (i = "F" ή "G") προσδιορίζουν την ειδική εντροπία για το κορεσμένο υγρό και τον κορεσμένο ατμό [σχέσεις (3-82), (3-83) και (3-98)]. Η υπορουτίνα SHF υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση CPF και την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο CVF για το κορεσμένο υγρό [αντίστοιχες σχέσεις (3-78) και (3-79)]. Η υπορουτίνα SHG υπολογίζει την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση CPG και την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο CVG για τον κορεσμένο ατμό [αντίστοιχες σχέσεις (3-96) και (3-97)]. Η υπορουτίνα SOVEF ασχολείται με τον υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου AF στην υγρή φάση [σχέσεις (3-80) και (3-81)]. Οι υπορουτίνες SIBMi (i = "F" ή "G") προσδιορίζει τους συντελεστές ισοθερμοκρασιακής συμπεριφοράς IBMi (i = "F" ή "G") για το κορεσμένο υγρό και τον κορεσμένο ατμό [αντίστοιχες σχέσεις (3-71) και (3-86)]. Η εύρεση της δυναμικής συνεκτικότητας MUF και της θερμικής αγωγιμότητας KF για την υγρή φάση έχει ανατεθεί στις υπορουτίνες VISCOSITYF και CONDUCTIVEF αντίστοιχα [σχέσεις (3-101) και (3-100)]. Λειτουργία της υπορουτίνας TENSION είναι να υπολογίζει την επιφανειακή τάση SIGMAFG μεταξύ υγρής και ατμώδους φάσεως στην κατάσταση κορεσμού [σχέση (3-102)]. Όλες οι παραπάνω υπορουτίνες δέχονται σαν είσοδο τη θερμοκρασία κορεσμού και όπου χρειάζεται την πίεση κορεσμού με την βοήθεια των COMMON εντολών επικοινωνίας:

COMMON/K1/PP,PR  
COMMON/K2/TT,TR

Με την συμπλήρωση των κλήσεων των ζητούμενων να κληθούν (διακόπτης JP) υπορουτινών για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων (όλων των υπορουτινών αν ζητούνται όλες -JP = 31 ή JP = 63) ενημερώνεται με τις υπολογισθείσες τιμές η λίστα παραμέτρων

(JP,HF,UF,CPF,SF,IBMF,AF,KF,MF  
HG,UG,CPG,CVG,SG,IBMG,AG,KG,MG,SIGMAFG)

JP μεταβλητή ΕΙΣΟΔΟΥ  
[οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι μεταβλητές ΕΞΟΔΟΥ]

της υπορουτίνας TOTAL και τέλος ο έλεγχος επιστρέφει στην υπορουτίνα SODIUM\_LISP.

7. Στην υπορουτίνα SODIUM\_LISP δρομολογούνται τώρα οι τελευταίες υπολογιστικές ενέργειες, οι οποίες πρέπει να γίνουν πριν ο έλεγχος της ροής επιστρέψει στο κυρίως πρόγραμμα του χρήστη. Ενημερώνονται δηλαδή αυτόματα οι COMMON εντολές επικοινωνίας της υπορουτίνας SODIUM\_LISP με το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη καθώς και η λίστα παραμέτρων της (κατ' επέκταση δηλαδή αποκαθίσταται πλήρης αμφίδρομη επικοινωνία του κώδικα με τον χρήστη). Πρόκειται βέβαια για τις γνωστές COMMON εντολές

COMMON/PROPERTY1/...

COMMON/PROPERTY2/...

και

COMMON/PROPERTY3/...

και για τη λίστα παραμέτρων

(JS,JP,P,T,JR,IS)

JS,JP μεταβλητές ΕΙΣΟΔΟΥ

P,T μεταβλητές ΕΙΣΟΔΟΥ - ΕΞΟΔΟΥ

JR, IS μεταβλητές ΕΞΟΔΟΥ

Μετά από αυτά ο έλεγχος επιστρέφει στο κυρίως πρόγραμμα του χρήστη. Μία πολύ απλή μορφή τέτοιου προγράμματος μπορεί να είναι αυτή του κυρίως προγράμματος EXAMPLE.

Πέρα από τις COMMON εντολές επικοινωνίας ο κώδικας χρησιμοποιεί και άλλες COMMON εντολές οι οποίες ονομάστηκαν COMMON εντολές σταθερών. Πρόκειται για Labelled Common Blocks, με το χαρακτηριστικό /Z/, τα οποία παίρνουν τιμές στο υποπρόγραμμα blockdata CONSTANTS και αφορούν, όπως ήδη σημειώθηκε σταθερές, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σε περισσότερα από ένα υποπρογράμματα του κώδικα SODIUM\_LISP (ή γενικότερα περισσότερο από μία φορά).

Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 6-7 παρουσιάζονται όσες από τις μεταβλητές του κώδικα δεν συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα 6-1, των οποίων η γνώση είναι απαραίτητη σε εκείνον το χρήστη που επιθυμεί να ασχοληθεί σε βάθος με την προγραμματιστική υλοποίηση του πλέγματος των εξισώσεων για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος. Επιπλέον σε ειδική παράγραφο του Παραρτήματος III παρουσιάζονται με ακόμα πιο λεπτομερή τρόπο όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα και κατά το δυνατόν με τη σειρά που αυτά χρησιμοποιούνται. Η παρουσίαση εστιάζει στα θέματα μεταβλητών εισόδου, μεταβλητών εξόδου, τοπικών μεταβλητών και επικοινωνίας με άλλα υποπρογράμματα.

## **6.8 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά των υποπρογραμμάτων του κώδικα.**

Όπως και στους κώδικες LIGHT\_WASP και HEAVY\_WASP έτσι και στον κώδικα SODIUM\_LISP τα υποπρογράμματα του κώδικα είναι δυνατό να καταταγούν σε υποσύνολα με τη χρησιμοποίηση διαφόρων κριτηρίων, όπως ο βαθμός αλληλεξάρτησης τους (ισοδύναμα δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο αυτά επικοινωνούν), η θέση του κάθε ενός από αυτά στη συνολική δομή του κώδικα και τέλος ο ρόλος και τα καθήκοντά τους μέσα σε αυτόν. Η κατάταξη αυτή αναπτύσσεται στις επόμενες τρεις παραγράφους.

### **6.8.1 Βαθμός αλληλεξάρτησης των υποπρογραμμάτων.**

Για να αποδοθεί η έννοια της αλληλεξάρτησης, τα υποπρογράμματα μπορούν να καταταγούν σε **ανεξάρτητα, μετρίως εξηρημένα** και τέλος σε **πλήρως**

**εξηρητημένα υποπρογράμματα.** Η κατάταξη αυτή γίνεται σύμφωνα με τον τρόπο με τον οποίο ένα υποπρόγραμμα επικοινωνεί με τις συνεργαζόμενες υπορουτίνες (subroutines) και συναρτήσεις (functions). Ο γράφων επιδίωξε κατά την κατάστρωση αυτών των υποπρογραμμάτων να εφαρμόσει τον ακόλουθο τύπο επικοινωνίας:

**Τα υποπρογράμματα δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου από εντολές COMMON (Labelled Common Blocks) και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους (Parameter List).**

Όπως ήταν φυσικό αυτός ο τρόπος επικοινωνίας δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοσθεί σε όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα διότι αυτό δεν αποτελούσε πάντοτε την ορθότερη λύση. Δημιουργήθηκαν έτσι και ορισμένες παραλλαγές, σύμφωνα με τις οποίες μπορούν να καταταγούν τα υποπρογράμματα.

Υπενθυμίζεται ότι οι μεταβλητές (ή παράμετροι) ενός υποπρογράμματος από πλευράς τοπικού της γλώσσας FORTRAN εντάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- μεταβλητές εισόδου,
- μεταβλητές εξόδου,
- τοπικές μεταβλητές, και τέλος
- κοινές μεταβλητές όλων των υποπρογραμμάτων, οι οποίες καταλαμβάνουν κοινή περιοχή μνήμης (common memory area -μεταβλητές των Labelled Common Blocks)

Η εννοιολογική σημασία των τριών πρώτων κατηγοριών μεταβλητών είναι λίγο ως πολύ σαφής. Για τις μεταβλητές όμως της τέταρτης κατηγορίας υπάρχει μεγάλη προγραμματιστική ελευθερία. Αυτό σημαίνει ότι οι COMMON μεταβλητές μπορούν να έχουν «διττό» ρόλο, μπορούν να παίζουν δηλαδή τόσο το ρόλο της μεταβλητής εισόδου όσο και εκείνο της μεταβλητής εξόδου.

Ειδικά τώρα για όσα υποπρογράμματα δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου με τη βοήθεια εντολών COMMON, αυτές (οι εντολές) μπορούν να διαχωρισθούν στις

**COMMON** εντολές επικοινωνίας (με χαρακτηριστικούς κωδικούς /Ki/,  $i = 1, 2, 3$  και 4 και /PROPERTY/,  $i = 1, 2$  και 3)

και στις

**COMMON** εντολές σταθερών (με χαρακτηριστικό κωδικό /Zi/,  $i = 1, 2, 3, \dots$  και 11)

Μέσω COMMON εντολών σταθερών δίνονται, όπως γίνεται κατανοητό, τιμές μόνο σε μεταβλητές εισόδου που αντιπροσωπεύουν σταθερές του κώδικα (σταθερές για τις συσχετίσεις, όρια περιοχών ισχύος κτλ).

Αντίθετα μέσω COMMON εντολών επικοινωνίας παίρνουν τιμές τόσο διάφορες μεταβλητές εισόδου σε υποπρογράμματα, όσο και πολλές μεταβλητές εξόδου από αυτά. Οι COMMON εντολές επικοινωνίας είναι κοινές για πολλά από τα υποπρογράμματα και αποκαθιστούν την τυπική τους επαφή καθώς και την αρμονική τους συνεργασία.

### **6.8.2 Ανεξάρτητα υποπρογράμματα.**

Ως ανεξάρτητα χαρακτηρίζονται τα υποπρογράμματα που δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου αποκλειστικά μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους. Αν μάλιστα είναι ακριβώς γνωστή η εργασία που έχει ανατεθεί σε αυτά τα υποπρογράμματα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τα αντικαταστήσει με άλλα δικής του επινόησης που να κάνουν όμως την ίδια ακριβώς εργασία. Σε άλλη περίπτωση δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να τα χρησιμοποιήσει σε δικούς του εντελώς διαφορετικούς κώδικες. Τα ανεξάρτητα υποπρογράμματα δηλαδή μπορούν να θεωρούνται από τον χρήστη ως μαύρα κουτιά (black boxes). Ιδιαίτερα αν πρόκειται για μαθηματικά υποπρογράμματα (όπως για παράδειγμα η μέθοδος Newton - Raphson για την αριθμητική επίλυση πεπλεγμένων εξισώσεων), η μέθοδος Ridders για την παραγωγή συναρτήσεων ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει στη θέση τους έτοιμα υποπρογράμματα από βιβλιοθήκες μαθηματικών υποπρογραμμάτων (π.χ. IMSL -International Mathematical and Statistical Library κτλ), άσχετα αν κάτι τέτοιο υπονομεύει τελικά την γενικότερη ανεξαρτησία του παρουσιαζόμενου κώδικα. Τονίζεται ότι ο κώδικας **SODIUM\_LISP** δεν καλεί υποπρογράμματα από βιβλιοθήκες (**Library Free Code**).

Στην περίπτωση μας ανεξάρτητη είναι η υπορουτίνα SOLVE, η υπορουτίνα INTEGRAL και το υποπρόγραμμα συνάρτησης FUNCTION DFRIDR.

### **6.8.3 Μετρίως εξηρημένα υποπρογράμματα.**

Ως μετρίως εξηρημένα χαρακτηρίζονται τα υποπρογράμματα που τηρούν το τυπικό επικοινωνίας που θεωρήθηκε καταλληλότερο και χρησιμοποιήθηκε περισσότερο. Τα υποπρογράμματα αυτά δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου από εντολές COMMON (Labelled Common Blocks) και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους (Parameter List).

Μικρή εξαίρεση αποτελούν οι συναρτήσεις (functions) οι οποίες γενικά δέχονται τιμές για τις μεταβλητές εισόδου τόσο από εντολές COMMON, όσο και μέσα από τη λίστα παραμέτρων τους και επιστρέφουν τιμές για τις μεταβλητές εξόδου μόνο μέσα από τη λίστα παραμέτρων. Ο λόγος που υιοθετήθηκε αυτή η επικοινωνία για τις functions οφείλεται αφενός στην ανάγκη απόδοσης της έννοιας «συνάρτηση» και προγραμματιστικά και αφετέρου στην εξυπηρέτηση της επικοινωνίας ορισμένων από αυτές με την μαθηματική υπορουτίνα SOLVE.

Άλλη εξαίρεση είναι η κεντρική υπορουτίνα SODIUM\_LISP. Αυτή χρησιμοποιεί COMMON εντολές και λίστα παραμέτρων για να εξυπηρετήσει τόσο την είσοδο όσο και την έξοδο. Παρόλαυτά εντάσσεται στα μετρίως εξηρημένα υποπρογράμματα.

Αν ο χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει ένα από αυτά τα μετρίως εξηρημένα υποπρογράμματα σαν μέρος ενός δικού του διαφορετικού κώδικα θα συναντήσει σημαντικές δυσκολίες για την υπερπήδηση των οποίων δεν απαιτείται μόνο προγραμματιστική εμπειρία αλλά και πολύ καλή γνώση του κώδικα SODIUM\_LISP. Σχετικά ευκολότερη φαίνεται ότι είναι η αποκλειστική χρησιμοποίηση των υπορουτινών VISCOSITYF και CONDUCTIVEF για τον υπολογισμό της δυναμικής συνεκτικότητας και της θερμικής αγωγιμότητας αντίστοιχα αν είναι γνωστή η θερμοκρασία. Το ίδιο ισχύει και για την υπορουτίνα TENSION για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης αν είναι γνωστή η θερμοκρασία κορεσμού. Τα παραπάνω δεν σημαίνουν καθόλου ότι πολλά από τα μετρίως εξηρημένα υποπρογράμματα δεν μπορούν να αφαιρεθούν από τον κώδικα με σκοπό να εξυπηρετήσουν την εξοικονόμηση στη χρήση κεντρικής μνήμης ή την αύξηση της ταχύτητας υπολογισμών στο υπολογιστικό σύστημα του χρήστη (αν και είναι φανερό ότι η αύξηση της ταχύτητας ανταπόκρισης του κώδικα SODIUM\_LISP μπορεί να γίνει με

την κατάλληλη χρήση του διακόπτη JP). Ο τρόπος με τον οποίο ο κώδικας SODIUM\_LISP μπορεί να λειτουργήσει και μετά την αφαίρεση πολλών από τις υπορουτίνες του θα εξετασθεί σε επόμενη παράγραφο. Τα ονόματα των μετρίως εξηρητημένων υποπρογραμμάτων του κώδικα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-8.

#### **6.8.4 Πλήρως εξηρητημένα υποπρογράμματα.**

Ως πλήρως εξηρητημένα υποπρογράμματα χαρακτηρίζονται εκείνα τα οποία επικοινωνούν με τα συνεργαζόμενα υποπρογράμματα μόνο διά μέσου εντολών COMMON. Στην περίπτωση που εξετάζεται αυτό είναι το υποπρόγραμμα blockdata CONSTANTS. Οποιαδήποτε, έστω και μικρή, επέμβαση σε αυτό το υποπρόγραμμα πρέπει να γίνεται από τον χρήστη μόνο αν κρίνεται απόλυτα απαραίτητη και με πάρα πολλή προσοχή. Η αθέλητη εισαγωγή κάποιου εκ πρώτης όψεως αμελητέου λάθους σε αυτό το υποπρόγραμμα είναι δυνατόν να ανατρέψει την ορθότητα των υπολογισμών στο σύνολο του κώδικα ή ακόμα και να οδηγήσει την εκτέλεση του κώδικα σε μοιραία λάθη (fatal errors -κυρίως διαιρέσεις με το μηδέν και υψώσεις αρνητικών σε ρητές δυνάμεις).

#### **6.9 Η δομική ευελιξία του κώδικα.**

Κατά τη σύνταξη του κώδικα χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονες αρχές δομημένου προγραμματισμού. Επιδιώχθηκε η τμηματική δομή του κώδικα (code modular design) με τρόπο ώστε, αν ο χρήστης το επιθυμεί, να επιλέγει μόνο εκείνες τις υπορουτίνες, που είναι απαραίτητες στους υπολογισμούς του. Με βάση αυτή τη λογική τα υποπρογράμματα του κώδικα μπορούν να κατατάσσονται σε ομάδες που πραγματοποιούν συναφείς λειτουργίες. Η διάκριση αυτή επιτρέπει το διαχωρισμό των υποπρογραμμάτων σε **απαραίτητα** και **προαιρετικά**.

Απαιρεία θεωρούνται τα υποπρογράμματα χωρίς τα οποία ο κώδικας δεν μπορεί να λειτουργήσει. Αντίθετα προαιρετικά είναι τα υποπρογράμματα που μπορούν να αφαιρεθούν από τον κώδικα· αυτό βέβαια έχει ως συνέπεια τη μείωση του αριθμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου που είναι δυνατόν να υπολογισθούν. **Αν αφαιρεθεί από τον κώδικα το σύνολο των προαιρετικών υποπρογραμμάτων τότε η μόνη ιδιότητα που μπορεί αυτός να υπολογίσει με δεδομένα την πίεση και τη θερμοκρασία είναι ο ειδικός όγκος του Νατρίου σε κατάσταση κορεσμού.** Τα ονόματα των προαιρετικών υποπρογραμμάτων του κώδικα συγκεντρώνονται στον

Πίνακα 6-9, όπου σημειώνονται επίσης και οι μετατροπές που πρέπει να γίνουν στα απαραίτητα υποπρογράμματα του κώδικα για να επιτευχθεί η αφαίρεσή τους. Όλα τα υπόλοιπα υποπρογράμματα χαρακτηρίζονται απαραίτητα για λόγους που γίνονται προφανείς αν ανατρέξει κανείς στο ρόλο τους που περιγράφεται στην παράγραφο «Λειτουργία του κώδικα».

Παρατηρείται ότι τα προαιρετικά υποπρογράμματα συμπεριλαμβάνουν αποκλειστικά τις υπορουτίνες που υπολογίζουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του Νατρίου εκτός βέβαια από τον ειδικό του όγκο.



## **Διαγράμματα του Κεφαλαίου**

**Διάγραμμα 6-1 :** Η 105<sup>η</sup> Συνεδρίαση της Επιτροπής ΝΕΑ του ΟΟΣΑ σχετικά με τους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος 4<sup>ης</sup> Γενιάς (Οκτώβριος 2002).

# STATUS REPORT ON GIF ACTIVITIES AND NEA INVOLVEMENT

GIF: Generation IV International Forum

Thierry Dujardin  
Deputy Director  
Science and Development

## OVERVIEW OF THE PRESENTATION

- ◆ Background
- ◆ Technology Roadmap
- ◆ R & D Phase

## WHAT IS GENERATION IV ?

In short, "Generation IV" refers to the development and demonstration of one or more new nuclear energy systems that offer advantages in the areas of

- ◆ sustainability,
- ◆ economics,
- ◆ safety and reliability,
- ◆ proliferation resistance and physical protection

*and could be deployed commercially by 2030*

## TECHNOLOGY ROADMAP

The Generation IV Technology Roadmap has been prepared by GIF members countries to identify

- ◆ the most promising reactor systems and fuel cycle concepts,
- ◆ the R&D necessary to advance these concepts for potential commercialisation

## NEA INVOLVEMENT

In May 2001 the Steering Committee

- ◆ endorsed the participation of the NEA, at the request of the GIF members, in the Roadmap
- ◆ noted that funding of this NEA participation would be made through voluntary contributions from GIF participants
- ◆ noted that the ultimate goal of NEA participation in the roadmap phase was to offer a robust international framework for joint R&D projects to be developed in the subsequent phase

## OVERALL GEN IV ROADMAP ORGANISATION

NERAC

GEN IV Roadmap  
NERAC Subcommittee  
(GRNS)

Technical Community

- Industry
- Universities
- National Laboratories



OECD

Roadmap Integrating  
Team (RIT)

Evaluation/Methodology

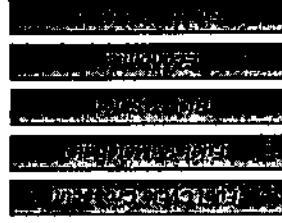
Water-Cooled Reactors

Gas-Cooled

Liquid-Metal-Cooled

Non-Classical Concepts

Generation IV International Forum  
(GIF)



- 100 technical experts contributing

## THE TECHNOLOGY ROADMAP FOR GEN IV SYSTEMS

- ◆ Roadmap summary (~20 p)
  - > Written for non-technical audience
  - > Sets the context and summarises recommendations
- ◆ Technical Roadmap Report (~100 p)
  - > Written for nuclear technical audience
  - > Provides technical descriptions, analysis, and justifications
- ◆ Annexes

## GENERATION IV CONCEPTS

<i>Acronym</i>		<i>Spectrum</i>	<i>Fuel cycle</i>
SFR	Sodium Cooled Fast R.	Fast	Closed
LFR	Lead Alloy Cooled R.	Fast	Closed
GFR	Gas Cooled Fast R.	Fast	Closed
VHTR	Very High Temperature R.	Thermal	Once-through
SCWR	Supercritical Water Cooled	Th. & F.	Once-t. & Cl.
MSR	Molten Salt R.	Thermal	Closed



## INTERESTS IN GEN IV CONCEPTS

GIF Selection	Argentina	Brazil	Canada	France	Japan	Korea	South Africa	Switzerland	United Kingdom	USA
SFR	?	?	-	-	H*	H	-	-	M	M
LFR	?	?	-	L	L	L	-	H*	-	M
VHTR	?	?	-	H*	H	M	M	M	H	M
GFR	?	?	-	H	M	L	M	H	H	H*
SCWR	?	?	H*	M	M	H	-	H	L	H
MSR	?	?	-	L	-	L	-	-	L	L

H: High    M: Medium  
 L: Low    -: No



THD / 15 October 2002

 105<sup>th</sup> Session of the Steering Committee

9

## PRINCIPLES OF R&D COLLABORATIONS

- ◆ **General objective:** bring Gen IV concepts to technical maturity
- ◆ **R&D final objective:** demonstration, after viability and performance phases
- ◆ **Perspective:** large industrial deployment by 2020–2030
- ◆ **Key technologies:** a restricted number of technical gaps
- ◆ **Resources:** higher effort than during concept integration

THD / 15 October 2002

 105<sup>th</sup> Session of the Steering Committee

10

## PRINCIPLES OF R&D ORGANISATION (1)

### *Combining 2 aspects*

- ① Specific R&D projects  
to develop and/or prove the keys technologies  
in each concept (some cross-cutting)
  - funding countries (including non-GIF countries)  
own the property of the results
  - each project will have its own Steering Committee  
and Secretariat

*A first list of projects and participants  
is under preparation (Roadmap R&D plan)*

## PRINCIPLES OF R&D ORGANISATION (2)

### *Combining 2 aspects*

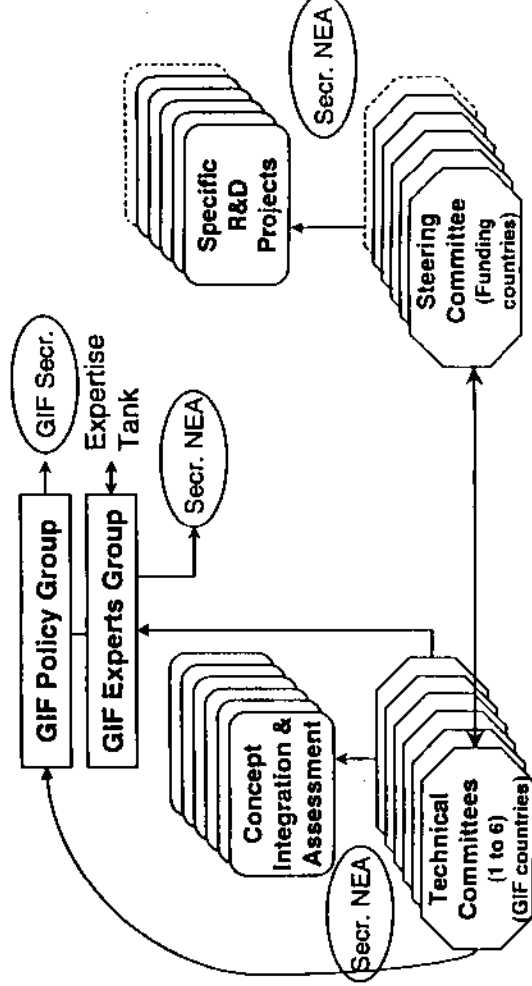
- ② Continuous Concept Integration and Assessment  
to check the viability and performances of each concept
  - success/difficulties of the development of the key tech.
  - update of the figures of merit used in the concept  
selection process (Roadmap)
- Technical Committees (one by concept) reporting  
to the GIF Policy Group
- Each Technical Committee will have its own operating  
rules and its own Secretariat

## POTENTIAL NEA INVOLVEMENT IN THE R&D ORGANISATION (1)

At its Tokyo meeting (19/20 September 2002),  
the GIF Policy Group requested NEA  
to support the R&D phase by providing a Secretariat to:

- the specific R&D projects
- the Technical Committees
- the GIF Experts Group

## R&D ORGANISATION





## POTENTIAL NEA INVOLVEMENT IN THE R&D ORGANISATION (2)

- ◆ This potential NEA role
  - is consistent with the NEA missions
  - is consistent with the previous information given to the Steering Committee
  - would be totally funded by voluntary contributions
- ◆ Detailed discussions just started (precise scopes, resources needed, ...)
  - ➔ *next Steering Committee*

## NEA AND GIF - SUMMARY

- ◆ Technology Roadmap completed
  - Concepts selected
  - R&D phase well prepared
  - NEA involvement efficient, funded by a voluntary contribution, and endorsed by the Steering Committee
- ◆ GIF: a strong international framework for R&D
  - NEA support requested
  - NEA experience and missions consistent with further involvement in the R&D phase
  - Detailed discussions started

## Πίνακες του Κεφαλαίου

**Πίνακας 6-1:** Σύμβολα, ονοματολογία και μονάδες βασικών μεταβλητών.

AF	ταχύτητα του ήχου $a$ στο κορεσμένο υγρό σε $m/s$ (F - Fluid)
CPF	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p$ του κορεσμένου υγρού υπό σταθερή πίεση σε $kJ/(kgK)$ (Heat Capacity of Fluid at constant Pressure)
CPG	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_p$ του κορεσμένου ατμού υπό σταθερή πίεση σε $kJ/(kgK)$ (Heat Capacity of Gas at constant Pressure)
CVF	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_v$ του κορεσμένου υγρού υπό σταθερό όγκο σε $kJ/(kgK)$ (Heat Capacity of Fluid at constant Volume)
CVG	ειδική θερμοχωρητικότητα $c_v$ του κορεσμένου ατμού υπό σταθερό όγκο σε $kJ/(kgK)$ (Heat Capacity of Gas at constant Volume)
HF	ειδική ενθαλπία $h$ του κορεσμένου υγρού σε $kJ/kg$
HG	ειδική ενθαλπία $h$ του κορεσμένου ατμού σε $kJ/kg$
HFG	λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης $\Delta H_g$ σε $kJ/kg$ (F $\equiv$ Fluid, G $\equiv$ Gas)
IBMF	ισοθερμοκρασιακή συμπίεσιτότητα $K_T$ του κορεσμένου υγρού σε $MPa^{-1}$ (Isothermal Bulk Modulus of Fluid)
IBMG	ισοθερμοκρασιακή συμπίεσιτότητα $K_T$ του κορεσμένου ατμού σε $MPa^{-1}$ (Isothermal Bulk Modulus of Gas)
IS	δείκτης σύγκρισης με την κατάσταση κορεσμού (S $\equiv$ Saturation)
JP	καθορισμός των ζητούμενων ιδιοτήτων
JR	καθορισμός της περιοχής του διαγράμματος PT (R $\equiv$ Region)
JS	καθορισμός των μεταβλητών εισόδου
KF	θερμική αγωγιμότητα $\lambda$ του υγρού σε $W/(mK)$
MF	δυναμική συνεκτικότητα $\eta$ του υγρού σε $kg/(ms)$
P	πίεση $P$ σε bar
SIGMAFG	επιφανειακή τάση $\sigma$ μεταξύ υγρού και ατμού στην κατάσταση κορεσμού σε $N/m^2$
SF	ειδική εντροπία $s$ του κορεσμένου υγρού σε $kJ/(kgK)$
SG	ειδική εντροπία $s$ του κορεσμένου ατμού σε $kJ/(kgK)$
SVF	ειδικός όγκος $v$ του κορεσμένου υγρού σε $m^3/kg$ (Specific Volume of Fluid)

SVG	ειδικός όγκος $v$ του κορεσμένου ατμού σε $m^3/kg$ (Specific Volume of Gas)
T	θερμοκρασία $T$ σε μονάδες K
TS	θερμοκρασία κορεσμού $T_s$ σε μονάδες K (Saturation Temperature)
UF	ειδική εσωτερική ενέργεια $u$ του κορεσμένου υγρού σε $kJ/kg$
UG	ειδική εσωτερική ενέργεια $u$ του κορεσμένου ατμού σε $kJ/kg$

**Σημείωση:**

Το επίθεμα **F**  $\equiv$  Fluid αναφέρεται βέβαια κυρίως στις θερμοφυσικές ιδιότητες της κορεσμένης υγρής φάσης αλλά στην περίπτωση των ιδιοτήτων μεταφοράς καλύπτει και τις ιδιότητες του υγρού.

Το επίθεμα **G**  $\equiv$  Gas αναφέρεται στις θερμοφυσικές ιδιότητες της κορεσμένης ατμώδους φάσεως.

**Πίνακας 6-2: Υπολογισμός ιδιοτήτων ανάλογα με τις τιμές του διακόπτη JP.**

JP = 0      δεν υπολογίζεται καμία ιδιότητα,

JP = 1 = 2<sup>0</sup>      υπολογίζεται η εσωτερική ενέργεια,

JP = 2 = 2<sup>1</sup>      υπολογίζονται η ενθαλπία και η εντροπία,

JP = 4 = 2<sup>2</sup>

υπολογίζονται η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση, η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο, η ταχύτητα του ήχου για το κορεσμένο υγρό, και η ισοθερμοκρασιακή συμπίεστότητα,

JP = 8 = 2<sup>3</sup>

υπολογίζονται η δυναμική συνεκτικότητα και η θερμική αγωγιμότητα

JP = 16 = 2<sup>4</sup>      υπολογίζεται η επιφανειακή τάση, και

JP = 32 = 2<sup>5</sup>      φυλάσσεται για μελλοντική χρήση

Ο διακόπτης JP καθορίζει ποιές ιδιότητες ζητάει ο χρήστης να υπολογισθούν από τον κώδικα. Ο διακόπτης αυτός μπορεί να πάρει τις ακέραιες τιμές από 0 έως και 63. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν κάποιο άθροισμα των αριθμών 0, 2, 4, 8, 16 και 32 - δηλαδή ισοδύναμα των αριθμών 0, 2<sup>0</sup>, 2<sup>1</sup>, 2<sup>2</sup>, 2<sup>3</sup>, 2<sup>4</sup> και 2<sup>5</sup>. Κάθε τέτοιο δυαδικό άθροισμα εξυπηρετεί τον με μοναδικό τρόπο τον προσδιορισμό του συνδυασμού των ιδιοτήτων που ζητούνται.

**Πίνακας 6-3: Τιμές του δείκτη IS.**

IS είναι 0

όταν η πίεση ή/και η θερμοκρασία εισόδου είναι υπερκρίσιμες

IS είναι 1

όταν για αυτή την πίεση εισόδου υπάρχει κατάσταση κορεσμού. Υπολογίζεται η αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού σε μονάδες K.

**Πίνακας 6-4: Πίνακας λειτουργίας του κώδικα.**

**Κλήση του κώδικα:**

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)  
DOUBLE PRECISION IBMF,IBMG,KF,LACFG,MF  
CHARACTER\*3 AG,KG,MG  
COMMON/PROPERTY1/SVF,HF,UF,CPF,CVF,SF,IBMF,AF,KF,MF  
COMMON/PROPERTY2/SVG,HG,UG,CPG,CVG,SG,IBMG,AG,KG,MG  
COMMON/PROPERTY3/HFG,SIGMAFG,LACFG  
CALL SODIUMLI\_SP (JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS)

**Μεταβλητές:**

1. αν JS = 1 με δεδομένα P,T υπολόγισε τις ιδιότητες που ζητούνται με το διακόπτη JP (Πίνακας 6-2)
2. με τον διακόπτη JP καθόρισε τις ζητούμενες θερμοδυναμικές ιδιότητες και ιδιότητες μεταφοράς
3. P είναι η πίεση εισόδου
4. T είναι η θερμοκρασία εισόδου
5. TS είναι η θερμοκρασία κορεσμού
6. SVF είναι ο ειδικός όγκος του κορεσμένου υγρού
7. SVG είναι ο ειδικός όγκος του κορεσμένου ατμού
8. JR είναι ο δείκτης που πληροφορεί σε ποιό σημείο του διαγράμματος PT βρίσκεται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου. Για τον κώδικα SODIUM\_LISP είναι πάντοτε JR = 6.
9. IS είναι ο δείκτης που πληροφορεί πόσο κοντά στην κατάσταση κορεσμού βρίσκονται η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου (Πίνακας 6-3).
10. Άλλες μεταβλητές σύμφωνα με τον Πίνακα 6-1.

**Πίνακας 6-5: Πίεση και θερμοκρασία κορεσμού του Νατρίου, όπως υπολογίζονται από τον κώδικα SODIUM\_LISP.**

Temperature (K)	Pressure (MPa)
900	.005148
1000	.019946
1100	.060162
1200	.150429
1300	.325690
1400	.629849
1500	1.113042
1600	1.828230
1700	2.827800
1800	4.160605
1900	5.869719
2000	7.990940
2100	10.552006
2200	13.572403
2300	17.063617
2400	21.029707

**Πίνακας 6-6: Πίεση και θερμοκρασία κορεσμού του Νατρίου όπως αυτές δίνονται από τους Fink J.K. και Leibowitz L., 1995.**

Vapor Pressure of Saturated Sodium

Temperature (K)	Pressure (MPa)	Pressure (atm)
400	$(1.80 \times 10^{-10})^*$	$(1.78 \times 10^{-7})$
500	$(8.99 \times 10^{-8})$	$(8.87 \times 10^{-5})$
600	$(5.57 \times 10^{-6})$	$(5.49 \times 10^{-3})$
700	$(1.05 \times 10^{-4})$	$(1.04 \times 10^{-2})$
800	$(9.41 \times 10^{-3})$	$(9.28 \times 10^{-1})$
900	$5.147 \times 10^{-1}$	$5.080 \times 10^1$
1000	$1.995 \times 10^1$	0.1969
1100	$6.016 \times 10^2$	0.5937
1200	0.1504	1.485
1300	0.3257	3.214
1400	0.6298	6.216
1500	1.113	10.98
1600	1.828	18.04
1700	2.828	27.91
1800	4.161	41.06
1900	5.870	57.93
2000	7.991	78.86
2100	10.55	104.1
2200	13.57	133.9
2300	17.06	168.4
2400	21.03	207.5
2500	(25.47)	(251.3)
2503.7	(25.64)	(253.1)

\* Parentheses indicate extrapolated beyond range of experimental data.



**Πίνακας 6-7: Σύμβολα, ονοματολογία και μονάδες δευτερευόντων μεταβλητών (αλφαβητικά).**

AF	ισόθλιπτη διαστολικότητα του κορεσμένου υγρού σε $K^{-1}$ (υπορουτίνες SHF και SIBMF)
AG	ισόθλιπτη διαστολικότητα του κορεσμένου ατμού σε $K^{-1}$ (υπορουτίνες SHG και SIBMG)
APF	συντελεστής θερμικής διαστολής του κορεσμένου υγρού σε $K^{-1}$ (υπορουτίνα SHF)
APG	συντελεστής θερμικής διαστολής του κορεσμένου ατμού σε $K^{-1}$ (υπορουτίνες SHG και SIBMG)
CF	ειδική θερμοχωρητικότητα του κορεσμένου υγρού σε $kJ/(kgK)$ (υποπρόγραμμα συνάρτησης CF, υπορουτίνα ENTROPYF)
CG	ειδική θερμοχωρητικότητα του κορεσμένου ατμού σε $kJ/(kgK)$ (υπορουτίνα SHG)
DF	πυκνότητα του κορεσμένου υγρού σε $kgm^{-3}$ (υπορουτίνα SODIUM_LISP)
DG	πυκνότητα του κορεσμένου ατμού σε $kgm^{-3}$ (υπορουτίνα SODIUM_LISP)
DC	κρίσιμη πυκνότητα σε $kgm^{-3}$
DF	(blockdata CONSTANTS και υποπρόγραμμα συνάρτησης FDENSF) παράγωγος της συνάρτησης F (υπορουτίνα SOLVE)
EPS	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (παίρνει τιμές στην υπορουτίνα CHECKPT)
HFG	λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης σε $kJ/kg$ (υπορουτίνα SODIUM_LISP)
IER	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (βλέπε και την υπορουτίνα CHECKPT)
ITMAX	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (βλέπε και την υπορουτίνα CHECKPT)
KAF	η αδιαβατική συμπεστικότητα του κορεσμένου υγρού σε $MPa^{-1}$ (υπορουτίνες SHF, SIBMF και SOVEF)

LACFG	σταθερή Laplace (υπορουτίνα SODIUM_LISP)
NDEC	ειδική μεταβλητή για την υπορουτίνα SOLVE (βλέπε και την υπορουτίνα CHECKPT)
PC	κρίσιμη πίεση σε bar (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνες FPS και CHECKPT)
PMAX	το άνω όριο της πίεσης λειτουργίας του κώδικα σε bar (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)
PMIN	το κάτω όριο της πίεσης λειτουργίας του κώδικα σε bar (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)
PP	πίεση σε bar (υπορουτίνες CHECKPT και SODIUM_LISP και υποπρογράμματα συνάρτησης FFPS και FTS)
PR	ανηγγμένη πίεση (ως προς την κρίσιμη)
TC	κρίσιμη θερμοκρασία σε K (blockdata CONSTANTS, υπορουτίνες CHECKPT και HEAVY_WASP και functions PRS, FPS και DFPS)
TMAX	το άνω θερμοκρασιακό όριο λειτουργίας του κώδικα σε K (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)
TMIN	το κάτω θερμοκρασιακό όριο λειτουργίας του κώδικα σε K (blockdata CONSTANTS και υπορουτίνα CHECKPT)
TR	ανηγγμένη θερμοκρασία (ως προς την κρίσιμη)
TS	θερμοκρασία κορεσμού σε K
TT	θερμοκρασία σε K

**Πίνακας 6-8: Μετρίως Εξηρητημένα Υποπρογράμματα  
(αλφαβητικά)**

<u>Subroutines</u>	<u>Functions</u>
CHECKPT	CF
CONDUCTIVEF	DFPD
ENTHALPYF	DFPR3
ENTHALPYG	DFPS
ENTROPYF	DFPS1000
ENTROPYF	FDENSF
SHF	FDENSG
SHG	FFPS
SIBMF	FPS
SIBMG FTS	
SODIUM_LISP	
SOVEF	
TENSION	
TOTAL	
VISCOSITYF	

**Πίνακας 6-9: Προαιρετικά υποπρογράμματα**

ΟΝΟΜΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΝΤΟΛΩΝ (~)	ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ
CONDUCTIVEF	15	Τροποποίηση της TOTAL.
ENTHALPYF	20	“
ENTHALPYG	20	“
ENTROPYF	20	“
ENTROPYG	20	“
SHF	40	“
SHG	40	“
SIBMF	30	“
SIBMG	30	“
SOVEF	30	“
TENSION	20	“
VISCOSITYF και βέβαια	40	“
TOTAL	70	Αφαίρεση όλων των προηγούμενων υποπρογραμμάτων. Τροποποίηση της HEAVY_WASP.

## 7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΡΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΒΑΡΕΟΣ ΥΔΑΤΟΣ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΨΥΞΕΩΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΙΣΧΥΟΣ

### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

7.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΡΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΒΑΡΕΟΣ ΥΔΑΤΟΣ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΨΥΞΕΩΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΙΣΧΥΟΣ.....	7-1
7.1	Εισαγωγή. ....	7-1
7.2	Τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος του υπολογισμού της θερμοκρασίας του περιβλήματος πριν από την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως.....	7-4
7.3	Τα αποτελέσματα του προβλήματος του υπολογισμού της θερμοκρασίας του περιβλήματος πριν από την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως. ....	7-8
7.4	Τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος του υπολογισμού της ταχύτητας επαναψύξεως μετά την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως. ....	7-8
7.5	Τα αποτελέσματα του προβλήματος του υπολογισμού της ταχύτητας επαναψύξεως μετά την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως. ....	7-11
7.6	Σχόλια για τα αποτελέσματα του προβλήματος του υπολογισμού της ταχύτητας επαναψύξεως μετά την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως. ....	7-13



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΡΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΒΑΡΕΟΣ ΥΔΑΤΟΣ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΨΥΞΕΩΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΙΣΧΥΟΣ

#### 7.1 Εισαγωγή.

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα σχεδίασης ενός Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος είναι η ανάλυση της θερμοϋδραυλικής του συμπεριφοράς. Πρόκειται για το πλέον βασικό και δυσεπίλυτο πρόβλημα δεδομένου ότι η θερμοϋδραυλική ανάλυση ασχολείται με τη μελέτη των μηχανισμών μεταδόσεως της θερμότητας από τον πυρήνα του αντιδραστήρα προς το ψυκτικό (εργαζόμενο) μέσο και το περιβάλλον, σε συσχέτισμό με τους καθαρά πυρηνικούς μηχανισμούς παραγωγής της ενέργειας στο όλο σύστημα. Με βάση την θερμοϋδραυλική ανάλυση μπορούν να καθορισθούν τρεις πολύ βασικές παράμετροι της λειτουργίας ενός Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος: η παραγόμενη ισχύς, ο βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου και ο συντελεστής ασφαλείας της εγκατάστασης. Ένα ειδικότερο υποσύνολο της θερμοϋδραυλικής ανάλυσης εστιάζει το ενδιαφέρον της στα όσα συμβαίνουν στο δυσμενέστερο από άποψη θερμικής φόρτισης κανάλι του πυρήνα του αντιδραστήρα. Τα προβλήματα που εξετάζονται ειδικά για έναν ΠΑΙ που ψύχεται με ελαφρύ ή βαρύ ύδωρ τίθενται ως εξής:

Δίνεται κανάλι ψύξεως Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος τύπου ζέοντος ύδατος (BWR - Boiling Water Reactor), ή τύπου πεπεσμένου ύδατος (PWR – Pressurized Water Reactor), με ράβδο πυρηνικού καυσίμου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του. Η κατανομή της ροής των νετρονίων στη ράβδο του πυρηνικού καυσίμου, θεωρείται γνωστή και δεδομένη σε όλο το μήκος του καναλιού. Το ψυκτικό μέσο είναι ελαφρύ ή βαρύ ύδωρ. Επιπλέον δεδομένα είναι τα γεωμετρικά στοιχεία του καναλιού και οι συνθήκες εισόδου του ψυκτικού μέσου στο κανάλι. Θεωρείται γνωστή και σταθερή η ταχύτητα μάζας του ψυκτικού μέσου, το κανάλι είναι κατακόρυφο και η ροή γίνεται από κάτω προς τα πάνω σε τυρβώδεις συνθήκες.

## Ζητείται

A) Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας:

- i) Η κατανομή της μέσης θερμοκρασίας του ψυκτικού, και οι λοιπές θερμοδυναμικές ιδιότητες του ψυκτικού κατά μήκους του καναλιού ψύξεως.
- ii) Η θερμοκρασία των τοιχωμάτων της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου κατά μήκος του καναλιού ψύξεως.
- iii) Η πίεση κατά μήκος του καναλιού.
- iv) Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας κατά μήκος του καναλιού, και τέλος
- v) Η κρίσιμη θερμοκή ροή

B) Η μελέτη της διαδικασίας ψύξεως του καναλιού μετά από ατύχημα απόλειας ψυκτικού (LOCA – Loss Of Coolant Accident) για διάφορα "σενάρια", όσο αφορά τις προ του ατυχήματος συνθήκες λειτουργίας, τις συνθήκες κατά τη φάση του ατυχήματος και τις υπάρχουσες δυνατότητες αντιμετώπισής του.

- Όσο αφορά στο (B) ενδιαφέρει τόσο ερευνητικά, όσο και στην πράξη να συγκριθεί η συμπεριφορά των ελαφρού και βαρέος ύδατος, προκειμένου να διαπιστωθούν θερμοϋδραυλικά πλεονεκτήματα του ενός ή του άλλου μέσου, τα οποία –όπως είναι γνωστό– είναι σήμερα και τα κυριότερα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος. Σχετική δημοσιευμένη εργασία υπάρχει μόνο μία στην παγκόσμια βιβλιογραφία (Kaizerman S. et al., 1984), η οποία συγκρίνει τις συνέπειες της σταδιακής μείωσης της παροχής μάζας ελαφρού και βαρέος ύδατος στην είσοδο του καναλιού (α) στην παροχή μάζας στην έξοδο, (β) στο κλάσμα κενού στο σημείο του περιβλήματος της ράβδου που παρουσιάζει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας και (γ) στη χρονική στιγμή κατά την οποία προεγγίζεται η κρίσιμη θερμοκή ροή στο κανάλι. Οι σύγκριση γίνεται χωρίς να χρησιμοποιούνται αξιόπιστες εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος.

Στα πλαίσια Διπλωματικών Εργασιών που εκπονήθηκαν στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ μελετήθηκαν διεξοδικά τα ποπάνω προβλήματα του εδαφίου "Α" σε ό,τι αφορά το ελαφρύ ύδωρ (βλέπε και Χαλούτσος Γ., 1982, Χουσιάδας Χ., 1983, Φωτιάδης Ι., 1984 και Γαλής Μ, 1990). Λόγω της θερμοδυναμικής συγγένειας



του ελαφρού με το βαρύ ύδωρ, δεν αναμένεται σημαντική διαφορά στην συμπεριφορά τους στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Μέρος των ειδικότερων προβλημάτων του εδαφίου "B" αντιμετωπίστηκαν για διάφορα "σενάρια", επίσης στα πλαίσια Διπλωματικών Εργασιών που εκπονήθηκαν στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (βλέπε και Χίνης Ε., 1987 και Κατσιμίχας Σ., 1992). Και οι δύο αυτές Διπλωματικές Εργασίες λύνουν ορισμένα από τα σχετικά προβλήματα για το ελαφρύ ύδωρ.

Στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής χρησιμοποιούνται οι κώδικες LOCA και LOCECC, οι οποίοι αναπτύχθηκαν στην Διπλωματική Εργασία του Χίνη Ε. (1987) για το ελαφρύ ύδωρ, προκειμένου να λυθούν δύο χαρακτηριστικά προβλήματα του εδαφίου "B", ώστε να γίνει η σύγκριση της ψυκτικής συμπεριφοράς του ελαφρού με το βαρύ ύδωρ. Για τις απαιτούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος χρησιμοποιείται ο κώδικας LIGHT\_WASP, όπως αυτός παρουσιάζεται στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής. Αντίστοιχα για τις απαιτούμενες θερμοφυσικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος χρησιμοποιείται ο κώδικας HEAVY\_WASP, όπως αυτός παρουσιάζεται στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Οι κώδικες θερμοφυσικών ιδιοτήτων της παρούσας ΔΔ καλούνται από τους κώδικες LOCA και LOCECC μετά από κατάλληλη τροποποίησή τους από τον γράφοντα, σύμφωνα με τις τις οδηγίες κλήσεως που παρέχονται στο 4<sup>ο</sup> και το 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Το πρώτο ("1") χαρακτηριστικό πρόβλημα περιγράφεται ως εξής:

*Ζητείται να υπολογισθεί η θερμοκρασία του περιβλήματος τον κασμίον μετά το LOCA και πριν την έναρξη της επαναψύξεως για διάφορες τιμές της πίεσεως P και του χρόνου από τη στιγμή του ατυχήματος μέχρι την ενεργοποίηση του Συστήματος Εκτάκτου Ψύξεως του Πυρήνα του Αντιδραστήρα (ECCS – Emergency Core Cooling System). Ο υπολογισμός γίνεται τόσο για ελαφρύ όσο και για βαρύ ύδωρ.*

Το δεύτερο ("2") χαρακτηριστικό πρόβλημα περιγράφεται ως εξής:

*Ζητείται να υπολογισθεί η ταχύτητα επαναψύξεως και ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη επανάψυξη του καναλιού, για διάφορες τιμές της πίεσης, της θερμοκρασίας εισόδου του ψυκτικού στο κανάλι και της παροχής του ψυκτικού. Ο υπολογισμός γίνεται τόσο για ελαφρύ, όσο και για βαρύ ύδωρ.*

## 7.2 Τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος του υπολογισμού της θερμοκρασίας του περιβλήματος πριν από την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως.

Η εφαρμογή του κώδικα LOCA γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν τα εξής δεδομένα:

i) Γεωμετρικά δεδομένα του καναλιού ψύξεως (βέπε και το Διάγραμμα 7-1):

Ακτίνα πυρηνικού καυσίμου  $a = 7.25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Πάχος περιβλήματος καυσίμου  $b = 0.71 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Ύψος ράβδου καυσίμου  $H = 3.66 \text{ m}$

Επιφάνεια διατομής καναλιού  $F_s = 8.71 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

ii) Δεδομένα Υλικών:

Πυρηνικό καύσιμο

$\text{UO}_2$

(με γνωστό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $3.5 \text{ W (mK)}^{-1}$ , πυκνότητα  $10970 \text{ kgm}^{-3}$  και ειδική θερμοχωρητικότητα  $400 \text{ J(kgK)}^{-1}$ )

Υλικό περιβλήματος

Zircaloy-2

(με γνωστό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $15 \text{ W (mK)}^{-1}$ , πυκνότητα  $6570 \text{ kgm}^{-3}$  και ειδική θερμοχωρητικότητα  $350 \text{ J(kgK)}^{-1}$ )

Θερμοκρασιακό όριο αντοχής Zircaloy-2 σε αστοχία  $1477 \text{ K}$

Ψυκτικό

Ελαφρύ και Βαρύ ύδωρ

iii) Θερμυδραυλικά δεδομένα:

Τα απαιτούμενα θερμυδραυλικά δεδομένα του προβλήματος, στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας υπολογίζονται με βάση τον κώδικα που αναπτύχθηκε στην Διπλωματική Εργασία του Χουσιάδα Χ. (1983) και είναι οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες του τοιχώματος της ράβδου πυρηνικού καυσίμου, η θερμοκρασία του ψυκτικού κατά μήκος της ροής, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας και η ανά μονάδα επιφάνειας του περιβλήματος της ράβδου θερμική ισχύς που μεταφέρεται από το περίβλημα στο ψυκτικό μέσο σε κάθε θέση κατά μήκος της ράβδου.

Οι υπολογισμοί για τη λύση του πρώτου επιλύμενου προβλήματος γίνονται με τη βοήθεια των ακόλουθων εύλογων παραδοχών:

α) Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι σταθερός και εξαρτάται από το χρόνο που έχει μεσολαβήσει από το ατύχημα και την τιμή που είχε αυτός στην αμέσως προηγούμενη του ατυχήματος κανονική κατάσταση λειτουργίας.

β) Δεν υπάρχει μετάδοση θερμότητας κατά τη φάση της υπερθερμάνσεως της ράβδου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της.

γ) Η επιφάνεια επαφής περιβλήματος – καυσίμου είναι τέλεια και δεν επηρεάζει τη μετάδοση θερμότητας.

δ) Η παραγόμενη θερμότητα εμφανίζει αξονική συμμετρία, δηλ. σε ίσες αποστάσεις από τον άξονα της ράβδου, για κάποια θέση κατά μήκος της ράβδου, έχουμε ίσα ποσά παραγόμενης θερμότητας, τόσο κατά την κανονική λειτουργία όσο και μετά το ατύχημα.

ε) Μετά το ατύχημα απώλειας ψυκτικού και πριν την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως (φάση υπερθέρμανσης) δεχόμαστε ότι η πίεση στο κανάλι ψύξεως διατηρείται σταθερή αλλά οπωσδήποτε χαμηλότερη από την πίεση κανονικής λειτουργίας στην οποία συνέβη το ατύχημα.

Με βάση αυτές τις παραδοχές το πρόβλημα "1" προσδιορίζεται ως μη μόνιμη ακτινική μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας από το κέντρο της ράβδου προς το περίβλημα και από εκεί προς το εναπομένον ψυκτικό μέσο. Η βασική επιλυόμενη εξίσωση είναι η εξίσωση θερμικής αγωγιμότητας του Fourier εκφρασμένη για το πυρηνικό καύσιμο και το περίβλημα και συνοδευόμενη από τις κατάλληλες οριακές και αρχικές συνθήκες.

Από την πλευρά του μηχανικού ενδιαφέρει η μελέτη του φαινομένου στη δυσμενέστερη περίπτωση του, δηλαδή στο ακτινικό θερμοκρασιακό πεδίο λεπτής "φέτας" της γεωμετρίας ράβδου – καναλιού, στην οποία κατά την κανονική λειτουργία εμφανίζεται η μέγιστη θερμοκρασία στην επιφάνεια του περιβλήματος. Η φέτα αυτή καθορίζεται από επίπεδα που τέμνουν κάθετα τον άξονα συμμετρίας της ράβδου και το πάχος της μπορεί να είναι "ικανοποιητικά" λεπτό ανάλογα και με τον αριθμό κόμβων κατά μήκος της ράβδου που έχει ορισθεί να χρησιμοποιείται στους κώδικες που εφαρμόζονται.

Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το φαινόμενο έχει ως εξής:

**Για το πυρηνικό καύσιμο:**

$$k_c(\partial^2 T/\partial r^2) + (k_c/r)(\partial T/\partial r) + q'''(t) = \rho_f C_{p,c}(\partial T/\partial t) \quad (7-1)$$

όπου

$k_c$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του πυρηνικού καυσίμου [W(mK)<sup>-1</sup>]

$r$  η ακτίνα,  $0 \leq r \leq a$  [m]

$T$  η θερμοκρασία στη θέση  $r$  [K]

$\rho_f$  η πυκνότητα του πυρηνικού καυσίμου [kgm<sup>-3</sup>]

$C_{p,c}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του πυρηνικού καυσίμου [J(kgK)<sup>-1</sup>]

$q'''$  η πυκνότητα παραγόμενης ισχύος στη ράβδο από το πυρηνικό καύσιμο εξαιτίας της παραμένουσας θερμότητας (decay heat) [Wm<sup>-3</sup>]

[όπως υπολογίζεται από τον Χίνη E.(1987)]

**Για το περίβλημα του πυρηνικού καυσίμου:**

$$k_w(\partial^2 T/\partial r^2) + (k_w/r)(\partial T/\partial r) = \rho_w C_{p,w}(\partial T/\partial t) \quad (7-2)$$

όπου

$k_w$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του περιβλήματος [W(mK)<sup>-1</sup>]

$r$  η ακτίνα,  $a \leq r \leq b$  [m]

$T$  η θερμοκρασία στη θέση  $r$  [K]

$\rho_w$  η πυκνότητα του περιβλήματος [kgm<sup>-3</sup>]

$C_{p,w}$  η ειδική θερμοχωρητικότητα του περιβλήματος [J(kgK)<sup>-1</sup>]

Οι οριακές συνθήκες είναι οι παρακάτω:

**Η θερμοκρασία του καυσίμου γίνεται μέγιστη στο κέντρο της ράβδου:**

$$\partial T/\partial r = 0, \quad r = 0$$

Η μετάδοση της θερμότητας στην επιφάνεια διεπαφής πυρηνικού καυσίμου και περιβλήματος γίνεται μόνο με αγωγιμότητα:

$$-k_w \partial T / \partial r = -k_w \partial T_w / \partial r, r=a$$

Η μετάδοση της θερμότητας από το περίβλημα στο ψυκτικό μέσο γίνεται με συναγωγή

$$-k_w \partial T / \partial r = h_{surf}(t) [T_s - T(r)], r = a+b$$

όπου

$T_s$  η θερμοκρασία κορεσμού του ψυκτικού στην πίεση (σταθερή) που επικρατεί στο κανάλι μετά το LOCA [K]

και

$$h_{surf}(t) = h_{surf} e^{-at}. \quad (7-3)$$

με

$h_{surf}(t)$  ο συντελεστής συναγωγής τη χρονική στιγμή  $t$  μετά το LOCA [ $W(mK)^{-1}$ ]

$h_{surf}$  η τιμή του συντελεστή κατά την κανονική λειτουργία πριν από το LOCA [όπως υπολογίζεται από τον Χίνη E.(1987)]

α ο συντελεστής εξασθένησης του  $h_{surf}$  [ $s^{-1}$ ]

ι ο χρόνος μετά το LOCA [s]

**Επίσης:**

Οι τιμές του συντελεστή  $a$  μπορούν να κυμαίνονται μεταξύ 0.05 και  $1 s^{-1}$ .

Η μεταβολή της θερμοκρασίας στο περίβλημα του πυρηνικού καυσίμου είναι γραμμική (δεν παράγεται δηλαδή θερμότητα μέσα στο περίβλημα).

Ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή του ατυχήματος απώλειας ψυκτικού μέχρι την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξης του πυρήνα είναι  $t < 10^4 sec$ .

Τη στιγμή του ατύχηματος ο αντιδραστήρας "σβήνει" με την αυτόματη ενεργοποίηση της πτώσης των ράβδων ελέγχου.

### **7.3 Τα αποτελέσματα του προβλήματος του υπολογισμού της θερμοκρασίας του περιβλήματος πριν από την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως.**

Το πρόβλημα επιλύθηκε για διάφορες πιέσεις που επικρατούν στο κανάλι ψύξεως μετά το ατύχημα απώλειας ψυκτικού. Οι πιέσεις που εξετάστηκαν είναι μεταξύ 1 έως και 40 bar. Διαπιστώθηκε ότι δεν παρατηρείται επίδραση του ενός ή του άλλου ψυκτικού υλικού, του ελαφρού δηλαδή ή του βαρέος ύδατος στο χρόνο στον οποίο η ράβδος φθάνει στο εξωτερικό της μέρος τη θερμοκρασία κατά την οποία το περίβλημα του πυρηνικού καυσίμου αστοχεί. Κατά συνέπεια κανένα από τα δύο αυτά ψυκτικά δεν υπερτερεί σε σχέση με το άλλο όσο αφορά για το πρώτο επιλυόμενο πρόβλημα. Ο Πίνακας 7-1 παρουσιάζει απόσπασμα από τα αποτελέσματα για βαρύ ύδωρ σε πίεση 40 bar. Στον Πίνακα αυτόν η θερμοκρασία T(12) είναι η εξωτερική θερμοκρασία του περιβλήματος της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου. Οι θερμοκρασίες T(i), i = 1, 11 είναι θερμοκρασίες που υπολογίζονται κατά την ακτίνα της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου, βηματικά σε ίσες αποστάσεις των 0.71 mm, από τον άξονα της ράβδου (i = 1), έως λίγο πριν το περίβλημα (i = 11). Με βάση αυτά τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η εξωτερική θερμοκρασία του περιβλήματος της ράβδου φθάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της τη χρονική στιγμή των 815 s μετά το ατύχημα της απώλειας ψυκτικού βαρέος ύδατος. Οι υπολογισμοί έγιναν για  $\alpha = 0.14 \text{ s}^{-1}$ . Το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα λαμβάνεται και αν το ψυκτικό μέσο είναι ελαφρύ ύδωρ.

### **7.4 Τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος του υπολογισμού της ταχύτητας επαναψύξεως μετά την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως.**

Όπως σχολιάστηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, μετά το ατύχημα απώλειας ψυκτικού και πριν την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως του πυρήνα, η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη ράβδο του πυρηνικού καυσίμου γίνεται ολένα και περισσότερο δυσμενής με την πάροδο του χρόνου. Προκειμένου να μην ξεπεραστούν τα θερμοκρασιακά όρια αστοχίας της ράβδου πρέπει σύντομα και

έγκαιρα να ενεργοποιηθεί το σύστημα εκτάκτου ψύξεως του πυρήνα. Ο στόχος του συστήματος αυτού είναι να αποκαταστήσει τη ροή ψυκτικού υγρού μέσα στο κανάλι ψύξεως, το οποίο να βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου καθώς το μήκος της ώστε να βελτιωθούν οι συνθήκες απαγωγής της θερμότητας από αυτή και να μην αστοχήσει το υλικό της. Η αποκατάσταση της υπόψιν ροής ονομάζεται επανάψυξη και θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί όταν ένα λεπτό φιλμ υγρού ψυκτικού σταδιακά προωθούμενο από την είσοδο προς την έξοδο του καναλιού ψύξεως έχει καλύψει τη ράβδο του πυρηνικού καυσίμου καθώς το μήκος, υπό την προϋπόθεση ότι στο σύνολο του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί από την έναρξη του ατυχήματος έως και την πλήρη εγκατάσταση του φιλμ, το περιβλήμα της ράβδου δεν έχει υπερβεί σε κανένα επιφανειακό σημείο του το θερμοκρασιακό όριο ασφαλείας.

Κατά την προώθηση του υγρού φιλμ διακρίνονται κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της ράβδου τρεις περιοχές (βλέπε και Διάγραμμα 7-2):

(α) η υγρή περιοχή (wet region)

(β) η περιοχή υγρού μετώπου (wet front region ή sputtering region)

και

(γ) η ξηρή περιοχή (dry region)

Η ερευνητική κοινότητα συμφωνεί ότι ο κύριος μηχανισμός προώθησής του υγρού μετώπου στη ράβδο είναι εκείνος της αξονικής θερμικής αγωγιμότητας μέσω του περιβλήματος. Με απλά λόγια ο μηχανισμός αυτός μπορεί να συνοψισθεί ως εξής:

Θερμότητα από τη ξηρή περιοχή μεταφέρεται μέσα από το περίβλημα κυρίως προς την περιοχή του υγρού μετώπου και κατά δεύτερο λόγο προς την υγρή περιοχή. Η μεταφορά αυτή συνεπάγεται τη μικρή πτώση της θερμοκρασίας λίγο μπροστά από το υγρό μέτωπο με αποτέλεσμα τη σταδιακή προώθηση και εγκατάστασή του πάνω στη ράβδο.

Ο ρυθμός προώθησής του υγρού μετώπου πάνω στη ράβδο ονομάζεται *ταχύτητα επανάψυξης*. *Χρόνος επανάψυξης* ονομάζεται το χρονικό διάστημα από την έναρξη της διαδικασίας επανάψυξης (είσοδος του ψυκτικού υγρού στο κανάλι) μέχρι τη

στιγμή κατά την οποία το υγρό μέτωπο έχει καλύψει το σημείο του καναλιού που παρακολουθούμε (στην περίπτωση μας το σύνολο του καναλιού με ύψος  $H=3.66$  m).

Ο υπολογισμός της ταχύτητας επαναψύξεως, σύμφωνα με τον Χίνη E. (1987), μπορεί να γίνει με τη βοήθεια είτε της εξισώσεως που παρέχεται από τον Coney M.W.E. (1974), είτε εκείνης που παρέχεται από τον Thompson T.S. (1974).

Σύμφωνα με την εξίσωση του Coney M.W.E. (1974), ισχύει:

$$\mathbf{Bi/Pe = 1.6 \theta_w (\theta_w - 1)} \quad \mathbf{(7-4)}$$

όπου

$$\theta_w = (T_w - T_s)/(T_0 - T_s)$$

Bi ο αριθμός Biot του περιβλήματος,  $Bi = h \delta_w/k_w$

Pe ο αριθμός Peclet του περιβλήματος,  $Pe = u \delta_w/a_w$

με

h ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ περιβλήματος και ψυκτικού στην περιοχή του υγρού μετώπου  $[Wm^{-2}K^{-1}]$

$\delta_w$  το πάχος του περιβλήματος της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου = b [m]

u η ταχύτητα επανάψυξης  $[ms^{-1}]$

$a_w = k_w(\rho_w C_{P,w})$   $[m^2s^{-1}]$

$T_w$  η μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας του περιβλήματος της ράβδου πριν αρχίσει η επανάψυξη [K]

$T_s$  η θερμοκρασία κορεσμού του ψυκτικού μέσου στην πίεση που επικρατεί στο κανάλι [K]

$T_0$  η θερμοκρασία του υγρού μετώπου [K]

Επιπλέον σύμφωνα και με τον Yu K.P. (1979)



$$h (T_0 - T_s)^2 = 10^9 [1 + 0.036 \Delta T_{\text{sub}} w_1 / (\pi D)]^2 (2.04 + 2.48 \log_{10} P) [w_1 / (\pi D)]^{(0.153/P)} \quad (7-5)$$

με

$\Delta T_{\text{sub}}$  η υπόψυξη του ψυκτικού μέσου του συστήματος εκτάκτου ψύξεως στο υγρό μέτωπο [K]

$w_1$  η παροχή μάζας του ψυκτικού του συστήματος εκτάκτου ψύξεως [kgs<sup>-1</sup>]

P η πίεση στο κανάλι κατά τη διάρκεια της επανάψυξης [bar]

Σύμφωνα με την εμπειρική και προσεγγιστική εξίσωση του Thompson T.S. (1974), ισχύει:

$$u^* = \rho_w C_{pw} (T_w - T_0) / (1.34 \cdot 10^7) \quad (7-6)$$

Το πρόβλημα επιλύεται με τις ακόλουθες παραδοχές:

$$1/150 < u < 1/10 \text{ m/sec}$$

$$0.1 < Bi < 200$$

$$T_0 - T_s = 80 \text{ K}$$

## 7.5 Τα αποτελέσματα του προβλήματος του υπολογισμού της ταχύτητας επαναψύξεως μετά την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως.

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τις πιο πάνω παραδοχές με τη χρήση του κώδικα LOCECC (Χίνης Ε., 1987), για διάφορες καταστάσεις ως εξής:

Για θερμοκρασίες τοιχώματος  $T_w$  μεταξύ 600 και 1200 °C.

Για υπόψυξη στο υγρό μέτωπο  $\Delta T_{\text{sub}}$  μεταξύ 0 και 20 K.

Για παροχές μάζας ψυκτικού  $w_1$  μεταξύ 0.01 και 0.04 kgs<sup>-1</sup>

Για πίεση P στο κανάλι κατά τη διάρκεια της επαναψύξεως μεταξύ 1 και 40 bar.

Και φυσικά:

με χρήση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ελαφρού και του βαρέος ύδατος.

Αποτελέσματα όπως προσδιορίζονται από τον κώδικα LOCECC για βαρύ ύδωρ δίνονται στον Πίνακα 7-2. Στον Πίνακα αυτόν είναι TS η θερμοκρασία κορεσμού Ts, TLI η υπόψυξη Δtsub, TEM2 η θερμοκρασία τοιχώματος Tw, WL η παροχή μάζας του ψυκτικού w<sub>1</sub>, BI ο αριθμός Biot, HI ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας h, UU η αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης κατά τη σχέση (7-6), TIMEU ο χρόνος επανάψυξης κατά τη σχέση (7-6), U η αντίστροφη ταχύτητα επανάψυξης κατά τη σχέση (7-4) και TIME ο χρόνος επανάψυξης κατά τη σχέση (7-4). Αντίστοιχοι πίνακες λήφθηκαν και για άλλες συνθήκες ροής και μετάδοσης θερμότητας στην είσοδο του καναλιού για ελαφρύ και βαρύ ύδωρ.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συνολικά για το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ έχουν συνοπτικά ως εξής:

Η ταχύτητα επανάψυξης που υπολογίζεται μέσω της σχέσης (7-6) δεν διαφέρει σημαντικά για τα δύο διαφορετικά ψυκτικά μέσα, το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ.

Αντίθετα η ταχύτητα επανάψυξης που υπολογίζεται μέσω της εμπειρικής σχέσης (7-4) διαφέρει μεταξύ του ελαφρού και του βαρέος ύδατος.

Πιο συγκεκριμένα, το βαρύ ύδωρ επαναψύχει τη ράβδο του καναλιού της εξεταζόμενης γεωμετρίας (ύψους H = 3.66m) έως και 4 δευτερόλεπτα πιο γρήγορα από το ελαφρύ ύδωρ.

Ειδικότερα επισημαίνεται:

- Βελτίωση του χρόνου επανάψυξης παρατηρείται μόνο για πιέσεις μικρότερες από 25 bar.
- Η μέγιστη βελτίωση του χρόνου επανάψυξης (4 sec) παρατηρείται για χαμηλές πιέσεις, μικρές παροχές του ψυκτικού μέσου, μικρές υποψύξεις και μικρές θερμοκρασίες τοιχώματος της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου (βλέπε και το Διάγραμμα 7-3).
- Η βελτίωση του χρόνου επανάψυξης μειώνεται με την αύξηση της πίεσης, την αύξηση της παροχής του ψυκτικού μέσου, την αύξηση της υπόψυξης και την

αύξηση της θερμοκρασίας τοιχώματος της ράβδου του πυρηνικού καυσίμου (βλέπε και το Διάγραμμα 7-4 σε σύγκριση με το Διάγραμμα 7-3).

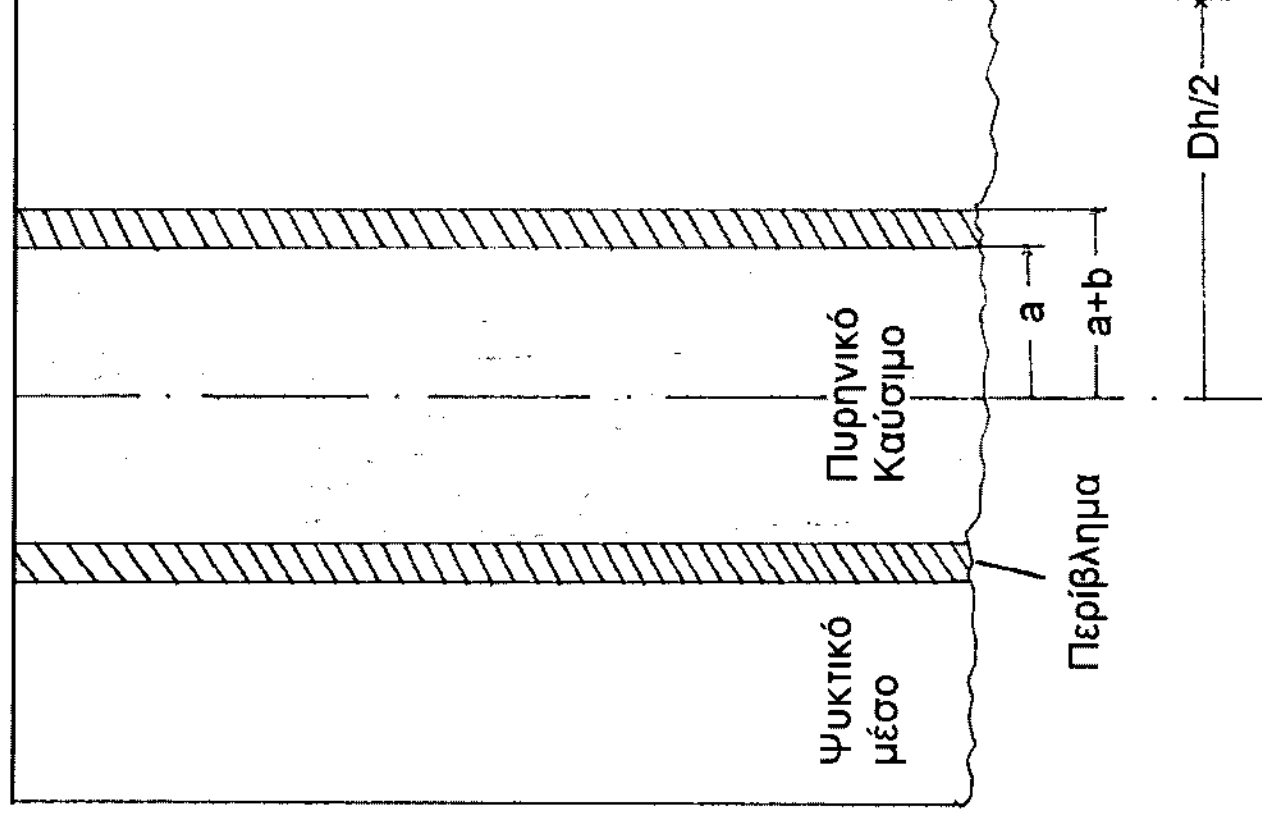
## **7.6 Σχόλια για τα αποτελέσματα του προβλήματος του υπολογισμού της ταχύτητας επανάψυξης μετά την ενεργοποίηση του συστήματος εκτάκτου ψύξεως.**

Η βελτίωση του χρόνου επανάψυξης που παρατηρείται όταν χρησιμοποιείται η σχέση (7-4), (Coney M.W.E., 1974), για χαμηλές πιέσεις, θερμοκρασίες τοιχώματος και παροχές ψυκτικού υγρού, θεωρείται κατ' αρχήν αξιόπιστο αποτέλεσμα, διότι η σχέση (7-4) θεωρείται ότι αναπαριστά γενικά καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα επανάψυξης σε μεγάλη περιοχή συνθηκών της ροής και μεταφοράς θερμότητας. Θεωρείται ότι η σχέση (7-6), (Thompson T.S., 1974) δεν δίνει βελτίωση του χρόνου επανάψυξης διότι πιθανότατα υστερεί στην καλή αναπαράσταση των πειραματικών δεδομένων επανάψυξης στις υπόψιν περιοχές συνθηκών της ροής και μεταφοράς θερμότητας.

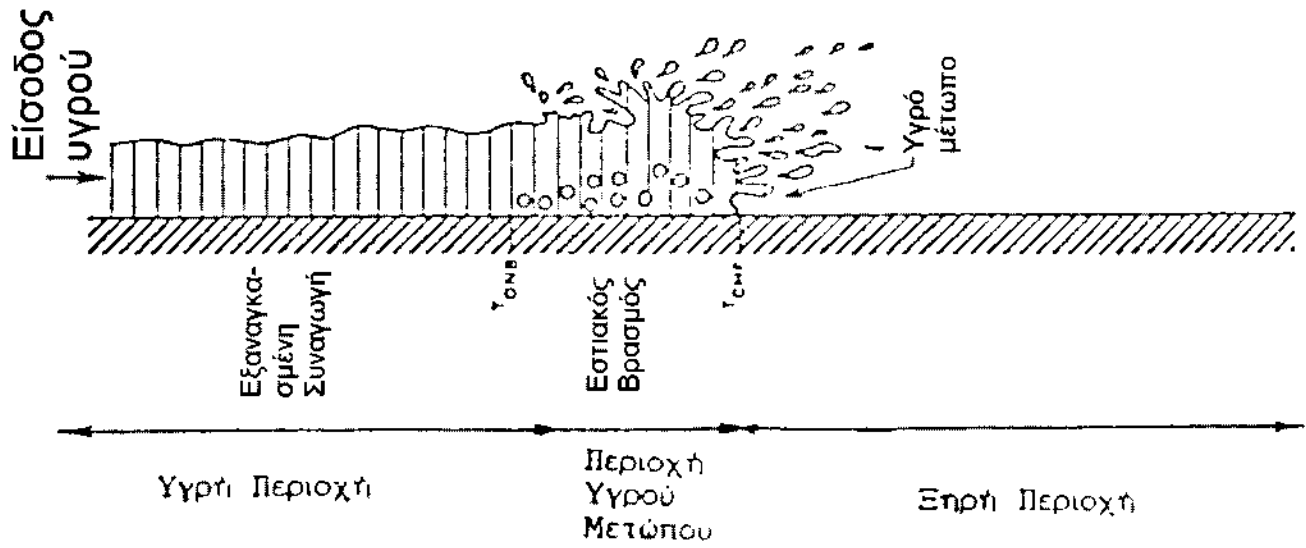
Βελτίωση του χρόνου επανάψυξης δεν παρατηρείται όταν η πίεση γίνει μεγαλύτερη από 25 bar. Αυτό συμβαίνει διότι στις πιέσεις που είναι μικρότερες από 25 bar, η θερμοκρασία κορεσμού του βαρέος ύδατος,  $T_{s,H_2O}$ , είναι γενικά υψηλότερη από τη θερμοκρασία κορεσμού του ελαφρού ύδατος,  $T_{s,LW}$  (βλέπε και το Διάγραμμα 7-5). Η διαφορά αυτή αποδεικνύεται αποφασιστική διότι στην ουσία καθορίζει το μέγεθος της ταχύτητας επανάψυξης μέσω της διαφοράς  $T_0 - T_s$ , την οποία δεχθήκαμε ίση με 80 K.

Για την πλήρη διερεύνηση του φαινομένου απαιτείται η εφαρμογή να γίνει και για άλλες σχέσεις ταχύτητας επανάψυξης πέραν των (7-4) και (7-6) που διατίθενται σήμερα στην σχετική βιβλιογραφία. Ειδικότερα προτείνεται η σχετική διερεύνηση να συμπεριλάβει και τις πλέον σύγχρονες σχέσεις για την ταχύτητα επανάψυξης που παρουσιάζονται από τους Hinis E. και Simopoulos S.E., 2002. Κατά την εφαρμογή των σχέσεων αυτών πρέπει επίσης να διερευνηθεί και η επίδραση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας  $h$ , όπου αυτός παίζει ρόλο στις σχέσεις για την ταχύτητα επανάψυξης. Επομένως πρέπει να διερευνηθεί και ποιες άλλες διατυπώσεις για το  $h$  πέραν της (7-5), εξυπηρετούν την καλύτερη αναπαράσταση των συνθηκών ροής και μεταφοράς θερμότητας που ενδιαφέρουν στο επιλυόμενο πρόβλημα.

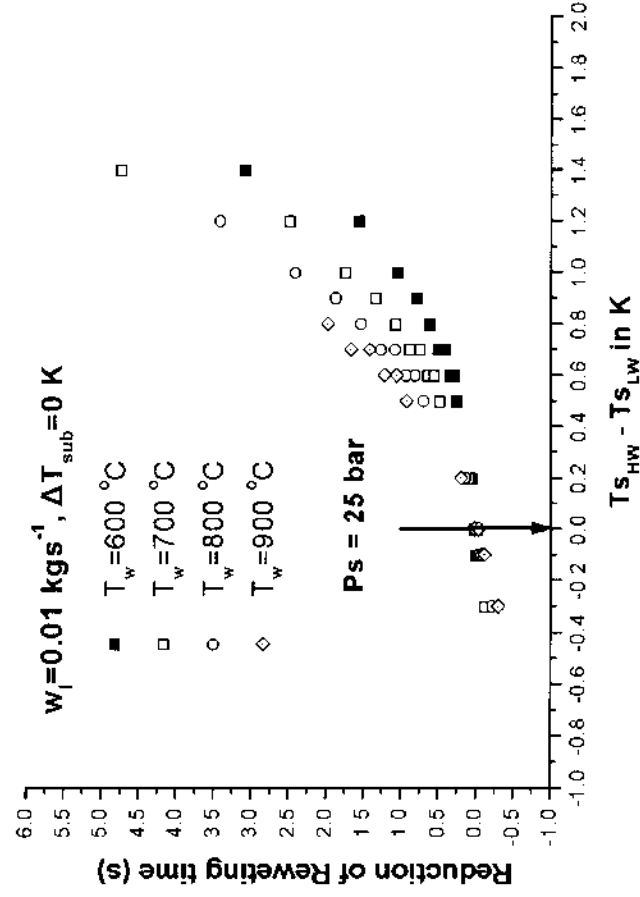
## Διαγράμματα του Κεφαλαίου



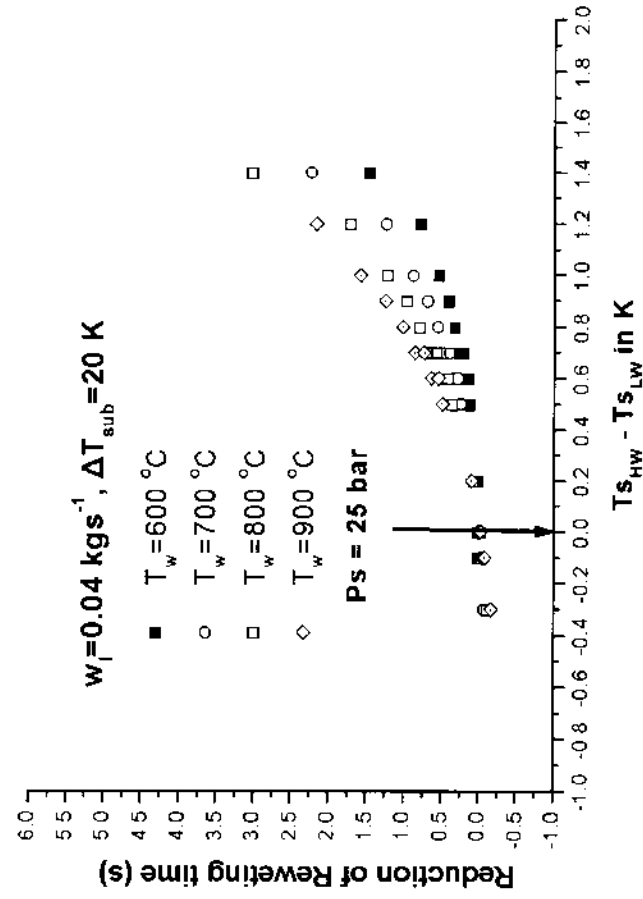
Διάγραμμα 7-1 : Τοπικό κανάλι ψύξεως Πυρηνικού Ανιδραστήρα Ισχύος



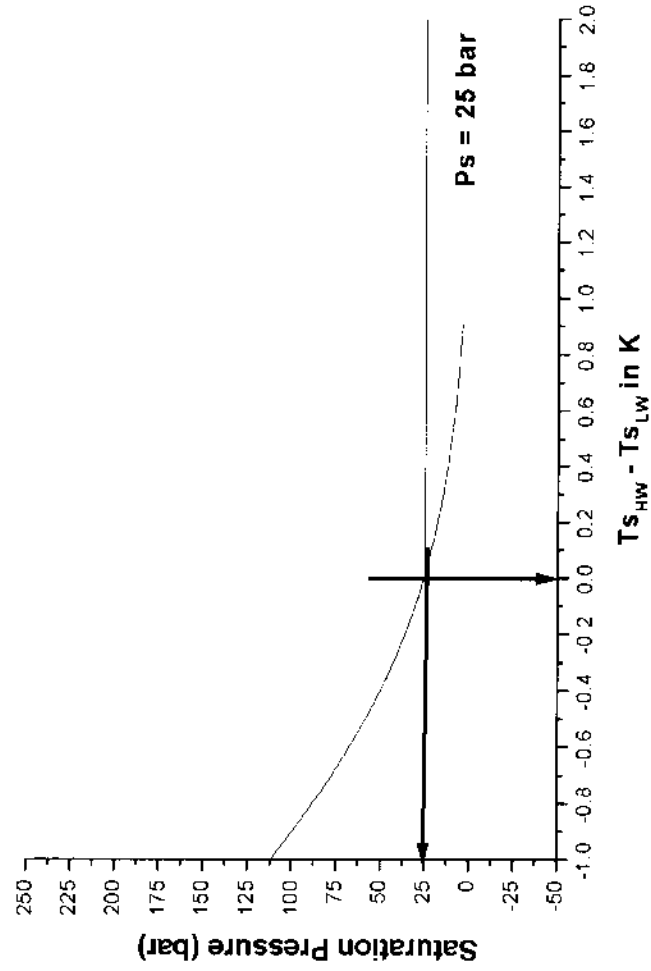
Διάγραμμα 7-2 : Επανάφωξη ράβδου πυρηνικού καυσίμου μετά από ατύχημα απόλειψης ψυκτικού.



**Διάγραμμα 7-3 :** Μείωση του χρόνου επανάψυξης με τη χρήση βαρέος ύδατος για παροχή ψυκτικού  $0.01 \text{ kgs}^{-1}$  και υπόψυξη στο υγρό μέτωπο  $0 \text{ K}$



**Διάγραμμα 7-4 :** Μείωση του χρόνου επανάψυξης με τη χρήση βαρέος ύδατος για παροχή ψυκτικού  $0.04 \text{ kgs}^{-1}$  και υπόψυξη στο υγρό μέτωπο  $20 \text{ K}$



**Διάγραμμα 7-5 :** Διαφορά θερμοκρασιών κορεσμού βαρέος και ελαφρού ύδατος για διάφορες πιέσεις κορεσμού.



Πίνακας 7-1: Αποτελέσματα του κώδικα LOCA για το πρόβλημα του υπολογισμού της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος πριν από την ενεργοποίηση του συστήματος εκτόξευσης (πυρκαχιά χωρίς ψύξη).

Πίνακας του Κεφαλαίου

t (sec)	* q''' (W/m <sup>3</sup> )	* hsurf W/(m <sup>2</sup> K)	* T(1) K	* T(2) K	* T(3) K	* T(4) K	* T(5) K	* T(6) K	* T(7) K	* T(8) K	* T(9) K	* T(10) K	* T(11) K	* T(12) K
775.000	.4065E+07	.3406E-42	1443.5	1443.5	1443.5	1443.4	1443.4	1443.3	1443.2	1443.1	1443.0	1442.8	1442.8	1442.8
776.000	.4063E+07	.2961E-42	1444.4	1444.4	1444.4	1444.4	1444.3	1444.2	1444.2	1444.1	1444.0	1443.8	1443.7	1443.7
777.000	.4062E+07	.2575E-42	1445.3	1445.3	1445.3	1445.2	1445.2	1445.1	1445.0	1444.8	1444.7	1444.6	1444.5	1444.5
778.000	.4061E+07	.2238E-42	1446.2	1446.2	1446.2	1446.1	1446.0	1445.9	1445.8	1445.7	1445.6	1445.5	1445.4	1445.4
779.000	.4060E+07	.1946E-42	1447.1	1447.1	1447.1	1447.0	1447.0	1446.9	1446.8	1446.7	1446.6	1446.5	1446.3	1446.3
780.000	.4058E+07	.1692E-42	1447.9	1447.9	1447.9	1447.8	1447.7	1447.6	1447.5	1447.4	1447.3	1447.2	1447.2	1447.2
781.000	.4057E+07	.1471E-42	1448.8	1448.8	1448.8	1448.8	1448.7	1448.6	1448.6	1448.5	1448.4	1448.2	1448.1	1448.1
782.000	.4056E+07	.1278E-42	1449.7	1449.7	1449.7	1449.6	1449.6	1449.5	1449.4	1449.3	1449.2	1449.1	1448.9	1448.9
783.000	.4054E+07	.1113E-42	1450.6	1450.6	1450.6	1450.5	1450.5	1450.4	1450.3	1450.2	1450.1	1449.9	1449.8	1449.8
784.000	.4053E+07	.9663E-43	1451.5	1451.5	1451.5	1451.4	1451.3	1451.3	1451.2	1451.1	1451.0	1450.9	1450.7	1450.7
785.000	.4052E+07	.8400E-43	1452.3	1452.3	1452.3	1452.2	1452.2	1452.1	1452.0	1451.9	1451.7	1451.6	1451.6	1451.6
786.000	.4050E+07	.7303E-43	1453.2	1453.2	1453.2	1453.1	1453.1	1453.0	1453.0	1452.9	1452.7	1452.6	1452.5	1452.5
787.000	.4049E+07	.6349E-43	1454.1	1454.1	1454.1	1454.0	1454.0	1453.9	1453.8	1453.7	1453.6	1453.4	1453.3	1453.3
788.000	.4048E+07	.5519E-43	1455.0	1455.0	1455.0	1454.9	1454.9	1454.8	1454.7	1454.6	1454.5	1454.4	1454.2	1454.2
789.000	.4047E+07	.4798E-43	1455.8	1455.8	1455.8	1455.8	1455.7	1455.7	1455.6	1455.5	1455.4	1455.3	1455.1	1455.1
790.000	.4045E+07	.4171E-43	1456.7	1456.7	1456.7	1456.6	1456.6	1456.5	1456.4	1456.3	1456.1	1456.0	1456.0	1456.0
791.000	.4044E+07	.3626E-43	1457.6	1457.6	1457.6	1457.5	1457.4	1457.3	1457.2	1457.1	1457.0	1456.9	1456.8	1456.8
792.000	.4043E+07	.3153E-43	1458.5	1458.5	1458.4	1458.4	1458.4	1458.3	1458.2	1458.1	1457.9	1457.7	1457.7	1457.7
793.000	.4042E+07	.2741E-43	1459.3	1459.3	1459.3	1459.3	1459.2	1459.2	1459.1	1459.0	1458.9	1458.8	1458.6	1458.6
794.000	.4040E+07	.2383E-43	1460.2	1460.2	1460.2	1460.2	1460.1	1460.0	1460.0	1459.9	1459.8	1459.6	1459.5	1459.5
795.000	.4039E+07	.2071E-43	1461.1	1461.1	1461.1	1461.0	1461.0	1460.9	1460.8	1460.7	1460.6	1460.4	1460.3	1460.3
796.000	.4038E+07	.1801E-43	1462.0	1462.0	1462.0	1461.9	1461.9	1461.8	1461.7	1461.6	1461.5	1461.4	1461.2	1461.2
797.000	.4036E+07	.1566E-43	1462.8	1462.8	1462.8	1462.7	1462.7	1462.6	1462.5	1462.4	1462.3	1462.1	1462.1	1462.1
798.000	.4035E+07	.1361E-43	1463.7	1463.7	1463.7	1463.6	1463.5	1463.5	1463.4	1463.3	1463.1	1463.0	1463.0	1463.0
799.000	.4034E+07	.1183E-43	1464.6	1464.6	1464.6	1464.5	1464.4	1464.3	1464.2	1464.1	1464.0	1463.9	1463.8	1463.8
800.000	.4033E+07	.1029E-43	1465.5	1465.5	1465.5	1465.4	1465.3	1465.3	1465.2	1465.1	1465.0	1464.9	1464.7	1464.7
801.000	.4031E+07	.8943E-44	1466.3	1466.3	1466.3	1466.3	1466.2	1466.2	1466.1	1466.0	1465.9	1465.8	1465.6	1465.6

802.000	.4030E+07	.7774E-44	1467.2	1467.2	1467.2	1467.1	1467.1	1467.0	1466.9	1466.9	1466.7	1466.6	1466.5	1466.5
803.000	.4029E+07	.6759E-44	1468.1	1468.1	1468.1	1468.0	1468.0	1468.0	1467.9	1467.8	1467.7	1467.6	1467.5	1467.3
804.000	.4028E+07	.5876E-44	1469.0	1469.0	1469.0	1468.9	1468.9	1468.8	1468.8	1468.8	1468.7	1468.6	1468.5	1468.2
805.000	.4026E+07	.5108E-44	1469.8	1469.8	1469.8	1469.8	1469.7	1469.7	1469.6	1469.6	1469.5	1469.4	1469.3	1469.1
806.000	.4025E+07	.4441E-44	1470.7	1470.7	1470.7	1470.6	1470.6	1470.6	1470.5	1470.5	1470.4	1470.3	1470.2	1470.0
807.000	.4024E+07	.3861E-44	1471.6	1471.6	1471.6	1471.5	1471.5	1471.5	1471.4	1471.4	1471.3	1471.2	1471.1	1470.8
808.000	.4023E+07	.3356E-44	1472.4	1472.4	1472.4	1472.3	1472.3	1472.3	1472.2	1472.2	1472.1	1472.0	1471.9	1471.7
809.000	.4021E+07	.2918E-44	1473.3	1473.3	1473.3	1473.2	1473.2	1473.2	1473.1	1473.1	1473.0	1472.8	1472.7	1472.6
810.000	.4020E+07	.2537E-44	1474.2	1474.2	1474.2	1474.1	1474.1	1474.1	1474.0	1473.9	1473.8	1473.7	1473.6	1473.4
811.000	.4019E+07	.2205E-44	1475.1	1475.1	1475.0	1475.0	1475.0	1474.9	1474.9	1474.8	1474.7	1474.6	1474.5	1474.3
812.000	.4018E+07	.1917E-44	1475.9	1475.9	1475.9	1475.9	1475.9	1475.8	1475.7	1475.7	1475.6	1475.5	1475.3	1474.5
813.000	.4016E+07	.1667E-44	1476.8	1476.8	1476.8	1476.7	1476.7	1476.6	1476.6	1476.5	1476.4	1476.3	1476.2	1476.0
814.000	.4015E+07	.1449E-44	1477.7	1477.7	1477.6	1477.6	1477.5	1477.5	1477.4	1477.4	1477.3	1477.2	1477.1	1476.9
815.000	.4014E+07	.1260E-44	1478.5	1478.5	1478.5	1478.4	1478.4	1478.4	1478.3	1478.3	1478.2	1478.1	1477.9	1477.8
816.000	.4013E+07	.1095E-44	1479.4	1479.4	1479.4	1479.3	1479.3	1479.2	1479.2	1479.1	1479.0	1478.9	1478.8	1478.6
817.000	.4011E+07	.9520E-45	1480.3	1480.3	1480.2	1480.2	1480.2	1480.1	1480.0	1479.9	1479.8	1479.7	1479.5	1479.5
818.000	.4010E+07	.8277E-45	1481.1	1481.1	1481.0	1481.0	1481.0	1481.0	1480.9	1480.8	1480.7	1480.6	1480.4	1480.4
819.000	.4009E+07	.7195E-45	1482.0	1482.0	1482.0	1481.9	1481.9	1481.8	1481.8	1481.7	1481.7	1481.5	1481.4	1481.3
820.000	.4008E+07	.6255E-45	1482.9	1482.9	1482.8	1482.8	1482.8	1482.7	1482.6	1482.5	1482.4	1482.3	1482.2	1482.1
821.000	.4006E+07	.5438E-45	1483.7	1483.7	1483.6	1483.6	1483.6	1483.5	1483.4	1483.3	1483.2	1483.0	1483.0	1483.0
822.000	.4005E+07	.4728E-45	1484.6	1484.6	1484.5	1484.5	1484.5	1484.4	1484.4	1484.3	1484.3	1484.1	1484.0	1483.9
823.000	.4004E+07	.4110E-45	1485.5	1485.5	1485.4	1485.4	1485.4	1485.3	1485.2	1485.1	1485.0	1484.9	1484.8	1484.7
824.000	.4003E+07	.3573E-45	1486.3	1486.3	1486.3	1486.2	1486.2	1486.1	1486.0	1486.0	1486.0	1486.0	1486.0	1486.0
825.000	.4002E+07	.3106E-45	1487.2	1487.2	1487.2	1487.1	1487.1	1487.0	1487.0	1487.0	1487.0	1487.0	1487.0	1487.0
826.000	.4000E+07	.2700E-45	1488.1	1488.1	1488.0	1488.0	1488.0	1488.0	1488.0	1488.0	1488.0	1488.0	1488.0	1488.0
827.000	.3999E+07	.2348E-45	1488.9	1488.9	1488.9	1488.8	1488.8	1488.8	1488.7	1488.7	1488.6	1488.5	1488.4	1488.2
828.000	.3998E+07	.2041E-45	1489.8	1489.8	1489.8	1489.7	1489.7	1489.6	1489.5	1489.5	1489.3	1489.2	1489.1	1489.1
829.000	.3997E+07	.1774E-45	1490.7	1490.7	1490.6	1490.6	1490.6	1490.5	1490.4	1490.3	1490.2	1490.1	1490.0	1489.9
830.000	.3995E+07	.1543E-45	1491.5	1491.5	1491.5	1491.4	1491.4	1491.4	1491.3	1491.2	1491.1	1491.0	1490.8	1490.8
831.000	.3994E+07	.1341E-45	1492.4	1492.4	1492.3	1492.3	1492.3	1492.2	1492.1	1492.1	1492.0	1491.8	1491.7	1491.7
832.000	.3993E+07	.1166E-45	1493.3	1493.3	1493.2	1493.2	1493.2	1493.1	1493.0	1493.0	1493.0	1493.0	1493.0	1493.0
833.000	.3992E+07	.1014E-45	1494.1	1494.1	1494.1	1494.0	1494.0	1494.0	1494.0	1494.0	1494.0	1494.0	1494.0	1494.0
834.000	.3991E+07	.8811E-46	1495.0	1495.0	1495.0	1495.0	1495.0	1495.0	1495.0	1495.0	1495.0	1495.0	1495.0	1495.0
835.000	.3989E+07	.7660E-46	1495.9	1495.9	1495.8	1495.8	1495.8	1495.7	1495.7	1495.6	1495.5	1495.4	1495.3	1495.1
836.000	.3988E+07	.6659E-46	1496.7	1496.7	1496.7	1496.6	1496.6	1496.6	1496.5	1496.5	1496.4	1496.3	1496.1	1496.0
837.000	.3987E+07	.5789E-46	1497.6	1497.6	1497.6	1497.5	1497.5	1497.4	1497.3	1497.2	1497.1	1497.0	1496.9	1496.8
838.000	.3986E+07	.5033E-46	1498.4	1498.4	1498.4	1498.3	1498.3	1498.2	1498.2	1498.1	1498.0	1497.9	1497.7	1497.7
839.000	.3985E+07	.4375E-46	1499.3	1499.3	1499.2	1499.2	1499.2	1499.1	1499.1	1499.0	1498.9	1498.7	1498.6	1498.6
840.000	.3983E+07	.3804E-46	1500.2	1500.2	1500.1	1500.1	1500.1	1500.0	1499.9	1499.8	1499.7	1499.6	1499.5	1499.4
841.000	.3982E+07	.3307E-46	1501.0	1501.0	1501.0	1501.0	1501.0	1501.0	1501.0	1501.0	1501.0	1501.0	1501.0	1501.0

842.000 .3981E+07 2875E-46 1501.9 1501.9 1501.9 1501.8 1501.8 1501.7 1501.6 1501.5 1501.4 1501.3 1501.2  
843.000 .3980E+07 2499E-46 1502.8 1502.8 1502.7 1502.7 1502.6 1502.6 1502.5 1502.4 1502.4 1502.3 1502.2 1502.0 1502.0  
844.000 .3979E+07 2173E-46 1503.6 1503.6 1503.6 1503.6 1503.4 1503.4 1503.4 1503.2 1503.2 1503.2 1503.0 1503.0 1502.9  
845.000 .3977E+07 1889E-46 1504.5 1504.5 1504.5 1504.4 1504.4 1504.4 1504.3 1504.3 1504.2 1504.1 1504.0 1503.9 1503.7  
846.000 .3976E+07 1642E-46 1505.3 1505.3 1505.3 1505.3 1505.3 1505.2 1505.2 1505.2 1505.1 1505.0 1504.9 1504.8 1504.6  
847.000 .3975E+07 1428E-46 1506.2 1506.2 1506.2 1506.2 1506.2 1506.1 1506.1 1506.1 1506.0 1506.0 1506.0 1506.0 1506.0  
848.000 .3974E+07 1241E-46 1507.1 1507.1 1507.1 1507.0 1507.0 1507.0 1507.0 1507.0 1507.0 1507.0 1507.0 1507.0 1507.0  
849.000 .3973E+07 1079E-46 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9 1507.9  
850.000 .3971E+07 9380E-47 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8 1508.8  
851.000 .3970E+07 8155E-47 1509.6 1509.6 1509.6 1509.6 1509.6 1509.6 1509.6 1509.6 1509.6 1509.6 1509.6 1509.6 1509.8  
852.000 .3969E+07 7089E-47 1510.5 1510.5 1510.5 1510.4 1510.4 1510.4 1510.3 1510.3 1510.2 1510.2 1510.2 1510.2 1510.6  
853.000 .3968E+07 6163E-47 1511.4 1511.4 1511.4 1511.3 1511.3 1511.3 1511.3 1511.3 1511.2 1511.2 1511.1 1511.0 1511.5  
854.000 .3967E+07 5358E-47 1512.2 1512.2 1512.2 1512.2 1512.2 1512.2 1512.1 1512.1 1512.0 1512.0 1511.9 1511.8 1511.6 1511.5  
855.000 .3965E+07 4658E-47 1513.1 1513.1 1513.1 1513.1 1513.1 1513.0 1513.0 1513.0 1512.9 1512.8 1512.7 1512.6 1512.5 1512.3  
856.000 .3964E+07 4050E-47 1513.9 1513.9 1513.9 1513.9 1513.9 1513.9 1513.9 1513.8 1513.8 1513.7 1513.6 1513.5 1513.4 1513.2  
857.000 .3963E+07 3520E-47 1514.8 1514.8 1514.8 1514.7 1514.7 1514.7 1514.6 1514.6 1514.5 1514.5 1514.4 1514.3 1514.2 1514.1  
858.000 .3962E+07 3061E-47 1515.7 1515.7 1515.6 1515.6 1515.6 1515.6 1515.5 1515.5 1515.4 1515.4 1515.3 1515.2 1515.1 1515.8  
859.000 .3961E+07 2661E-47 1516.5 1516.5 1516.5 1516.5 1516.5 1516.5 1516.4 1516.4 1516.3 1516.3 1516.2 1516.1 1515.9 1515.8  
860.000 .3960E+07 2313E-47 1517.4 1517.4 1517.3 1517.3 1517.3 1517.3 1517.3 1517.2 1517.2 1517.1 1517.0 1516.9 1516.8 1516.6  
861.000 .3958E+07 2011E-47 1518.2 1518.2 1518.2 1518.2 1518.2 1518.2 1518.1 1518.1 1518.0 1517.9 1517.8 1517.7 1517.5 1517.5  
862.000 .3957E+07 1748E-47 1519.1 1519.1 1519.1 1519.1 1519.1 1519.1 1519.0 1519.0 1518.9 1518.8 1518.7 1518.6 1518.5 1518.3  
863.000 .3956E+07 1520E-47 1519.9 1519.9 1519.9 1519.9 1519.9 1519.9 1519.8 1519.8 1519.7 1519.6 1519.5 1519.4 1519.2 1519.2  
864.000 .3955E+07 1321E-47 1520.8 1520.8 1520.8 1520.7 1520.7 1520.7 1520.7 1520.6 1520.5 1520.5 1520.4 1520.3 1520.1 1520.1  
865.000 .3954E+07 1149E-47 1521.7 1521.7 1521.6 1521.6 1521.6 1521.6 1521.5 1521.5 1521.5 1521.4 1521.3 1521.2 1521.1 1520.9  
866.000 .3953E+07 9986E-48 1522.5 1522.5 1522.5 1522.4 1522.4 1522.4 1522.3 1522.3 1522.3 1522.2 1522.2 1521.9 1521.8  
867.000 .3951E+07 8681E-48 1523.4 1523.4 1523.3 1523.3 1523.3 1523.3 1523.3 1523.2 1523.1 1523.0 1522.9 1522.8 1522.7 1522.6  
868.000 .3950E+07 7547E-48 1524.2 1524.2 1524.2 1524.2 1524.2 1524.2 1524.1 1524.0 1524.0 1523.9 1523.8 1523.6 1523.5 1523.5  
869.000 .3949E+07 6561E-48 1525.1 1525.1 1525.0 1525.0 1525.0 1525.0 1524.9 1524.8 1524.7 1524.6 1524.5 1524.4 1524.3 1524.3  
870.000 .3948E+07 5704E-48 1525.9 1525.9 1525.9 1525.8 1525.8 1525.8 1525.7 1525.6 1525.6 1525.5 1525.4 1525.2 1525.2 1525.2  
871.000 .3947E+07 4959E-48 1526.8 1526.8 1526.8 1526.7 1526.7 1526.6 1526.6 1526.6 1526.5 1526.4 1526.3 1526.1 1526.0  
872.000 .3946E+07 4311E-48 1527.6 1527.6 1527.6 1527.6 1527.6 1527.6 1527.5 1527.5 1527.4 1527.3 1527.2 1527.1 1526.9 1526.9  
873.000 .3944E+07 3748E-48 1528.5 1528.5 1528.5 1528.4 1528.4 1528.4 1528.3 1528.3 1528.2 1528.1 1528.0 1527.9 1527.8 1527.8  
874.000 .3943E+07 3258E-48 1529.3 1529.3 1529.3 1529.3 1529.3 1529.3 1529.2 1529.2 1529.1 1529.0 1528.9 1528.8 1528.6 1528.6  
875.000 .3942E+07 2833E-48 1530.2 1530.2 1530.2 1530.2 1530.2 1530.2 1530.1 1530.1 1529.9 1529.9 1529.8 1529.6 1529.5 1529.5  
876.000 .3941E+07 2463E-48 1531.0 1531.0 1531.0 1531.0 1531.0 1531.0 1530.9 1530.9 1530.8 1530.7 1530.6 1530.5 1530.3 1530.3  
877.000 .3940E+07 2141E-48 1531.9 1531.9 1531.9 1531.8 1531.8 1531.7 1531.7 1531.6 1531.6 1531.5 1531.3 1531.2 1531.0 1531.2  
878.000 .3939E+07 1861E-48 1532.8 1532.8 1532.8 1532.7 1532.7 1532.6 1532.6 1532.5 1532.4 1532.3 1532.2 1532.1 1532.0 1532.0  
879.000 .3937E+07 1618E-48 1533.6 1533.6 1533.6 1533.6 1533.6 1533.6 1533.5 1533.4 1533.4 1533.3 1533.2 1533.0 1532.9 1532.9  
880.000 .3936E+07 1407E-48 1534.5 1534.5 1534.4 1534.4 1534.4 1534.4 1534.3 1534.2 1534.1 1534.0 1533.9 1533.8 1533.7 1533.7  
881.000 .3935E+07 1223E-48 1535.3 1535.3 1535.3 1535.3 1535.3 1535.3 1535.2 1535.2 1535.1 1535.1 1535.0 1534.9 1534.7 1534.6

882,000 .3934E+07 .2063E-48 1536,2 1536,2 1536,1 1536,1 1536,1 1536,0 1535,9 1535,8 1535,7 1535,6 1535,5 1535,4  
883,000 .3933E+07 .9242E-49 1537,0 1537,0 1537,0 1537,0 1537,0 1536,9 1536,8 1536,7 1536,6 1536,5 1536,3 1536,3  
884,000 .3932E+07 .8035E-49 1537,9 1537,9 1537,9 1537,8 1537,8 1537,8 1537,7 1537,6 1537,5 1537,4 1537,3 1537,2 1537,1  
885,000 .3931E+07 .6985E-49 1538,7 1538,7 1538,7 1538,7 1538,7 1538,6 1538,5 1538,4 1538,3 1538,2 1538,0 1538,0  
886,000 .3929E+07 .6072E-49 1539,6 1539,6 1539,6 1539,5 1539,5 1539,5 1539,4 1539,3 1539,2 1539,1 1539,0 1538,9 1538,8  
887,000 .3928E+07 .5279E-49 1540,4 1540,4 1540,4 1540,4 1540,4 1540,3 1540,3 1540,2 1540,1 1540,0 1539,9 1539,7 1539,7  
888,000 .3927E+07 .4589E-49 1541,3 1541,3 1541,3 1541,3 1541,2 1541,2 1541,1 1541,0 1540,9 1540,8 1540,7 1540,6 1540,5  
889,000 .3926E+07 .3990E-49 1542,1 1542,1 1542,1 1542,1 1542,1 1542,1 1542,0 1542,0 1541,9 1541,8 1541,7 1541,6 1541,4 1541,4  
890,000 .3925E+07 .3469E-49 1543,0 1543,0 1543,0 1543,0 1542,9 1542,9 1542,8 1542,7 1542,6 1542,5 1542,4 1542,3 1542,2 1542,2  
891,000 .3924E+07 .3016E-49 1543,8 1543,8 1543,8 1543,8 1543,7 1543,7 1543,6 1543,5 1543,4 1543,3 1543,1 1543,1 1543,1  
892,000 .3923E+07 .2622E-49 1544,7 1544,7 1544,6 1544,6 1544,6 1544,5 1544,4 1544,3 1544,2 1544,1 1544,0 1543,9 1543,9  
893,000 .3922E+07 .2279E-49 1545,5 1545,5 1545,5 1545,5 1545,4 1545,4 1545,3 1545,2 1545,1 1545,0 1544,8 1544,8 1544,8  
894,000 .3920E+07 .1981E-49 1546,4 1546,4 1546,3 1546,3 1546,3 1546,2 1546,1 1546,0 1545,9 1545,8 1545,7 1545,6 1545,6 1545,6  
895,000 .3919E+07 .1722E-49 1547,2 1547,2 1547,2 1547,2 1547,2 1547,1 1547,0 1546,9 1546,8 1546,7 1546,6 1546,5 1546,5 1546,5  
896,000 .3918E+07 .1497E-49 1548,1 1548,1 1548,0 1548,0 1548,0 1547,9 1547,8 1547,7 1547,6 1547,5 1547,4 1547,3 1547,3 1547,3  
897,000 .3917E+07 .1302E-49 1548,9 1548,9 1548,9 1548,9 1548,9 1548,8 1548,7 1548,6 1548,5 1548,4 1548,2 1548,2 1548,2 1548,2  
898,000 .3916E+07 .1132E-49 1549,8 1549,8 1549,8 1549,7 1549,7 1549,7 1549,6 1549,5 1549,4 1549,3 1549,2 1549,1 1549,0 1549,0  
899,000 .3915E+07 .9839E-50 1550,6 1550,6 1550,6 1550,6 1550,6 1550,5 1550,4 1550,3 1550,2 1550,0 1549,9 1549,9 1549,9 1549,9

Πίνακας 7-2: Αποτελέσματα του κώδικα LOECFC για το πρόβλημα του υπολογισμού της ταχύτητας επαναψύξης μετά την

εξυγίωση του συστήματος εκκίνησης (ψεκτικό μέσο: βαρ 0,009).

* P	* TS	* FLI	* TEM2	* WL	* BI	* PECLF	* HI	* DU	* TIMEU	* U	* TIME	* REMARKS
*(BAR)	*(K)	*(K)	*(K)	*(KG/SEC)	*	*(W/KM**2)	*(SEC/M)	*(SEC)	*(SEC/M)	*(SEC/M)	*(SEC)	*(SEC)
* 28.0	* 503.1	* .0	* 600.0	* .010	* 39.4	* 96.59	* .872E+06	* 2.89	* 10.59	* 1.08	* 3.94	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 600.0	* .020	* 39.6	* 96.96	* .875E+06	* 2.89	* 10.59	* 1.07	* 3.93	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 600.0	* .030	* 39.7	* 97.17	* .877E+06	* 2.89	* 10.59	* 1.07	* 3.92	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 600.0	* .040	* 39.7	* 97.33	* .878E+06	* 2.89	* 10.59	* 1.07	* 3.91	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 700.0	* .010	* 39.4	* 6.86	* .872E+06	* 20.05	* 73.39	* 15.17	* 55.52	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 700.0	* .020	* 39.6	* 6.88	* .875E+06	* 20.05	* 73.39	* 15.11	* 55.31	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 700.0	* .030	* 39.7	* 6.90	* .877E+06	* 20.05	* 73.39	* 15.08	* 55.19	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 700.0	* .040	* 39.7	* 6.91	* .878E+06	* 20.05	* 73.39	* 15.05	* 55.10	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 800.0	* .010	* 39.4	* 2.45	* .872E+06	* 37.21	* 136.20	* 42.45	* 155.36	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 800.0	* .020	* 39.6	* 2.46	* .875E+06	* 37.21	* 136.20	* 42.29	* 154.77	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 800.0	* .030	* 39.7	* 2.46	* .877E+06	* 37.21	* 136.20	* 42.19	* 154.43	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 800.0	* .040	* 39.7	* 2.47	* .878E+06	* 37.21	* 136.20	* 42.13	* 154.19	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 900.0	* .010	* 39.4	* 1.25	* .872E+06	* 54.37	* 199.01	* 82.92	* 303.47	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 900.0	* .020	* 39.6	* 1.26	* .875E+06	* 54.37	* 199.01	* 82.60	* 302.33	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 900.0	* .030	* 39.7	* 1.26	* .877E+06	* 54.37	* 199.01	* 82.42	* 301.66	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 900.0	* .040	* 39.7	* 1.26	* .878E+06	* 54.37	* 199.01	* 82.29	* 301.18	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1000.0	* .010	* 39.4	* .76	* .872E+06	* 71.53	* 261.82	* 136.57	* 499.85	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1000.0	* .020	* 39.6	* .76	* .875E+06	* 71.53	* 261.82	* 136.06	* 497.96	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1000.0	* .030	* 39.7	* .77	* .877E+06	* 71.53	* 261.82	* 135.75	* 496.86	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1000.0	* .040	* 39.7	* .77	* .878E+06	* 71.53	* 261.82	* 135.54	* 496.08	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1100.0	* .010	* 39.4	* .010	* .872E+06	* *	* *	* *	* *	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1100.0	* .020	* 39.6	* .020	* .875E+06	* *	* *	* *	* *	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1100.0	* .030	* 39.7	* .030	* .877E+06	* *	* *	* *	* *	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1100.0	* .040	* 39.7	* .040	* .878E+06	* *	* *	* *	* *	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1200.0	* .010	* 39.4	* .010	* .872E+06	* *	* *	* *	* *	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1200.0	* .020	* 39.6	* .020	* .875E+06	* *	* *	* *	* *	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1200.0	* .030	* 39.7	* .030	* .877E+06	* *	* *	* *	* *	* ZERO REM. SPEED
* 28.0	* 503.1	* .0	* 1200.0	* .040	* 39.7	* .040	* .878E+06	* *	* *	* *	* *	* ZERO REM. SPEED



* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	700.0 *	.010 *	51.6 *	8.97 *	.114E+07 *	20.05 *	73.39 *	11.59 *	42.42 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	700.0 *	.020 *	65.7 *	11.42 *	.145E+07 *	20.05 *	73.39 *	9.11 *	33.34 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	700.0 *	.030 *	81.3 *	14.14 *	.180E+07 *	20.05 *	73.39 *	7.35 *	26.91 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	700.0 *	.040 *	98.7 *	17.16 *	.218E+07 *	20.05 *	73.39 *	6.06 *	22.18 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	800.0 *	.010 *	51.6 *	3.21 *	.114E+07 *	37.21 *	136.20 *	32.43 *	118.70 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	800.0 *	.020 *	65.7 *	4.08 *	.145E+07 *	37.21 *	136.20 *	25.49 *	93.29 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	800.0 *	.030 *	81.3 *	5.05 *	.180E+07 *	37.21 *	136.20 *	20.57 *	75.30 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	800.0 *	.040 *	98.7 *	6.13 *	.218E+07 *	37.21 *	136.20 *	16.96 *	62.07 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	900.0 *	.010 *	51.6 *	1.64 *	.114E+07 *	54.37 *	199.01 *	63.35 *	231.87 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	900.0 *	.020 *	65.7 *	2.09 *	.145E+07 *	54.37 *	199.01 *	49.79 *	182.22 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	900.0 *	.030 *	81.3 *	2.59 *	.180E+07 *	54.37 *	199.01 *	40.19 *	147.09 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	900.0 *	.040 *	98.7 *	3.14 *	.218E+07 *	54.37 *	199.01 *	33.13 *	121.24 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1000.0 *	.010 *	51.6 *	1.00 *	.114E+07 *	71.53 *	261.82 *	104.35 *	381.92 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1000.0 *	.020 *	65.7 *	1.27 *	.145E+07 *	71.53 *	261.82 *	82.01 *	300.14 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1000.0 *	.030 *	81.3 *	1.57 *	.180E+07 *	71.53 *	261.82 *	66.19 *	242.27 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1000.0 *	.040 *	98.7 *	1.91 *	.218E+07 *	71.53 *	261.82 *	54.56 *	199.70 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1100.0 *	.010 *	51.6 *	.85 *	.145E+07 *	88.69 *	324.62 *	122.14 *	447.04 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1100.0 *	.020 *	65.7 *	1.05 *	.180E+07 *	88.69 *	324.62 *	98.59 *	360.84 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1100.0 *	.030 *	81.3 *	1.28 *	.218E+07 *	88.69 *	324.62 *	81.27 *	297.44 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1200.0 *	.010 *	51.6 *	.010 *	.114E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1200.0 *	.020 *	65.7 *	.020 *	.145E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1200.0 *	.030 *	81.3 *	.030 *	.180E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1200.0 *	.040 *	98.7 *	.92 *	.218E+07 *	105.86 *	387.43 *	113.24 *	414.46 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1300.0 *	.010 *	51.6 *	.010 *	.114E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1300.0 *	.020 *	65.7 *	.020 *	.145E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1300.0 *	.030 *	81.3 *	.030 *	.180E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1300.0 *	.040 *	98.7 *	.040 *	.218E+07 *	105.86 *	387.43 *	137.38 *	502.81 *	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1300.0 *	.010 *	51.6 *	.010 *	.114E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1300.0 *	.020 *	65.7 *	.020 *	.145E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1300.0 *	.030 *	81.3 *	.030 *	.180E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED
* 28.0 *	503.1 *	20.0 *	1300.0 *	.040 *	98.7 *	.040 *	.218E+07 *	*	*	*	*	ZERO REM. SPEED

**8. ΔΗΜΟΣΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΚΩΔΙΚΩΝ,  
LIGHT\_WASP, HEAVY\_WASP ΚΑΙ SODIUM\_LISP ΣΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ  
ΔΙΚΤΥΑΚΟ ΙΣΤΟ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΗΣ  
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ**

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

8.	ΔΗΜΟΣΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΚΩΔΙΚΩΝ, LIGHT_WASP, HEAVY_WASP ΚΑΙ SODIUM_LISP ΣΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΔΙΚΤΥΑΚΟ ΙΣΤΟ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ .....	8-1
8.1	Εισαγωγή. ....	8-1
8.2	Γενικά. ....	8-2
8.3	Τεχνική περιγραφή της εφαρμογής διαδραστικής επικοινωνίας. ....	8-3
8.3.1	Φάση Α – μέχρι και τις φόρμες υποβολής δεδομένων εισόδου στους κώδικες. ....	8-3
8.3.2	Φάση Β – παραλαβή των δεδομένων εισόδου από τους κώδικες και εξαγωγή των αποτελεσμάτων. ....	8-29
8.3.3	Χαρακτηριστική έξοδος για το ελαφρύ ύδωρ. ....	8-30





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΔΗΜΟΣΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΚΩΔΙΚΩΝ, LIGHT\_WASP, HEAVY\_WASP ΚΑΙ SODIUM\_LISP ΣΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΔΙΚΤΥΑΚΟ ΙΣΤΟ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΙΑΔΡΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

#### 8.1 Εισαγωγή.

Στο Κεφάλαιο αυτό της Διδακτορικής Διατριβής περιγράφεται η εφαρμογή της διάθεσης των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων μεταφοράς του ελαφρού ύδατος, του βαρέος ύδατος και του Νατρίου μέσω του παγκόσμιου δικτυακού ιστού (world wide web), όπως αυτή αναπτύχθηκε στον δικτυακό εξυπηρετητή (server) του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας. Η εφαρμογή περιλαμβάνει τρία διακριτά συνεργαζόμενα μέρη: (α) τμήματα γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού html, (β) τμήματα γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού perl και τέλος (γ) εκτελέσιμα αρχεία υπολογισμού των ιδιοτήτων των ψυκτικών μέσων που ενδιαφέρουν, τα οποία φυσικά βασίζονται στους κώδικες LIGHT\_WASP, HEAVY\_WASP και SODIUM\_LISP, όπως αυτοί περιγράφονται στα προηγούμενα τρία Κεφάλαια.

Συνοπτικά η εφαρμογή μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Μέσα από ειδικές σελίδες html, δημοσιευμένες στον δικτυακό τόπο του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, ο δικτυακός χρήστης οδηγείται με φιλικό τρόπο να υποβάλει τη φόρμα υπολογισμού των ιδιοτήτων του ψυκτικού μέσου που τον ενδιαφέρει. Η φόρμα δέχεται ως είσοδο την πίεση και την θερμοκρασία, για την οποία ο δικτυακός χρήστης επιθυμεί να γίνουν οι υπολογισμοί. Στη συνέχεια και μέσω εφαρμογής σε γλώσσα perl, τα δεδομένα εισόδου εισάγονται σε αρχείο δεδομένων και παραλαμβάνονται από το αντίστοιχο εκτελέσιμο αρχείο ιδιοτήτων για το ψυκτικό μέσο που ενδιαφέρει. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν εισάγονται με τη σειρά τους σε αρχείο αποτελεσμάτων από όπου παραλαμβάνονται από την εφαρμογή σε γλώσσα perl, η οποία ακολούθως δημιουργεί σελίδες html με τα αποτελέσματα του κώδικα, οι οποίες δημοσιοποιούνται με ευπαρουσίαστο τρόπο αυτόματα στην

οθόνη του δικτυακού χρήστη. Ο χρόνος που μεσολαβεί από την υποβολή της φόρμας μέχρι τη δημοσιοποίηση του αποτελέσματος είναι εξαιρετικά σύντομος (<1s για το εσωτερικό δίκτυο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου). Η εφαρμογή συνοδεύεται από δικτυακή ιστοσελίδα σε html, όπου διατυπώνονται οι απαραίτητοι περιορισμοί που εξασφαλίζουν στους συγγραφείς των σελίδων και των κωδίκων, στοιχειώδη νομική προστασία εξαιτίας αθέλητων λαθών στα αποτελέσματα, καθώς και οι περιορισμοί από το copyright αυτών των δημοσιεύσεων στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό.

## **8.2 Γενικά.**

Ένα από τα πλέον βασικότερα σήμερα συστήματα μαζικής επικοινωνίας και δημοσιοποίησης πληροφοριών είναι το Διαδίκτυο (Internet). Η ύπαρξη του Διαδικτύου συνεπάγεται μεταξύ άλλων την ύπαρξη ενός Ηλεκτρονικού Υπολογιστή, ο οποίος αναλαμβάνει το ρόλο του δικτυακού εξυπηρετητή (στο εξής αποκαλούμενος server) και του δικτυωμένου Ηλεκτρονικού Υπολογιστή του χρήστη (στο εξής αποκαλούμενος client), ο οποίος ζητά πρόσβαση στις υπηρεσίες που μπορεί να του παρέχει το σύστημα του server. Το βασικό πρωτόκολλο επικοινωνίας επάνω στο οποίο στηρίζεται το Internet είναι το πρωτόκολλο TCP/IP (Transmit Control Protocol / Internet Protocol). Μια από τις δημοφιλέστερες εφαρμογές που αξιοποιεί το πρωτόκολλο TCP/IP είναι εκείνη που εξασφαλίζει δημοσιοποίηση πληροφορίας στο Διαδίκτυο με χρήση ανοικτών σε προσέλαση αρχείων τα οποία καλούνται από κατάλληλα προγράμματα όπως Microsoft Internet Explorer, Netscape Navigator, Mosaic κ.λ.π. Συγκροτείται έτσι, μια δεξιαμενή ανοικτών σε προσέλαση πληροφοριών αναρτημένων σε δικτυακούς εξυπηρετητές που είναι εγκατεστημένοι σε όλο τον Πλανήτη. Το σύνολο των εν λόγω πληροφοριών και οι αναπτυχθέντες μηχανισμοί για την πρόσβαση σε αυτές, συγκροτεί αυτό που ονομάζεται Παγκόσμιος Δικτυακός Ιστός (WWW - World Wide Web). Ο Παγκόσμιος Δικτυακός Ιστός έχει υιοθετηθεί πλέον ως ένα από τα βασικά εργαλεία της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας για την δημοσιοποίηση των αποτελεσμάτων της επιστημονικής έρευνας. Σημαντικό πλεονέκτημα σε αυτού του είδους τη δημοσιοποίηση αποτελεσμάτων αποτελεί η δυνατότητα εκτέλεσης από τον client, προγραμμάτων εγκατεστημένων στον server, εφόσον βέβαια το επιτρέπει ο τελευταίος.

Στην περίπτωση της εφαρμογής που εξετάζεται εδώ, το ρόλο του "server" παίζει ο δικτυακός εξυπηρετητής του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Ως "client" ορίζεται οποιοσδήποτε δικτυωμένος Υπολογιστής χρήστη, που ενδιαφέρεται να παραλάβει αποτελέσματα για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του ελαφρού ύδατος, του βαρέος ύδατος και του Νατρίου. Τα προγράμματα που επιτρέπεται να εκτελεστούν από τον client Υπολογιστή στον Υπολογιστή server είναι οι κώδικες LIGHT\_WASP, ή HEAVY\_WASP ή SODIUM\_LISP.

Σημειώνεται ότι σήμερα στον παγκόσμιο δικτυακό ιστό δεν υπάρχουν παρόμοιες εφαρμογές για το βαρύ ύδωρ και το Νάτριο σε κατάσταση κορεσμού.

### **8.3 Τεχνική περιγραφή της εφαρμογής διαδραστικής επικοινωνίας.**

#### **8.3.1 Φάση Α – μέχρι και τις φόρμες υποβολής δεδομένων εισόδου στους κώδικες.**

Για την εκτέλεση των κωδίκων LIGHT\_WASP, HEAVY\_WASP και SODIUM\_LISP στον Υπολογιστή server μετά από αίτηση του Υπολογιστή client και την παραλαβή των αποτελεσμάτων των κωδίκων αυτών στην οθόνη του Υπολογιστή client ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

1. Μεταφέρθηκαν οι κώδικες LIGHT\_WASP, HEAVY\_WASP και SODIUM\_LISP στον Υπολογιστή server, σε source μορφή FORTRAN προγραμμάτων. Σημειώνεται ότι ο Υπολογιστής server του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή είναι τύπου INDY, εταιρείας κατασκευής SILICON GRAPHICS με λειτουργικό σύστημα UNIX, τύπου IRIX 5.x.
2. Πραγματοποιήθηκε compilation των κωδίκων κάτω από το λειτουργικό σύστημα του server, τύπου IRIX 5.x. Κατά το compilation δεν παρατηρήθηκαν λάθη, επιβεβαιώνοντας έτσι και την επικαλούμενη στα Κεφάλαια 4, 5 και 6, ευκολία μεταφοράς των κωδίκων από λειτουργικό σύστημα σε λειτουργικό σύστημα, αρκεί να χρησιμοποιείται η ίδια τυποποίηση της FORTRAN που υποστηρίζεται και από τα δύο συστήματα.
3. Αναπτύχθηκαν κύρια προγράμματα κλήσεως των κωδίκων με τα ακόλουθα τρία κύρια χαρακτηριστικά:

(α) Η είσοδος του δεδομένου ζεύγους πίεσης και θερμοκρασίας για το οποίο γίνεται ο υπολογισμός των ιδιοτήτων γίνεται με την ανάγνωση αρχείου δεδομένων.

(β) Τα αποτελέσματα του υπολογισμού των ιδιοτήτων γράφονται σε αρχείο αποτελεσμάτων.

(γ) Η κλήση των κωδικών από τα κυρίως προγράμματα, γίνεται ακριβώς όπως περιγράφεται σε κάθε αντίστοιχο Κεφάλαιο των τριών κωδικών (LIGHT\_WASP, HEAVY\_WASP και SODIUM\_LISP).

4. Συγκροτήθηκε μία δομή συνεργαζόμενων αρχείων με τα οποία ο χρήστης επιλέγει τον Κώδικα για τα αποτελέσματα του οποίου ενδιαφέρεται και φθάνει τελικά έως την συμπλήρωση και την ηλεκτρονική υποβολή της διαδραστικής (interactive) φόρμας με τα επιθυμητά από τον χρήστη δεδομένα εισόδου του κώδικα. Τα ενλόγω αρχεία έχουν συνταχθεί με χρήση της κατάλληλης γλώσσας προγραμματισμού για δημοσιεύσεις σε δικτυακούς τόπους, της HyperText Markup Language - HTML. Η ενλόγω γλώσσα, χρησιμοποιεί ειδικούς κωδικούς ηλεκτρονικής εκτύπωσης (TAGs) με τους οποίους καθοδηγεί τον H/Y για την επιθυμητή από τον σχεδιαστή μορφή εμφάνισης της πληροφορίας στην οθόνη του Υπολογιστή client.

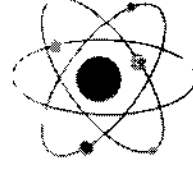
5. Η πρώτη κεντρική σελίδα του δικτυακού τόπου του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ τροποποιήθηκε ώστε να περιλαμβάνει τη σύνδεση (link):

*Get the Thermophysical Properties of Nuclear Reactor Coolants*

Για να πάρει κάποιος πρόσβαση σε αυτή την πρώτη κεντρική σελίδα του δικτυακού τόπου του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας αρκεί να συνδεθεί με τη διεύθυνση:

<http://nuclear.ntua.gr/>

Η τρέχουσα μορφή της πρώτης κεντρικής σελίδας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας έχει όπως εμφανίζεται ακολούθως:



**NATIONAL  
TECHNICAL**

**UNIVERSITY OF ATHENS**

## ***Nuclear Engineering Section***

### **ZOGRAFOS CAMPUS ENVIRONMENTAL**

#### **CONDITIONS (OUTDOORS)**

**ON 30/01/03-11:33:18**

<b>TEMPERATURE</b>	<b>16.1</b>	<b>°C</b>
<b>RELATIVE HUMIDITY</b>	<b>73.3</b>	<b>%</b>
<b>PRESSURE</b>	<b>984.8</b>	<b>mbar</b>
<b>RADON DAUGHTERS CONCENTRATION</b>	<b>0.5</b>	<b>Bq/m<sup>3</sup></b>
<b>GAMMA RAY DOSE RATE OUTDOORS</b>	<b>46.3</b>	<b>nGy/h</b>

*This Table is updated 4 times per day by the NES Data Acquisition Network. Real time data can be provided if necessary.*

- *About the Nuclear Engineering Section*
- *Courses Given*
- *Research Activities*
- *Recent Publications*
- *OECD-NSC NEADB*
- *Get the Thermophysical Properties of Nuclear Reactor Coolants*

- Radiometric Maps
- Χαρτογράφηση Ραδιοπεριβαλλοντικών Μεγεθών της περιοχής της Μεγαλοπόλεως.
- Δελτίο τύπου. Το 7<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο Natural Radiation Environment NRE-VII.
- Συνέντευξη τύπου με θέμα: Συμβολή του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου στην αποτίμηση της περιβαλλοντικής κατάστασης από τον πόλεμο στη Γιουγκοσλαβία.
- Συνοδεύεται από το σχετικό Δελτίο Τύπου που εκδόθηκε.
- Η συμβολή του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ στη διερεύνηση των επιπτώσεων εξαίτιας του απεικλουτισμένου ουρανίου (Depleted Uranium - DU) στο Κόσοβο
- 7<sup>th</sup> International Symposium on the NATURAL RADIATION ENVIRONMENT (NRE-VII) 20-24 May 2002, Rhodes, Greece
- European Research into Radon In Construction Concerted Action (ERRICCA)
- European Commission - Radiation Research Unit R A D O N in the Living Environment Workshop, 19-23 April 1999, Athens, Greece
- Ανακοινώσεις Σχετικές με τα Μαθήματα του Τομέα (in Greek)

- *Ανακοινώσεις Διαλέξεων - Σεμιναρίων του Τομέα (in Greek)*
- *Seminars - Conferences - Workshops*
- *Link to other interesting Web Sites*



#### 6. Η σύνδεση

##### *Get the Thermophysical Properties of Nuclear Reactor Coolants*

κατασκευάσθηκε ώστε να παραπέμπει στην ισοδύναμη σύνδεση:

<http://nuclear.ntua.gr/codes/properties.html>

Με αυτήν τη σύνδεση καλείται το αρχείο σε γλώσσα html με όνομα "properties.html". Το αρχείο αυτό παρατίθεται σε παράγραφο του Παραρτήματος

IV με ομώνυμο τίτλο. Η παραγόμενη σελίδα έχει την ακόλουθη μορφή:

**CODES FOR THE CALCULATION OF  
THERMODYNAMIC AND TRANSPORT  
PROPERTIES  
OF NUCLEAR REACTOR COOLANTS**

(© 2003: Petropoulos N.P., PhD Thesis,

Nuclear Engineering Section, Mechanical Engineering School,

National Technical University of Athens, Athens, 2003)

---

1. [Light \(Ordinary\) Water](#)
2. [Heavy Water](#)
3. [Saturated Sodium Liquid & Vapour](#)
4. [Tritium Oxide \(under Construction\)](#)

[Legal Notices and Privacy Statement, Release Notes, Copyright, Disclaimer](#)

[The NES-NTUA Home Page](#)

[The NTUA Home](#)

Μέσα από αυτή τη σελίδα ο χρήστης έχει τις προφανείς δυνατότητες να συνδεθεί με

(α) την κεντρική σελίδα του ΕΜΠ, την <http://www.ntua.gr>, κάτω από τη σύνδεση

*The NTUA Home*

(β) την πρώτη κεντρική σελίδα του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, δηλ. την <http://nuclear.ntua.gr>, κάτω από τη σύνδεση

*The NES-NTUA Home Page*

(γ) την σελίδα, όπου περιγράφονται με πληρότητα νομικές υποχρεώσεις και δικαιώματα των χρηστών των αποτελεσμάτων των κωδίκων κάτω από τη σύνδεση

*Legal Notices, Privacy Statement, Release Notes, Copyright, Disclaimer*

**και φυσικά:**

(δ) τις σελίδες υπολογισμού των θερμοδυναμικών και των ιδιοτήτων μεταφοράς του ελαφρού, του βαρέος ύδατος και του Νατρίου.

## 7. Η σύνδεση

*Legal Notices, Privacy Statement, Release Notes, Copyright, Disclaimer*

κατασκευάστηκε ώστε να παραπέμπει στην ισοδύναμη σύνδεση:

<http://nuclear.ntua.gr/codes/legal.html>

Με αυτήν τη σύνδεση καλείται το αρχείο σε γλώσσα html με όνομα "legal.html".

Το αρχείο αυτό παρατίθεται σε παράγραφο του Παραρτήματος IV με ομώνυμο τίτλο. Η παραγόμενη σελίδα έχει την ακόλουθη μορφή:

## **Legal Notices and Privacy Statement, Release Notes, Copyright, Disclaimer**

---

### **Legal Notices**

*Permission to use Documents (such as parts of text, code results and other publications) from this server ("Server") is granted by Nuclear Engineering Section - National Technical University of Athens ("NES-NTUA"), provided that:*

- (1) this permission notice appears in full together with the below appearing copyright notice in all copies ,*
  - (2) use of such Documents from this Server is for personal , non-commercial and /or informational use only and will not be copied or posted on any network computer or broadcast in any media, and*
  - (3) no modifications of any Documents are made.*
- Use for any unauthorized purpose is expressly and strictly prohibited.*
- Documents specified above do not include the design and layout of this Web site. Elements of this Web site are protected by trade dress and other laws and may not be copied or imitated in hole or in part. No logo, graphic or image from this Web site may be copied or retransmitted unless explicitly permitted by NES-NTUA.*

### **Privacy Statement**

*NTUA-NES considers the responsible use of a scientific information Server to be a critical element in enabling the Internet to reach its potential as a serious tool for personal and professional activities. Therefore, NES-NTUA is committed to respecting your privacy. Generally, you can visit this Server without telling us who you are or revealing any personal information about yourself. Furthermore, NES-NTUA is committed to protecting your resources used to reach this Server and places a serious effort in maintaining the Server codes virus free.*

*However, in the case that you send authors an e-mail, where name, home or business address and other details are included, NES-NTUA will let you know how we will use this information.*

#### **Release Notes**

*Authors will not try to fix all reported bugs promptly, and they will certainly not be involved in an effort to improve performance of the property equations in pressure - temperature regions, where their results are ambiguous or not to be trusted. Furthermore, authors cannot accept ANY responsibility if some or all calculations based on this code may be proven wrong or inadequate (see disclaimer below).*

#### **Copyright**

*All rights reserved. No part of the contents and/or the results of these WWW pages may be reproduced or transmitted in any form or by any means without written permission.*

#### **Disclaimer**

*Neither the authors nor the National Technical University of Athens makes any warranty, expressed or implied with respect to the reliability of the above software or the accuracy of any calculation results produced herein, including, without limitation, the implied warranties of fitness for a particular purpose. Neither the authors nor the National Technical University of Athens shall have any liability for any damages, whatsoever including consequential, incidental, direct, indirect, special, and lost profits. In any event the authors and the National Technical University of Athens entire liability in any manner arising out of these WWW pages shall not exceed acknowledgement of all serious reported bugs and possible malfunctions under the link mentioned in the Release Notes paragraph above.*

**[Back to Properties Home Page](#)**

**[The NES-NTUA Home Page](#)**

**[The NTUA Home](#)**

## 8. Η σύνδεση

### **Light (Ordinary) Water**

κατασκευάσθηκε ώστε να παραπέμπει στην ισοδύναμη σύνδεση:

<http://nuclear.ntua.gr/codes/lightwater.html>

Με αυτήν τη σύνδεση καλείται το αρχείο σε γλώσσα html με όνομα "lightwater.html". Το αρχείο αυτό παρατίθεται σε παράγραφο του Παραρτήματος IV με ομώνυμο τίτλο. Η παραγόμενη σελίδα έχει την ακόλουθη μορφή:

**THERMODYNAMIC AND TRANSPORT  
PROPERTIES  
OF LIGHT (ORDINARY) WATER**

---

Prepare & Submit Calculation Form

The thermodynamic and transport properties of light water can be calculated according to the property equations presented in:

- [1] Keyes F.G., Keenan J.H., Hill P.G. and Moore J.G., "*A Fundamental Equation for Liquid and Vapor Water*", Proceedings of the 7th International Conference on the Properties of Steam, Tokyo, Japan 1968.
- [2] Schmidt E., "*Properties of Water and Steam in SI Units*", Springer-Verlag, 1969.
- [3] Sengers J.V. and Watson J.T.R., "*Improved International Formulations for the Viscosity and Thermal Conductivity of Water Substance*", Journal of Physical Chemistry Reference Data, 15(4):1291, 1986.
- [4] Straub J., Rosner N. and Grigull U., "*Oberflaechenspannung von Leichtem und Schwerem Wasser*", Waerme- und Stoffuebertragung, 13:241, 1980.

Based mainly on the above references property equations have been implemented in the **LIGHT\_WASP** (LIGHT Water And Steam Properties) FORTRAN 77 code in the course of the following PhD work (in Greek):

**Petropoulos N.P., "THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF NUCLEAR POWER REACTOR COOLANTS: COMPARATIVE STUDY AND CALCULATION**

**CODES", Nuclear Engineering Section, Mechanical Engineering Department, National Technical University of Athens, 2000 (in progress).**

The set of equations used provide reliable thermodynamic and transport properties results equivalent to the industrial standard formulation IFC-1967. The following validity range is covered:

Pressure: 0 - 1000 bar

Temperature: 0 -1000 °C

A small region at the vicinity of the critical point is excluded:

$$|T - T^*| \leq 10 \text{ K}, \quad |\rho/\rho^* - 1| \leq 0.3$$

where  $T^*= 647.27 \text{ K}$  and  $\rho^*= 317.763 \text{ kg/m}^3$

Calculable Properties:

Specific volume $v$ in $\text{m}^3/\text{kg}$	Density $\rho$ in $\text{kg/m}^3$
Internal energy $u$ in $\text{kJ/kg}$	Specific enthalpy $h$ in $\text{kJ/kg}$
Entropy $s$ in $\text{kJ}/(\text{kgK})$	Isobaric heat capacity $c_p$ in $\text{kJ}/(\text{kgK})$
Isochoric heat capacity $c_v$ in $\text{kJ}/(\text{kgK})$	Viscosity $\eta$ in $\text{kg}/(\text{ms})$
Thermal conductivity $\lambda$ in $\text{W}/(\text{mK})$	Surface tension $\sigma$ in $\text{N/m}$ .

Code accepts the following input pair:

$(P, T)$  in bars and degrees Centigrade respectively.

### Reported Bugs

#### *Addendum*

*This WWW page is maintained regularly to ensure best performance and error-free accurate calculations for the thermodynamic and transport properties of light (ordinary) water. All efforts have been made to ensure that the present code is as accurate implementation as possible of the property equations included at the above literature. Authors welcome your comments and suggestions for further improvement along with any bug reports and they will acknowledge any reported bug in this very page under the link reported bugs regardless whether they are fixed or not.*

*Please, contact:*



Nick P. Petropoulos ([npetro@nuclear.ntua.gr](mailto:npetro@nuclear.ntua.gr))

Research Assistant

Nuclear Engineering Section

Mechanical Engineering Dept.

National Technical University of Athens

15780 Athens, GREECE

tel: +302107722939

fax: +302107722914

URL: <http://arcas.nuclear.ntua.gr/>

*However, authors will not try to fix all reported bugs promptly, and they will certainly not be involved in an effort to improve performance of the property equations in pressure - temperature regions, where their results are ambiguous or not to be trusted. Furthermore, authors cannot accept ANY responsibility if some or all calculations based on this code may be proven wrong or inadequate. Visitors of this page, who would like to receive free copies of the source code for their own private use or for evaluating purposes are encouraged to place a request at [npetro@nuclear.ntua.gr](mailto:npetro@nuclear.ntua.gr), stating also their intended implementation platform (i.e. FORTRAN make & version, UNIX or Windows based application etc). Not all requests are to be granted. This version of the software is not commercially available.*

[Back to the Previous Page](#)

## 9. Η σύνδεση

### **Heavy Water**

κατασκευάσθηκε ώστε να παραπέμπει στην ισοδύναμη σύνδεση:

<http://nuclear.ntua.gr/codes/heavywater.html>

Με αυτήν τη σύνδεση καλείται το αρχείο σε γλώσσα html με όνομα "heavywater.html". Το αρχείο αυτό παρατίθεται σε παράγραφο του Παραρτήματος IV με ομώνυμο τίτλο. Η παραγόμενη σελίδα έχει την ακόλουθη μορφή:

## **THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF HEAVY WATER**

---

### Prepare & Submit Calculation Form

The thermodynamic and transport properties of heavy water can be calculated according to the property equations presented in:

- [1] Hill P.G., MacMillan R.D.C., Lee V., "*Tables of Thermodynamic Properties of Heavy Water in S.I. Units*", Department of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, Atomic Energy of Canada Limited, AECL-7531, 1981.
- [2] Hill P.G., MacMillan R.D.C., Lee V., "*A Fundamental Equation of State for Heavy Water*", Journal of Physical Chemistry Reference Data, 11(1):1, 1982; Errata: 12(4):1065, 1983.
- [3] Matsunaga N., Nagashima A., "*Transport Properties of Liquid and Gaseous Deuterium Oxide over a Wide Range of Temperature and Pressure*", Journal of Physical Chemistry Reference Data, 12(4):933, 1983.
- [4] Straub J., Rosner N. und Griggull U., "*Oberflaechenspannung von Leichtem und Schwerem Wasser*", Waerme- und Stoffuebertragung, 13:241, 1980.

Based mainly on the above references property equations have been implemented in the **HEAVY\_WASP (HEAVY Water And Steam Properties)** FORTRAN 77 code in the course of the following PhD work (in Greek):

**Petropoulos N.P., "THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF NUCLEAR POWER REACTOR COOLANTS: COMPARATIVE STUDY AND CALCULATION**

**CODES”, Nuclear Engineering Section, Mechanical Engineering School, National Technical University of Athens, 2000 (in progress).**

The set of equations used provide reliable thermodynamic and transport properties results for the industrial use of heavy water. The following validity range is covered:

Pressure: 0.006601 - 1000 bar

Temperature: 3.8 - 500 °C

A small region at the vicinity of the critical point is excluded:

$$|T - T^*| \leq 10 \text{ K}, \quad |\rho/\rho^* - 1| \leq 0.3$$

where  $T^*=643.89 \text{ K}$  and  $\rho^*=358.0 \text{ kg/m}^3$

Calculable Properties:

Specific volume $v$ in $\text{m}^3/\text{kg}$	Density $\rho$ in $\text{kg/m}^3$
Internal energy $u$ in $\text{kJ/kg}$	Specific enthalpy $h$ in $\text{kJ/kg}$
Entropy $s$ in $\text{kJ}/(\text{kgK})$	Isobaric heat capacity $c_p$ in $\text{kJ}/(\text{kgK})$
Isochoric heat capacity $c_v$ in $\text{kJ}/(\text{kgK})$	Viscosity $\eta$ in $\text{kg}/(\text{ms})$
Thermal conductivity $\lambda$ in $\text{W}/(\text{mK})$	Surface tension $\sigma$ in $\text{N/m}$ .

Code accepts the following input pair:

$(P, T)$  in bars and degrees Centigrade respectively.

### Reported Bugs

#### *Addendum*

*This WWW page is maintained regularly to ensure best performance and error-free accurate calculations for the thermodynamic and transport properties of light (ordinary) water. All efforts have been made to ensure that the present code is as accurate implementation as possible of the property equations included at the above literature. Authors welcome your comments and suggestions for further improvement along with any bug reports and they will acknowledge any reported bug in this very page under the link reported bugs regardless whether they are fixed or not.*

Please, contact:

Nick P. Petropoulos (npetro@nuclear.ntua.gr)

Research Assistant  
Nuclear Engineering Section  
Mechanical Engineering Dept.  
National Technical University of Athens  
15780 Athens, GREECE  
tel: +302107722939  
fax: +302107722914  
URL: <http://arcas.nuclear.ntua.gr/>

However, authors will not try to fix all reported bugs promptly, and they will certainly not be involved in an effort to improve performance of the property equations in pressure - temperature regions, where their results are ambiguous or not to be trusted. Furthermore, authors cannot accept ANY responsibility if some or all calculations based on this code may be proven wrong or inadequate. Visitors of this page, who would like to receive free copies of the source code for their own private use or for evaluating purposes are encouraged to place a request at [ppetro@nuclear.ntua.gr](mailto:ppetro@nuclear.ntua.gr), stating also their intended implementation platform (i.e. FORTRAN make & version, UNIX or Windows based application etc). Not all requests are to be granted. This version of the software is not commercially available.

[Back to the Previous Page](#)

## 10. Η σύνδεση

### **Saturated Sodium Liquid and Vapor**

κατασκευάσθηκε ώστε να παραπέμπει στην ισοδύναμη σύνδεση:

<http://nuclear.ntua.gr/codes/sodium.html>

Με αυτήν τη σύνδεση καλείται το αρχείο σε γλώσσα html με όνομα "sodium.html". Το αρχείο αυτό παρατίθεται σε παράγραφο του Παραρτήματος

IV με ομώνυμο τίτλο. Η παραγόμενη σελίδα έχει την ακόλουθη μορφή:

**THERMODYNAMIC AND TRANSPORT  
PROPERTIES  
OF SODIUM LIQUID METAL  
SATURATION STATES**

---

Prepare & Submit Calculation Form

The thermodynamic and transport properties of heavy water can be calculated according to the property equations presented in:

[1] Fink J.K., Leibowitz L., "*Thermodynamic and Transport Properties of Sodium Liquid and Vapor*", Report ANL/RE-95/2, Ractor Engineering Division, Argonne National Laboratory, 1995.

Based mainly on the above reference property equations have been implemented in the **SODIUM\_LISP** (**SODIUM LI**quid and **Steam Properties**) **FORTRAN 77** code in the course of the following PhD work (in Greek):

**Petropoulos N.P., "THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF NUCLEAR POWER REACTOR COOLANTS: COMPARATIVE STUDY AND CALCULATION CODES"**, Nuclear Engineering Section, Mechanical Engineering School, National Technical University of Athens, 2000 (in progress).

The set of equations used provide reliable thermodynamic and transport properties results for the industrial use of heavy water. The following validity range is covered:

Pressure:  $1.5E^{-10}$  - 256.4 bar

Temperature: 97.85 - 2230.55 °C

Calculable Properties:

Specific volume $v$ in $m^3/kg$	Density $\rho$ in $kg/m^3$
Internal energy $u$ in $kJ/kg$	Specific enthalpy $h$ in $kJ/kg$
Entropy $s$ in $kJ/(kgK)$	Isobaric heat capacity $c_p$ in $kJ/(kgK)$
Isochoric heat capacity $c_v$ in $kJ/(kgK)$	Viscosity $\eta$ in $kg/(ms)$
Thermal conductivity $\lambda$ in $W/(mK)$	Surface tension $\sigma$ in $N/m$ .

Code accepts the following input pair:

$(P, T)$  in bars and degrees Centigrade respectively.

### Reported Bugs

#### *Addendum*

*This WWW page is maintained regularly to ensure best performance and error-free accurate calculations for the thermodynamic and transport properties of light (ordinary) water. All efforts have been made to ensure that the present code is as accurate implementation as possible of the property equations included at the above literature. Authors welcome your comments and suggestions for further improvement along with any bug reports and they will acknowledge any reported bug in this very page under the link reported bugs regardless whether they are fixed or not.*

Please, contact:

Nick P. Petropoulos ([npetro@nuclear.ntua.gr](mailto:npetro@nuclear.ntua.gr))

Research Assistant

Nuclear Engineering Section

Mechanical Engineering Dept.

National Technical University of Athens

15780 Athens, GREECE

tel: +302107722939

fax: +302107722914

URL: <http://arcas.nuclear.ntua.gr/>

*However, authors will not try to fix all reported bugs promptly, and they will certainly not be involved in an effort to improve performance of the property equations in pressure - temperature regions, where their results are ambiguous or not to be trusted. Furthermore, authors cannot accept ANY responsibility if some or all calculations based on this code may be proven wrong or inadequate. Visitors of this page, who would like to receive free copies of the source code for their own private use or for evaluating purposes are encouraged to place a request at [npetro@nuclear.ntua.gr](mailto:npetro@nuclear.ntua.gr), stating also their intended implementation platform (i.e. FORTRAN make & version, UNIX or Windows based application etc). Not all requests are to*



*be granted. This version of the software is not commercially available.*

*Back to the Previous Page*

11. Οι δικτυακές σελίδες που περιγράφονται στα προηγούμενα σημεία 7, 8 και 9 κατασκευάστηκαν να παρέχουν τα εξής κύρια κοινά χαρακτηριστικά:

- (α) Τη σημαντικότερη βιβλιογραφία με βάση την οποία υπολογίζονται οι ιδιότητες.
- (β) Την περιογή πύσσων και θερμοκρασιών για την οποία μπορούν να υπολογισθούν οι ιδιότητες.
- (γ) Κατάλογο των υπολογιζόμενων ιδιοτήτων.
- (δ) Δυνατότητα σύνδεσης με δικτυακή σελίδα, όπου θα αναφέρονται τα λάθη που διαπιστώθηκαν στον κώδικα, και τα οποία αναφέρθηκαν στους συγγραφείς του από χρήστες του διαδικτύου, τα στοιχεία των οποίων κι θα μνημονεύονται.
- (ε) Δυνατότητα επικοινωνίας με τον υπογράφοτα μέσω e-mail

**και τέλος και ουσιαστικότερα:**

(στ) Παραπομπή στην προετοιμασία και την υποβολή φόρμας υπολογισμού θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων μεταφοράς με τη σύνδεση

Prepare and Submit Calculation Form

Η οποία αντιστοιχεί

- Για ελαφρύ νερό στη σύνδεση:  
[http://nuclear.ntua.gr/codes/light\\_calculus.html](http://nuclear.ntua.gr/codes/light_calculus.html)
- Για βαρύ νερό στη σύνδεση:  
[http://nuclear.ntua.gr/codes/heavy\\_calculus.html](http://nuclear.ntua.gr/codes/heavy_calculus.html)
- Για Νάτριο:  
[http://nuclear.ntua.gr/codes/sodium\\_calculus.html](http://nuclear.ntua.gr/codes/sodium_calculus.html)

Με αυτές τις συνδέσεις καλούνται τα αρχεία σε γλώσσα html με ονόματα "light\_calculus.html", "heavy\_calculus.html" και "sodium\_calculus.html" αντίστοιχα. Τα αρχεία αυτά παρατίθεται σε παραγράφους του Παραρτήματος IV με ομώνυμο τίτλο. Οι παραγόμενες σελίδες έχουν αντίστοιχα και διαδοχικά την ακόλουθη μορφή:

**THERMODYNAMIC AND TRANSPORT  
PROPERTIES  
OF LIGHT (ORDINARY) WATER  
CALCULATION FORM**

---

To obtain a saturation state:

a) Fill the pressure box with zero and the temperature box with the operation temperature,

or

b) Fill the pressure box with the saturation pressure and the temperature box with zero.

Top of Form

---

Please enter pressure in bars:

Please enter temperature in C:

<input type="submit" value="submit"/>	<input type="button" value="clear form"/>
---------------------------------------	---

Bottom of Form

---

[Back to the Previous Page](#)

**THERMODYNAMIC AND TRANSPORT  
PROPERTIES  
OF HEAVY WATER  
CALCULATION FORM**

---

To obtain a saturation state:

a) Fill the pressure box with zero and the temperature box with the operation temperature,

or

b) Fill the pressure box with the saturation pressure and the temperature box with zero.

Top of Form

Please enter pressure in bars:

Please enter temperature in C:

submit

clear form

Bottom of Form

[Back to the Previous Page](#)

**THERMODYNAMIC AND TRANSPORT  
PROPERTIES  
OF SODIUM SATURATION STATES.  
CALCULATION FORM**

---

Top of Form

Please select input parameter to calculate the  
appropriate saturation state:

Please enter Input Value:

Bottom of Form

[Back to the Previous Page](#)

### **8.3.2 Φάση Β – παραλαβή των δεδομένων εισόδου από τους κώδικες και εξαγωγή των αποτελεσμάτων.**

Για την παραλαβή των δεδομένων εισόδου από τους κώδικες και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων για τις ιδιότητες, συγκροτήθηκε μία δομή αρχείων εντολών προς το λειτουργικό σύστημα IRIX 5.x, με τις οποίες καλείται ο επιθυμητός προς χρήση κώδικας και δημοσιεύονται τα αποτελέσματα με τη συγκρότηση κατάλληλης φόρμας αποτελεσμάτων. Τα αρχεία αυτά ονομάζονται Common Gateway Interface (CGI) scripts. Στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή τα υπόψιν αρχεία έχουν κατασκευασθεί στην σχετική πρόσφορη γλώσσα προγραμματισμού PERL. Τα αρχεία εντολών καλούνται από τα αντίστοιχα αρχεία υποβολής της φόρμας υπολογισμών που ήδη περιγράφηκαν.

Συγκεκριμένα η φόρμα υπολογισμού `light_calculus.html` καλεί το αρχείο εντολών `light.cgi`, η φόρμα υπολογισμού `heavy_calculus.html` καλεί το αρχείο εντολών `heavy.cgi` και η φόρμα υπολογισμού `sodium_calculus.html` καλεί το αρχείο εντολών `sodium.cgi`. Τα αρχεία τύπου "cgi" παρατίθεται σε παραγράφους του Παραρτήματος IV με ομώνυμο τίτλο. Στο κείμενο των αρχείων παρεμβάλλονται με έντονους χαρακτηριστές σχόλια του συντάκτη σχετικά με τις εργασίες που αυτά αναλαμβάνουν σε διάφορα σημεία τους. Τα αρχεία εντολών παραλαμβάνουν από τις φόρμες υπολογισμού το ζεύγος πίεσης και θερμοκρασίας που θα χρησιμοποιηθεί ως είσοδος στον κώδικα που ζητείται να χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια γράφουν το δεδομένο ζεύγος σε αρχείο εισόδου του κώδικα και ζητούν την εκτέλεση του τελευταίου. Τα αποτελέσματα του κώδικα γράφονται σε αρχείο εξόδου, από όπου τα παραλαμβάνει το αρχείο εντολών και φροντίζει για την προβολή τους στην οθόνη του Υπολογιστή client σε φιλική μορφή.

Σημειώνεται ότι λαμβάνονται ιδιαίτερες προφυλάξεις ασφαλείας στη σύνταξη και την εκτέλεση ενός CGI script. Ο λόγος είναι ότι κάθε εντολή του ενλόγω αρχείου απευθύνεται στο λειτουργικό σύστημα σε "χαμηλό επίπεδο", κάτι που χωρίς προσεκτική σύνταξη του script κάνει τον Υπολογιστή server ευάλωτο σε επιθέσεις.

Η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των υπόψιν CGI scripts είναι: Lejeune U.A. και Duntemann J.(1995), Fox D. Και Downing T. (1995), Richardson E.C. (1995), Long L.N. et al. (1996) και Gould N. (1997).

### 8.3.3 Χαρακτηριστική έξοδος για το ελαφρύ ύδωρ.

Παρουσιάζεται πιο κάτω η οθόνη αποτελεσμάτων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος. Αντίστοιχες είναι και οι οθόνες για το βαρύ ύδωρ και το Νάτριο.

#### Results for Requested Light Water Properties

##### SUBMITTED VALUES

Pressure in bars: 10.000

Temperature in C: 10.000

##### RESULTS

SUBCOOLED LIQUID REGION	
Exact saturation temperature for this pressure:	179.884
<b>LIQUID</b>	
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0009999
Internal Energy in kJ/kg:	42.0
Specific Enthalpy in kJ/kg:	43.0
Specific Entropy in kJ/(kgK):	0.1510
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK)	4.1977
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK)	4.1937
Viscosity in kg/(ms):	.0013028
Thermal Conductivity in W/(mK):	.5837
Prandtl number:	9.369

<b>VAPOR</b>	
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	0.000000
Internal Energy in kJ/kg:	0.0
Specific Enthalpy in kJ/kg:	0.0
Specific Entropy in kJ/(kgK):	0.0000
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	0.0000
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	0.0000
Viscosity in kg/(ms):	.0000000
Thermal Conductivity in W/(mK):	.0000
Prandtl number:	0.000

[Back to Calculation Form](#)



## 9. ΠΑΡΑΠΛΕΥΡΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣ ΔΗΜΟΣΙΟΠΟΙΗΣΗ

### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

9. ΠΑΡΑΠΛΕΥΡΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣ ΔΗΜΟΣΙΟΠΟΙΗΣΗ.....	9-i
9.1 Εισαγωγή.....	9-1
9.2 Κώδικας για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του T <sub>2</sub> O.....	9-3
9.2.1 Η σημασία του Τριτίου (Υδρογόνο-3, <sup>3</sup> H) και του T <sub>2</sub> O (οξείδιου του Τριτίου).....	9-3
9.2.2 Γενικά για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του T <sub>2</sub> O.....	9-5
9.2.3 Ο κώδικας TRIO_LISP.....	9-5
9.3 Κώδικες υπολογισμού θερμοφυσικών ιδιοτήτων με "πολλαπλή είσοδο".....	9-7
9.3.1 Γενικά.....	9-7
9.3.2 Κώδικας υπολογισμού θερμοφυσικών ιδιοτήτων με "πολλαπλή είσοδο" για το Νάτριο.....	9-8
9.3.3 Άλλοι κώδικες υπολογισμού θερμοφυσικών ιδιοτήτων με "πολλαπλή είσοδο".....	9-8
9.3.3.1 Κώδικας υπολογισμού με "πολλαπλή είσοδο" για το ελαφρύ ύδωρ.....	9-8
9.3.3.2 Κώδικας υπολογισμού με "πολλαπλή είσοδο" για το βαρύ ύδωρ.....	9-10
9.4 Σύγκριση της ψυκτικής συμπεριφοράς του ελαφρού και του βαρέος ύδατος στο κανάλι ψύξεως Πορηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος.....	9-11



# ΠΑΡΑΠΛΕΥΡΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣ ΔΗΜΟΣΙΟΠΟΙΗΣΗ

### 9.1 Εισαγωγή.

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα παράπλευρα αποτελέσματα και οι εφαρμογές στις οποίες οδήγησε η παρούσα Διδακτορική Διατριβή και οι οποίες είναι ήδη ώριμες για δημοσιοποίηση. Ιδιαίτερα, αναφέρεται, ότι στο πλαίσιο των κωδίκων είναι πρακτικά έτοιμος και κώδικας για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις ιδιότητες μεταφοράς του  $T_2O$ , ο οποίος βασίζεται στις εξισώσεις υπολογισμού των σχετικών ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος και σε εύλογες παραδοχές. Ο κώδικας αυτός στην τελική του μορφή θα υπολογίζει θερμοδυναμικές ιδιότητες και ιδιότητες μεταφοράς για το  $T_2O$  για δεδομένη πίεση P και θερμοκρασία T. Από την παγκόσμια δημοσιευμένη βιβλιογραφία δεν φαίνεται μέχρι σήμερα (2002) να έχουν διατυπωθεί τέτοιοι κώδικες για δύο κυρίως λόγους: (α) είναι πολύ δύσκολο να εξασφαλισθεί έστω και μικρή ποσότητα του σχετικού υλικού ώστε να ληφθούν πειραματικά αποτελέσματα για τις θερμοδυναμικές και τις ιδιότητες μεταφοράς του και (β) έχει υπολογισθεί ότι παγκοσμίως το υπάρχουν  $T_2$ , το οποίο παράγεται με φυσικό τρόπο στο γήινο περιβάλλον είναι μόλις 7.3 kg (το  $10^{-18}\%$  του υδρογόνου που απαντάται στη φύση). Παρόλαυτά, επιστημαίνεται ότι η ανάπτυξη ενός τέτοιου κώδικα παρουσιάζει ενδιαφέρον δεδομένου ότι το  $T_2O$  που παράγεται με τεχνητό τρόπο στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος είναι γενικά ρυπαντής του ψυκτικού ύδατος του αντιδραστήρα είτε αυτό είναι ελαφρύ είτε βαρύ ύδωρ και επιπλέον είναι άγνωστες (εικάζονται μόνο) οι ποσότητες του  $T_2$  και επομένως και του  $T_2O$  που υπάρχουν σήμερα στον πλανήτη και χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του πυρηνικού οπλοστασίου των υδρογονοβομβών.

Σε σχέση με τα λοιπά παράπλευρα αποτελέσματα και τις εφαρμογές που προκύπτουν από αυτή τη Διδακτορική Διατριβή αναφέρεται επιπλέον, ότι οι κώδικες για τις ιδιότητες αναπτύχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να επεκτείνονται εύκολα, όταν χρειάζεται, τόσο ώστε να υπολογίζονται και άλλες ιδιότητες όσο και να

τροποποιούνται για να δέχονται ως είσοδο και άλλα ζεύγη θερμοδυναμικών μεγεθών –πέραν της πίεσης και της θερμοκρασίας– όπως για παράδειγμα, την ενθαλπία και την πίεση ή την εντροπία και τη θερμοκρασία ή την ενθαλπία και την εντροπία. Το τελευταίο αυτό πλεονέκτημα οδηγεί σε κώδικες υπολογισμού θερμοφυσικών ιδιοτήτων με δυνατότητα "πολλαπλής εισόδου" και παρουσιάζεται η δυνατότητα για την εν καιρώ εκμετάλλευση του. Στα πλαίσια της υπό ανάπτυξη σχετικής εφαρμογής διατυπώνονται για το ελαφρύ και το βαρύ ύδωρ συσχετίσεις που συνδέουν κατά ευθύ και αντίστροφο τρόπο για την υγρή και την ατμάωδη φάση κορεσμού:

- την εντροπία κορεσμού με τη θερμοκρασία κορεσμού, και
- την πίεση κορεσμού με την πυκνότητα κορεσμού,

Πιστεύεται ότι, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, με βάση την τρέχουσα βιβλιογραφία, οι εν λόγω συσχετίσεις είναι επιστημονικά πρωτότυπες και θα εξυπηρετήσουν την ερευνητική κοινότητα όταν δημοσιοποιηθούν. Συγκεκριμένα αν είναι  $x$ ,  $y$  και  $z$  τα καταστατικά μεγέθη πίεσης, θερμοκρασίας και ειδικού όγκου, οι συσχετίσεις αυτές υλοποιούμενες στο σύνολο της εφαρμογής θα εξυπηρετήσουν ειδικά ώστε όταν ο χρήστης ενός κώδικα ιδιοτήτων επιθυμεί αντί η είσοδος να είναι μόνο ένα ζεύγος (καταστατικό μέγεθος  $x$ , καταστατικό μέγεθος  $y$ ) να παρέχεται και η δυνατότητα η είσοδος να είναι και:

- ένα ζεύγος του τύπου (καταστατικό μέγεθος  $x$ , καταστατικό μέγεθος  $z$ ) ή και
- ένα ζεύγος του τύπου (καταστατικό μέγεθος  $y$ , καταστατικό μέγεθος  $z$ ),

ή και

- ένα ζεύγος του τύπου (θερμοδυναμική ιδιότητα  $q$ , θερμοδυναμική ιδιότητα  $v$ ) ή και

ένα ζεύγος του τύπου (θερμοδυναμική ιδιότητα  $q$ , καταστατικό μέγεθος  $x, y$  ή  $z$ ) κ.ο.κ. και το αποτέλεσμα να συμπεριλαμβάνει τις υπόλοιπες θερμοφυσικές ιδιότητες και τα υπόλοιπα καταστατικά μεγέθη. Παρόμοιοι τύπου εφαρμογές δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα ούτε για το βαρύ ύδωρ, ούτε για το Νάτριο. Για την περίπτωση του ελαφρού ύδατος, μόλις το 2001 δημοσιεύτηκαν εξισώσεις για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες που επιτρέπουν είσοδο σε κώδικες ιδιοτήτων με περισσότερα από ενός τύπου ζεύγη καταστατικών μεγεθών, ή θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.

Τέλος, στο παρόν Κεφάλαιο δίδονται στοιχεία για την επιπλέον μελέτη που θα πρέπει να γίνει για την σύγκριση της ψυκτικής συμπεριφοράς του ελαφρού και του βαρέος ύδατος σε τυπικό κανάλι ψύξεως Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος.

## **9.2 Κώδικας για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του T<sub>2</sub>O.**

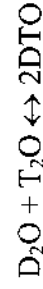
### **9.2.1 Η σημασία του Τριτίου (Υδρογόνο-3,<sup>3</sup>H) και του T<sub>2</sub>O (οξειδίου του Τριτίου).**

Το Τρίτιο (<sup>3</sup>H ή <sup>3</sup>T) είναι το μόνο ραδιενεργό ισότοπο του υδρογόνου. Ο πυρήνας του ατόμου του Τριτίου αποτελείται από ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια. Το σύνθηες υδρογόνο (<sup>1</sup>H) αποτελεί το 99.9% του υδρογόνου που απαντάται στη φύση. Το Δευτέριο (<sup>2</sup>H ή <sup>2</sup>D) αποτελεί το 0.02% του υδρογόνου που απαντάται στη φύση. Το Τρίτιο είναι μόλις το 10<sup>-18</sup>%. Οι πλέον συνηθισμένες μορφές του Τριτίου είναι το αέριο Τρίτιο (HT) και το τριτιωμένο νερό (HTO). Στην περίπτωση του τριτιωμένου νερού, ένα άτομο Τριτίου αντικαθιστά ένα από τα άτομα υδρογόνου του ε.υ. Οι χημικές ιδιότητες του Τριτίου είναι παρόμοιες με του φυσικού υδρογόνου. Τρίτιο μπορεί να παραχθεί τόσο από φυσικές διαδικασίες, όσο και από τεχνητές (π.χ. πυρηνικοί αντιδραστήρες και πυρηνικές δοκιμές). Σε εγκαταστάσεις παραγωγής Τριτίου και ιδιαίτερα σε πειραματικές εγκαταστάσεις σύντηξης (fusion) μπορεί να παράγονται και μικρές ποσότητες οξειδίου του Τριτίου (T<sub>2</sub>O). Στη Γη, το Τρίτιο που παράγεται με φυσικές διαδικασίες είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με αέρια της ανώτερης ατμόσφαιρας. Το Τρίτιο που παράγεται στην ατμόσφαιρα, ενσωματώνεται στο νερό και πέφτει στη γη ως βροχή, μπλίνοντας έτσι στον υδρολογικό κύκλο. Ο ρυθμός παραγωγής και ο ρυθμός καταστροφής του φυσικώς παραγομένου Τριτίου, διατηρεί μόνιμα στο γήινο περιβάλλον μία συνολική ποσότητα 7.3 kg. Σύμφωνα με το ANL (2001), 36.5 kg Τριτίου υπάρχουν επιπλέον στο περιβάλλον εξαιτίας των πυρηνικών δοκιμών του παρελθόντος, τα οποία και βαίνουν απομεινόμενα ακολουθώντας το χρόνο ημιζωής του Τριτίου (12 έτη). Επίσης, σύμφωνα με την ίδια πηγή, στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος παράγεται ένα άτομο Τριτίου για κάθε 10000 σχάσεις. Αυτό σημαίνει ότι κάθε μεγάλος εμπορικός Πυρηνικός Αντιδραστήρας παράγει περίπου 2 g Τριτίου σε ετήσια βάση, το οποίο κατά κανόνα ενσωματώνεται μέσα στις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου. Λίγοι από τους υπάρχοντες Πυρηνικούς Αντιδραστήρες

Ισχύος έχουν ειδικά τροποποιηθεί έτσι ώστε να παράγουν περισσότερο Τρίτιο. Το κυριότερο τέτοιο συγκρότημα ΠΑΙ βρίσκεται στην περιοχή Savannah River της Νότιας Καρολίνας των Ηνωμένων Πολιτειών και ελέγχεται από το αντίστοιχο ομοσπονδιακό Υπουργείο Ενέργειας (United States Department of Energy – USDOE). Το παραγόμενο Τρίτιο χρησιμοποιείται κυρίως στους υπάρχοντες πειραματικούς αντιδραστήρες σύντηξης. Σύμφωνα με τεκμηριωμένα δημοσιεύματα μικρές αλλά άγνωστες ποσότητες Τρίτιου που παράγονται στο υπόψιν συγκρότημα αλλά και άλλού χρησιμοποιούνται για την διατήρηση του Τρίτιου των υδρογονοβομβών του παγκοσμίου πυρηνικού οπλοστασίου. Όπως γίνεται αντιληπτό οι ποσότητες Τρίτιου –και ως εκ τούτου, και οι ποσότητες T<sub>2</sub>O- που παράγονται παγκοσμίως με τεχνητό τρόπο είναι μικρές και είναι ραδιοβιολογικά ή με άλλο τρόπο σημαντικές κυρίως στη γειτονιά του τόπου παραγωγής. Χαρακτηριστικά αναφέρεται (ANL, 2001) ότι ο υδροφόρος ορίζοντας στη γειτονιά πυρηνικών αντιδραστήρων ειδικά τροποποιημένων ώστε να παράγεται Τρίτιο φθάνει να έχει συγκέντρωση στο υπόψιν ισότοπο μέχρι και 7400 BqL<sup>-1</sup>, όταν η συνήθης συγκέντρωση Τρίτιου στα φυσικά επιφανειακά νερά φθάνει κατά κανόνα μέχρι το πολύ 0.1 BqL<sup>-1</sup>. Παρόλα αυτά οι θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O, παρουσιάζουν ενδιαφέρον, διότι το Τρίτιο είναι τελικά ρυπαντής τόσο του ε.υ. όσο και του β.υ. που χρησιμοποιείται στους Πυρηνικούς Αντιδραστήρες Ισχύος σύμφωνα με την αντίδραση χημικής ισορροπίας παραγωγής τριτιωμένου ελαφρού ύδατος:



ή την αντίδραση χημικής ισορροπίας παραγωγής τριτιωμένου βαρέος ύδατος:



με σταθερές ισορροπίας  $K \approx 4$ , 25 °C

Ιδιαίτερα μάλιστα έχει πολλαπλώς επισημανθεί από ερευνητές ότι ο κυριότερος παγκόσμιος προμηθευτής βαρέος ύδατος, η Atomic Energy of Canada Limited (AECLtd), δεν μπορεί να παρέχει βαρύ ύδωρ που να μην περιέχει Τρίτιο έστω και σε ελάχιστη συγκέντρωση. Μάλιστα οι ενδιαφερόμενοι ερευνητές διατηρούν ή αναζητούν βαρύ ύδωρ που έχει παραχθεί πριν το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.

### 9.2.2 Γενικά για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O.

Όπως αναφέρθηκε, δεν έχουν δημοσιευθεί μέχρι σήμερα (2002) εξισώσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O. Οι κυριότεροι λόγοι είναι συνοπτικά οι εξής:

- Το T<sub>2</sub>O υπάρχει στη φύση σε ελάχιστες ποσότητες και η παραγωγή του είναι δύσκολη και μικρή. Ως εκ τούτου, η συγκέντρωση ικανής ποσότητας καθαρού T<sub>2</sub>O για την πειραματική διακρίβωση των ακριβών τιμών των θερμοφυσικών ιδιοτήτων είναι εξαιρετικά ασύμφορη.
- Σε συνθήκες περιβάλλοντος το T<sub>2</sub>O αντιδρά άμεσα με την υγρασία της ατμόσφαιρας και μετατρέπεται σε HTO, το οποίο φυσικά παρουσιάζει σημαντικά διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες.
- Το T<sub>2</sub>O εξαιτίας του περιεχόμενου Τριτίου είναι ραδιενεργό, και τέλος
- Δεν υπάρχει εμπορικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη τέτοιων εξισώσεων δεδομένου ότι το T<sub>2</sub>O δεν νοείται ως εργαζόμενο μέσο σε καμία γνωστή σήμερα εφαρμογή παρά μόνο ως ρυπαντής.

Με δεδομένη επομένως την έλλειψη τέτοιων εξισώσεων θερμοφυσικών ιδιοτήτων μόνο προσεγγίσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O μπορούν να διατυπώνονται. Οι προσεγγίσεις αυτές βασίζονται κατά κανόνα στις υπάρχουσες καταστατικές εξισώσεις και εξισώσεις για τις υπόλοιπες θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού και του βαρέος ύδατος.

### 9.2.3 Ο κώδικας TRIO\_LISP.

Στα πλαίσια των παράλευρων αποτελεσμάτων και εφαρμογών της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής είναι έτοιμος προς δημοσιοποίηση κώδικας ηλεκτρονικού υπολογιστή που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του T<sub>2</sub>O. Ο κώδικας έχει ονομασθεί TRIO\_LISP (**TR**itium **O**xide **L**iquid and **S**tream **P**roperties). Ο κώδικας υπολογίζει τις θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O –όπως και για την περίπτωση του ελαφρού και του βαρέος ύδατος– για δεδομένη πίεση P και θερμοκρασία T, πράγμα που ειδικά εξυπηρετεί σε προβλήματα Θερμοδυναμικής Ανάλυσης. Οι σχέσεις εκείνες που θεωρήθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες, και ακριβείς για τη σύνταξη του κώδικα, βασίζονται στις αντίστοιχες σχέσεις για το ε.υ. και το β.υ. μέσα από τις οποίες και μετά από εύλογες παραδοχές, με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, υπολογίζονται και οι θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O. Ο λόγος για την

χρησιμοποίηση αυτών των σχέσεων είναι ότι δεν έχουν διατυπωθεί μέχρι σήμερα (2002) σχέσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O. Κατά ακολουθία και με βάση την περιοχή πιέσεων και θερμοκρασιών για τις οποίες ισχύουν οι σχέσεις για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού και του βαρέος ύδατος γίνεται προσπάθεια να διατυπωθεί η "συνιστώμενη" κοινή περιοχή ισχύος των χρησιμοποιούμενων σχέσεων για το T<sub>2</sub>O. Αυτή θεωρείται και η "συνιστώμενη" περιοχή ισχύος του κώδικα για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι σχέσεις αυτές για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O, οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η κατασκευή τους καθώς και η περιοχή ισχύος τους πρόκειται να διατυπωθούν για πρώτη φορά. Οι υπολογιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πυκνότητας δεδομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας από πεπλεγμένες ως προς την πυκνότητα καταστατικές εξισώσεις είναι εντελώς ανάλογες με εκείνες που χρησιμοποιούνται και για την περίπτωση του β.υ. (βλ. Κεφάλαιο 5). Με ανάλογο τρόπο, όπως στο Κεφάλαιο 5 καλύπτεται επιπλέον και το πρόβλημα του ακριβούς υπολογισμού της θερμοκρασίας κορεσμού, αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού, από την πεπλεγμένη ως προς τη θερμοκρασία εξίσωση κορεσμού.

Ο κώδικας έχει συνταχθεί σε γλώσσα FORTRAN 77, κάτω από το Λειτουργικό Σύστημα UNIX HP-UX 7.05 B, το οποίο υποστηρίζεται από τον super-mini H/Y του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας HP 9000/380. Για τη συγκρότηση του κώδικα ακολουθήθηκαν αρχές δομημένου προγραμματισμού, προκειμένου να εξασφαλίζεται α) ευκολία στη χρήση, β) ευκολία στην τροποποίηση γ) ευκολία στη μετατροπή του κώδικα προκειμένου να μπορεί να εφαρμόζεται για άλλη έκδοση της γλώσσας FORTRAN ή/και για άλλο λειτουργικό σύστημα ή/και σε άλλο τύπου ηλεκτρονικό υπολογιστή, και τέλος δ) συμβατότητα στον τρόπο ανάπτυξης και στον τρόπο λειτουργίας με τους αντίστοιχους κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος και του βαρέος ύδατος, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάστηκαν στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο και το 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι αντίστοιχοι εμπορικοί κώδικες για τις θερμοφυσικές ιδιότητες του T<sub>2</sub>O δεν είναι σήμερα διαθέσιμοι στην αγορά.

Ως κυριότερες βιβλιογραφικές αναφορές για τα παραπάνω προσδιορίζονται οι επιστημονικές εργασίες του Ulrych G., 1981 και των Vedamuthu M., et. al., 1995. Στη μεν πρώτη περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο από τις εξισώσεις ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος, μπορούν με καλή ακρίβεια να υπολογίζονται οι ιδιότητες του



βαρέος ύδατος. Η τεχνική που προτείνει ο Ulrich εφαρμόζεται εν προκειμένου για να μεταπηδήσει κανείς από τις εξισώσεις ιδιοτήτων του βαρέος ύδατος στις ιδιότητες του T<sub>2</sub>O. Στη δεύτερη επιστημονική εργασία επισημαίνονται τρόποι για τον καλύτερο υπολογισμό μέρους των ιδιοτήτων του T<sub>2</sub>O στην υγρή φάση, όταν κάποιος βασίζεται για αυτές σε καταστατικές εξισώσεις του ελαφρού ή του βαρέος ύδατος.

Η δημοσιοποίηση του κώδικα και των αποτελεσμάτων του θα γίνει μέσω του παγκόσμιου δικτυακού ιστού, δια των ιστοσελίδων που παρουσιάστηκαν στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής.

### **9.3 Κώδικες υπολογισμού θερμοφυσικών ιδιοτήτων με "πολλαπλή είσοδο".**

#### **9.3.1 Γενικά.**

Ενας κώδικας υπολογισμού θερμοφυσικών ιδιοτήτων με "πολλαπλή είσοδο", πρέπει κατ' αρχήν να επιτρέπει τη δυνατότητα παροχής αποτελεσμάτων με χρήση περισσότερων του ενός ζεύγους μεταβλητών εισόδου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του κώδικα υπολογισμού των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του Νατρίου, ο οποίος παρουσιάστηκε στο προηγούμενο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο και στον οποίο η είσοδος είναι το ζεύγος (πίεση, θερμοκρασία), επόμενο εύκολα υλοποιήσιμο και εύλογα αναζητούμενο ζεύγος εισόδου είναι το (θερμοκρασία, πυκνότητα). Γίνεται κατανοητό ότι γενικά για τέτοιους κώδικες, άλλα ζεύγη εισόδου μπορούν να είναι τα:

- (εντροπία, θερμοκρασία) ή (s,T)
- (πίεση, πυκνότητα) ή (p,P)
- (πίεση, ενθαλπία) ή (P,h), και
- (εντροπία, ενθαλπία) ή (h,s)

χωρίς να αποκλείονται και άλλες επιλογές.

Σημειώνεται ότι το πλέον πρόσφορο ζεύγος δεδομένων εισόδου υπαγορεύεται κυρίως από τον τρόπο με τον οποίο έχουν κατασκευασθεί οι σχετικές εξισώσεις ιδιοτήτων. Για παράδειγμα αναφέρεται ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές στις εξισώσεις ιδιοτήτων για το ελαφρύ ύδωρ μέχρι και τις αρχές της δεκαετίας του '80 ήταν το ζευγάρι πίεση - θερμοκρασία, για να φθάσει μέχρι το 1990 να καθιερωθεί να γίνει το ζευγάρι θερμοκρασία – πυκνότητα. Η είσοδος σε έναν τέτοιο κώδικα με ζευγάρι δεδομένων

είσοδου διαφορετικό από εκείνο που ζητούν οι υπολογιστικά υλοποιούμενες εξισώσεις ιδιοτήτων μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολη εφαρμογή. Η δυσκολία έγκειται στο ότι κάθε ζευγάρι δεδομένων εισόδου άλλο από εκείνο που δέχονται οι εξισώσεις ιδιοτήτων πρέπει ακριβώς να "μεταφρασθεί επιτυχώς" σε εκείνο για το οποίο αυτές είναι σχεδιασμένες. Οπωσδήποτε όμως η επιλογή της "πολλαπλής εισόδου" διευκολύνει τον οποιοδήποτε χρήστη για την επίλυση ποικύλων θερμοϋδραυλικών προβλημάτων ή για την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός θερμοϋδραυλικού κυκλώματος.

### **9.3.2 Κώδικας υπολογισμού θερμοφυσικών ιδιοτήτων με "πολλαπλή είσοδο" για το Νάτριο.**

Πρόκειται για τροποποίηση του κώδικα SODIUM\_LISP, ώστε να δέχεται ως είσοδο τα ακόλουθα θερμοδυναμικά μεγέθη:

- πυκνότητα κορεσμού
- εντροπία κορεσμού
- ενθαλπία κορεσμού

Η τροποποίηση υπήρξε σχετικά εύκολη καθόσον ο κώδικας SODIUM\_LISP, υπολογίζει μόνο τις ιδιότητες κορεσμού του Νατρίου, οπότε η μετατροπή του οποιοδήποτε από τις παραπάνω εισόδους στην πίεση ή την θερμοκρασία κορεσμού που είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές για τις εξισώσεις των ιδιοτήτων κορεσμού δεν παρουσίασε ιδιαίτερες δυσκολίες.

Η δημοσιοποίηση του κώδικα "πολλαπλής εισόδου" για το κορεσμένο Νάτριο και των αποτελεσμάτων του θα γίνει μέσω του παγκόσμιου δικτυακού ιστού, δια των ιστοσελίδων που παρουσιάστηκαν στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής. Ο δικτυακός χρήστης θα έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ποια είσοδο από τις παραπάνω επιθυμεί και ανάλογα θα τροφοδοτείται με την κατάλληλη φόρμα υποβολής.

### **9.3.3 Άλλοι κώδικες υπολογισμού θερμοφυσικών ιδιοτήτων με "πολλαπλή είσοδο".**

#### **9.3.3.1 Κώδικας υπολογισμού με "πολλαπλή είσοδο" για το ελαφρύ ύδωρ.**

Πρόκειται για τροποποίηση του κώδικα LIGHT\_WASP, ώστε να δέχεται ως είσοδο τα ακόλουθα ζεύγη θερμοδυναμικών μεγεθών:

1. (πίεση, εντροπία) ή (P, s)
2. (πίεση, ενθαλπία) ή (P,h), και
3. (εντροπία, ενθαλπία) ή (h,s)
4. (θερμοκρασία, πυκνότητα) ή (T,ρ)
5. (εντροπία, θερμοκρασία) ή (s,T)
6. (πίεση, πυκνότητα) ή (P,ρ)

Ο τρόπος που γίνονται οι υπολογισμοί βασίζονται κυρίως στα όσα αναφέρονται στο IAPWS, 1997 και στους Wagner W. et al, 2000. Η επιστημονικές αυτές εργασίες παρουσιάζουν νέες καταστατικές εξισώσεις για το ελαφρύ ύδωρ με είσοδο την πίεση και τη θερμοκρασία, ή/και την πίεση και την πυκνότητα, οι οποίες αναπαριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις θερμοφυσικές ιδιότητες του συγκεκριμένου μέσου και επιτρέπουν μεγαλύτερη ταχύτητα στους υπολογισμούς. Επιπλέον οι εργασίες αυτές περιλαμβάνουν και τις λεγόμενες "αντίστροφες" εξισώσεις" (backward equations) οι οποίες μπορούν να προσδιορίσουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος και για δεδομένα ζεύγη πίεσης – ενθαλπίας και πίεσης – εντροπίας. Οι αντίστροφες αυτές εξισώσεις συμπληρώθηκαν σύμφωνα με το IAPWS, 2001 και με δεύτερη ομάδα τέτοιων εξισώσεων, οι οποίες μπορούν να προσδιορίσουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ελαφρού ύδατος και για δεδομένα ζεύγη ενθαλπίας – εντροπίας. Με αυτές τις σήμερα διατιθέμενες εξισώσεις μπορούν προγραμματιστικά να υλοποιηθούν στον τροποποιημένο κώδικα τα τρία πρώτα ζεύγη εισόδου (1,2 και 3).

Όσο αφορά στο ζεύγος εισόδου θερμοκρασίας – πυκνότητας (ζεύγος 4), ο κώδικας LIGHT\_WASP, όπως αυτός παρουσιάζεται στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο μπορεί εύκολα να αποδώσει τις ιδιότητες και για αυτήν την είσοδο. Για λόγους πληρότητας και καλύτερης ακρίβειας γίνεται επαλήθευση των αποτελεσμάτων με τις σχέσεις που παρουσιάζονται στο IAPWS, 1997.

Για τις εισόδους πίεσης – πυκνότητας (ζεύγος 5) και εντροπίας – θερμοκρασίας (ζεύγος 6) ήταν απαραίτητο να αναπτυχθούν ευθείς και αντίστροφες συσχετίσεις μεταξύ πίεσης κορεσμού και πυκνότητας κορεσμού, καθώς και μεταξύ θερμοκρασίας κορεσμού και εντροπίας κορεσμού, τόσο για το κορεσμένο υγρό, όσο και για τον κορεσμένο ατμό. Οι συσχετίσεις αυτές επιτρέπουν να εντοπισθεί η περιοχή του

διαγράμματος PT στο οποίο βρίσκεται το ζευγάρι εισόδου πίεση – πυκνότητα ή θερμοκρασία - εντροπία. Οι συσχετίσεις αυτές είναι παραπλήσιες με εκείνες που παρουσιάζουν οι Garland W.MJ. και Hoskins J.D., 1988.

Από το σημείο αυτό και έπειτα, οι υπόλοιπες ιδιότητες μπορούν να υπολογισθούν με επαναληπτικές διαδικασίες, ή και με τον τρόπο που υιοθετείται και από τους Garland W.MJ. και Hoskins J.D., 1988.

Η δημοσιοποίηση του κώδικα "πολλαπλής εισόδου" για το ελαφρύ ύδωρ και των αποτελεσμάτων του θα γίνει μέσω του παγκόσμιου δικτυακού ιστού, δια των ιστοσελίδων που παρουσιάσθηκαν στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής. Ο δικτυακός χρήστης θα έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ποια είσοδο από τις παραπάνω επιθυμεί και ανάλογα θα τροφοδοτείται με την κατάλληλη φόρμα υποβολής.

### **9.3.3.2 Κώδικας υπολογισμού με "πολλαπλή είσοδο" για το βαρύ ύδωρ.**

Πρόκειται για τροποποίηση του κώδικα HEAVY\_WASP, ώστε να δέχεται ως είσοδο τα ακόλουθα ζεύγη θερμοδυναμικών μεγεθών:

1. (πίεση, εντροπία) ή (P, s)
2. (πίεση, ενθαλπία) ή (P,h), και
3. (εντροπία, ενθαλπία) ή (h,s)
4. (θερμοκρασία, πυκνότητα) ή (T,ρ)
5. (εντροπία, θερμοκρασία) ή (s,T)
6. (πίεση, πυκνότητα) ή (P,ρ)

Ο τρόπος που γίνονται οι υπολογισμοί βασίζονται κυρίως στα όσα αναφέρονται στο IAPWS, 1997, στους Wagner W. et al, 2000 και στο IAPWS, 2001 και παρουσιάσθηκαν στην αμέσως προηγούμενη παράγραφο 9.3.3.1. Οι αντίστροφες εξισώσεις που διατίθενται σε αυτήν την ομάδα εργασιών τροποποιούνται ώστε να υπολογίζουν τις ιδιότητες του βαρέος ύδατος σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στον Ultych G., 1981 και στους Vedamuthu M., et. al., 1995. Με αυτές τις σήμερα διατιθέμενες τροποποιημένες εξισώσεις μπορούν προγραμματιστικά να υλοποιηθούν στον τροποποιημένο κώδικα τα τρία πρώτα ζεύγη εισόδου (1,2 και 3).

Όσο αφορά στο ζεύγος εισόδου θερμοκρασίας – πυκνότητας (ζεύγος 4), ο κώδικας HEAVY\_WASP, όπως αυτός παρουσιάζεται στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο μπορεί εύκολα να αποδώσει τις ιδιότητες και για αυτήν την είσοδο.

Για τις εισόδους πίεσης – πυκνότητας (ζεύγος 5) και εντροπίας – θερμοκρασίας (ζεύγος 6) ήταν απαραίτητο να αναπτυχθούν ευθείς και αντίστροφες συσχετίσεις μεταξύ πίεσης κορεσμού και πυκνότητας κορεσμού, καθώς και μεταξύ θερμοκρασίας κορεσμού και εντροπίας κορεσμού, τόσο για το κορεσμένο υγρό, όσο και για τον κορεσμένο ατμό. Οι συσχετίσεις αυτές επιτρέπουν να εντοπισθεί η περιοχή του διαγράμματος PT στο οποίο βρίσκεται το ζευγάρι εισόδου πίεση – πυκνότητα ή θερμοκρασία - εντροπία. Οι συσχετίσεις αυτές είναι παραπλήσιες με εκείνες που παρουσιάζει ο Durrmayaz A., 1997.

Από το σημείο αυτό και έπειτα, οι υπόλοιπες ιδιότητες μπορούν να υπολογισθούν με επαναληπτικές διαδικασίες, ή και με τον τρόπο που υιοθετείται και από τον Durrmayaz A., 1997.

Η δημοσιοποίηση του κώδικα "πολλαπλής εισόδου" για το βαρύ ύδωρ και των αποτελεσμάτων του θα γίνει μέσω του παγκόσμιου δικτυακού ιστού, δια των ιστοσελίδων που παρουσιάστηκαν στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής. Ο δικτυακός χρήστης θα έχει τη δυνατότητα να επλέξει ποια είσοδο από τις παραπάνω επιθυμεί και ανάλογα θα τροφοδοτείται με την κατάλληλη φόρμα υποβολής.

Οι λοιπές αναπτυσσόμενες δυνατότητες για κώδικες υπολογισμού θερμοφυσικών ιδιοτήτων αφορούν φυσικά τα ψυκτικά μέσα ελαφρύ και βαρύ ύδωρ.

#### **9.4 Σύγκριση της ψυκτικής συμπεριφοράς του ελαφρού και του βαρέος ύδατος στο κανάλι ψύξεως Πυρηνικού Αντιδραστήρα Ισχύος.**

Όπως αναφέρεται και στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο<sup>1</sup> για την πλήρη διερεύνηση των φαινομένων που εξετάζονται εκεί απαιτείται η εφαρμογή να γίνει και για άλλες σχέσεις ταχύτητας επανάνυξης πέραν των (7-4) και (7-6) που διατίθενται σήμερα στην σχετική

---

<sup>1</sup> §7.6

βιβλιογραφία. Ειδικότερα προτείνεται η σχετική διερεύνηση να συμπεριλάβει και τις πλέον σύγχρονες σχέσεις για την ταχύτητα επανάψυξης που παρουσιάζονται από τους Hinis E. και Simopoulos S.E., 2002. Κατά την εφαρμογή των σχέσεων αυτών πρέπει επίσης να διερευνηθεί και η επίδραση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας  $h$ , όπου αυτός παίζει ρόλο στις σχέσεις για την ταχύτητα επανάψυξης. Επομένως πρέπει να διερευνηθεί και ποιες άλλες διατυπώσεις για το  $h$  πέραν της (7-5), εξυπηρετούν την καλύτερη αναπαράσταση των συνθηκών ροής και μεταφοράς θερμότητας που ενδιαφέρουν στο επιλύόμενο πρόβλημα.

Επιπλέον στα πλαίσια και άλλων επιλυόμενων προβλημάτων μπορούν να μελετηθούν:

- η μείωση της παροχής μάζας στην έξοδο του καναλιού ψύξεως για σταδιακή μείωση της παροχής μάζας στην είσοδο, τόσο για ελαφρύ όσο και για βαρύ ύδωρ.
- κατ' αναλογία η αύξηση του κλάσματος κενού στην έξοδο του καναλιού ψύξεως για σταδιακή μείωση της παροχής μάζας στην είσοδο, τόσο για ελαφρύ όσο και για βαρύ ύδωρ.
- η αύξηση του κλάσματος κενού στο σημείο του περιβλήματος της ράβδου που παρουσιάζει τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας για σταδιακή μείωση της παροχής μάζας στην είσοδο, τόσο για ελαφρύ όσο και για βαρύ ύδωρ.
- η χρονική στιγμή κατά την οποία προσεγγίζεται η κρίσιμη θερμική ροή στο κανάλι για σταδιακή μείωση της παροχής μάζας στην είσοδο, τόσο για ελαφρύ όσο και για βαρύ ύδωρ.

*Ε.Μ. Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας*

**ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ  
ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ  
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ**

**ΤΕΥΧΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΤΟΥ

**ΝΙΚΟΛΑΟΥ Π. ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΥ**

Μηχανολόγου Μηχανικού, Διπλ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2003





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

### ΤΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ LIGHT\_WASP

#### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

I.1	Τα κείμενα των υποπρογραμμάτων.....	1
I.1.1	Υπορουτίνα CHECKPT.....	1
I.1.2	Υπορουτίνα CONDUCTIVE.....	3
I.1.3	Blockdata CONSTANTS.....	4
I.1.4	Υπορουτίνα DENSF.....	6
I.1.5	Υπορουτίνα DENSJ.....	6
I.1.6	Function DFPD.....	6
I.1.7	Function DFPR3.....	7
I.1.8	Function DFPR4.....	8
I.1.9	Function DFPS.....	8
I.1.10	Υπορουτίνα ENERGY.....	9
I.1.11	Υπορουτίνα ENTHALPY.....	9
I.1.12	Υπορουτίνα ENTROPY.....	10
I.1.13	Κυρίως Πρόγραμμα EXAMPLE.....	10
I.1.14	Function FP.....	12
I.1.15	Function FPR3.....	12
I.1.16	Function FPR4.....	13
I.1.17	Function FPS.....	14
I.1.18	Function FTS.....	14
I.1.19	Υπορουτίνα IBM_JTC.....	15
I.1.20	Υπορουτίνα LIGHT_WASP.....	15
I.1.21	Function PRL.....	19
I.1.22	Function PRS.....	19
I.1.23	Υπορουτίνα QMUST.....	20
I.1.24	Υπορουτίνα SHP.....	22
I.1.25	Υπορουτίνα SHR_SOVE.....	23

I.1.26	Υπορουτίνα SHV.	24
I.1.27	Υπορουτίνα SOLVE.	24
I.1.28	Υπορουτίνα SVLWL.	25
I.1.29	Υπορουτίνα SVLWV.	26
I.1.30	Υπορουτίνα TENSION.	28
I.1.31	Υπορουτίνα TOTAL.	28
I.1.32	Υπορουτίνα VISCOSITY.	30
I.2	Τα αρχεία κατασκευής εκτελέσιμου προγράμματος.	30
I.2.1	makefile1.	30
I.2.2	makefile2.	31
I.3	Ενδεικτικά αποτελέσματα του κώδικα.	34
I.4	Λεπτομερής παρουσίαση του κώδικα.	62
I.4.1	Η υπορουτίνα LIGHT_WASP.	63
I.4.2	Η υπορουτίνα CHECKPT.	65
I.4.3	Η υπορουτίνα QMUST.	67
I.4.4	Η υπορουτίνα TOTAL.	70
I.4.5	Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα.	72
I.4.5.1	H function FTS.	72
I.4.5.2	H function FPS.	73
I.4.5.3	H function DFPS.	73
I.4.5.4	H υπορουτίνα DENSF.	74
I.4.5.5	H υπορουτίνα DENSJ.	74
I.4.5.6	H υπορουτίνα SVLWL.	75
I.4.5.7	H υπορουτίνα SVLWV.	76
I.4.5.8	H function PRL.	78
I.4.5.9	H function FPR3.	78
I.4.5.10	H function DFPR3.	80
I.4.5.11	H function FPR4.	81
I.4.5.12	H function DFPR4.	82
I.4.5.13	H function FP.	83
I.4.5.14	H function DFPD.	84
I.4.5.15	H υπορουτίνα SOLVE.	85
I.4.5.16	H υπορουτίνα ENERGY.	88
I.4.5.17	H υπορουτίνα ENTHALPY.	89
I.4.5.18	H υπορουτίνα ENTROPY.	89

I.4.5.19	Η υπορουτίνα SHP.....	90
I.4.5.20	Η υπορουτίνα SHV.....	91
I.4.5.21	Η υπορουτίνα SHR_SOVE.....	92
I.4.5.22	Η υπορουτίνα IBM_JTC.....	93
I.4.5.23	Η υπορουτίνα VISCOSITY.....	94
I.4.5.24	Η υπορουτίνα CONDUCTIVE.....	95
I.4.5.25	Η υπορουτίνα TENSION.....	96



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

### ΤΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ LIGHT\_WASP

#### Ι.1 Τα κείμενα των υποπρογραμμάτων.

Τα υποπρογράμματα παρατίθενται κατά την αλφαβητική σειρά της ονομασίας τους. Συμπεριλαμβάνεται το κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE. Αναφέρονται τα αρχεία του Υπολογιστικού Συστήματος HP-UX φίλτρος 7.05 B 9000/375 στα οποία βρίσκονται τα υποπρογράμματα σε ηλεκτρονική μορφή.

##### Ι.1.1 Υπορουτίνα CHECKPT.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/checkpt.f)

```
C      SUBROUTINE CHECKPT(TS,JR,IS)
C
C      CHECK PRESSURE AND TEMPERATURE FOR OUT OF RANGE
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      COMMON
      * /Z1/PMIN,PMAX
      * /Z2/TMIN,TMAX
      * /Z3/PC,TC,VC
      * /Z4/TRT,TR1,TR2,TR3
      * /Z5/PR1,PR2
      * /K1/PP,PR
      * /K2/TT,TR
      EXTERNAL FPS,DFPS
      DATA ZERO/0./
      DATA EPS,NDEC,ITMAX/1.D-5,5,100/
C
C      CHECK PRESSURE FOR OUT OF RANGE
C
      IF (((PP.LT.PMIN).OR.(PP.GT.PMAX)).AND.(PP.NE.ZERO)) THEN
          PRINT *
          PRINT *, 'Desired pressure out of range!'
          PRINT *
          STOP
      END IF
C
C      CHECK TEMPERATURE FOR OUT OF RANGE
C
      IF (((TT.LT.TMIN).OR.(TT.GT.TMAX)).AND.(TT.NE.ZERO)) THEN
          PRINT *
          PRINT *, 'Desired temperature out of range!'
          PRINT *
          STOP
      END IF
```

```

C
C IF PRESSURE AND TEMPERATURE ARE EQUAL TO 0 CHECK FOR CORRECT CALL
C OF SATURATION PROPERTIES
C
C IF ((PP.EQ.ZERO).AND.(TT.EQ.ZERO)) THEN
C   PRINT *
C   PRINT *, 'Both pressure and temperature cannot be 0.!'
C   PRINT *
C   STOP
C END IF
C
C IF PRESSURE OR TEMPERATURE IS EQUAL TO 0 CHECK FOR OUT OF
C SATURATION RANGE
C
C IF ((PP.GT.PC).AND.(TT.EQ.ZERO)).OR.
C - ((TT.GT.TC).AND.(PP.EQ.ZERO)) THEN
C   PRINT *
C   PRINT *, 'Such a saturation state does not exist!'
C   PRINT *
C   STOP
C END IF
C IS=0
C TS=ZERO
C IF (TT.EQ.ZERO) TT=TT+273.15D+0
C IF (PP.EQ.ZERO) THEN
C   PP=FPS(TT)*10
C   TS=TT
C   IS=1
C ELSE
C   IF ((PP.LE.PC).AND.(TT.LE.TC)) THEN
C     TS=FTS(PP)
C     IF (ABS(FPS(TS)).GT.EPS)
C +     CALL SOLVE(FPS,DFPS,EPS,NDEC,TS,JTMAX,IER)
C     IS=1
C     IF (TT.EQ.273.15D+0) TT=TS
C   END IF
C END IF
C IF (ABS(TT-TS).LE.1.D+0) IS=2
C REDUCED PRESSURE AND TEMPERATURE
C PR=PP/PC
C TR=TT/TC
C DETERMINE THERMODYNAMIC SUB-REGION SPECIFICATION, JR
C JR=0
C IF ((TR.GE.TRT).AND.(TR.LE.TR1)) THEN
C   IF (ABS(TT-TS).LE.1.D-5) THEN
C     JR=6
C   ELSE
C     IF ((PR.GE.ZERO).AND.(PR.LT.PRS(TR))) JR=2
C     IF ((PR.GT.PRS(TR)).AND.(PR.LE.PR2)) JR=1
C   END IF
C END IF
C IF ((TR.GT.TR1).AND.(TR-1).LT.1.D-5) THEN
C   IF (ABS(TT-TS).LE.1.D-5) THEN
C     JR=5
C   ELSE
C     IF ((PR.GE.ZERO).AND.(PR.LE.PRL(TR))) JR=2
C     IF ((PR.GT.PRL(TR)).AND.(PR.LT.PRS(TR))) JR=3

```

```

      IF ((PR.GT.PRS(TR)).AND.(PR.LT.PR2)) JR=4
      END IF
    END IF
  IF ((TR-1).GE.1.D-5).AND.(TR.LT.TR2)) THEN
  IF ((PR.GE.ZERO).AND.(PR.LE.PRL(TR))) JR=2
  IF ((PR.GT.PRL(TR)).AND.(PR.LE.PR2)) JR=3
  END IF
  IF ((TR.GE.TR2).AND.(TR.LE.TR3)) JR=2
  IF (JR.EQ.0) THEN
  PRINT *, 'JR indicator value is zero!'
  STOP
  END IF
  RETURN
END

```

### 1.1.2 Υπορουτίνα CONDUCTIVE.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fin/conductive.f)

```

C
C SUBROUTINE CONDUCTIVE (K)
C
C COMPUTE THERMAL CONDUCTIVITY OF LIGHT WATER IN W/(mK) GIVEN
C TEMPERATURE IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C FROM AN EQUATION SUITABLE FOR INDUSTRIAL USE
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION K
C DIMENSION A(4),B(3)
C COMMON
C /Z11/PSEUDODC,PSEUDOTC,PSEUDOPC
C /K2/TT,TR
C /K3/DD
C DATA
C A
C + /0.0102811D+0,0.0299621D+0,0.0156146D+0,-0.00422464D+0/,
C B,B1,B2
C 1 /-0.397070D+0,0.400302D+0,1.060000D+0,-0.171587D+0,
C 2.392190D+0/,
C C1,C2,C3,C4,C5,C6
C 1 /0.642857D+0,-4.11717D+0,-6.17937D+0,0.00308976D+0,
C 2 0.0822994D+0,10.0932D+0/,
C D1,D2,D3,D4,ELC
C + /0.0701309D+0,0.0118520D+0,0.00169937D+0,-1.0200D+0,1.D+0/
C PSEUDODR=DD/PSEUDODC
C PSEUDOTR=TT/PSEUDOTC
C ELR0=0.D+0
C DO 10 I=1,4
C ELR0=ELR0+A(I)*(PSEUDOTR**(I-1))
10 CONTINUE
C ELR0=DSQRT(PSEUDOTR)*ELR0
C ELR1=B(1)+B(2)*PSEUDODR+B(3)*DEXP(B1*((PSEUDODR+B2)**2))
C DELTATR=DABS(PSEUDOTR-1.)+C4
C Q=2.+C5/(DELTATR**0.6)
C R=Q+1.
C S=1./DELTATR
C IF (PSEUDOTR.LT.1.D+0) S=C6/(DELTATR**0.6)
C ELR2=(D1/(PSEUDOTR**10)+D2)*(PSEUDODR**1.8)
C 1 *DEXP(C1*(1-(PSEUDODR**2.8)))
C 2 +D3*S*(PSEUDODR**Q)*DEXP((Q/R)*(1-(PSEUDODR**R)))
C 3 +D4*DEXP(C2*(PSEUDOTR**1.5)+C3/(PSEUDODR**5))

```

```

EL=ELC*(ELR0+ELR1+ELR2)
K=EL
RETURN
END

```

### 1.1.3 Blockdata CONSTANTS.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp/fin/constants.f)

```

C
C BLOCKDATA CONSTANTS
C
C BLOCKDATA SUBPROGRAM CONTAINING ALL CONSTANTS OF LIGHT_WASP
C BEING USED AT LEAST TWICE.ALL OTHER ONCE USED CONSTANTS ARE
C PART OF CORRESPONDING DATA COMMANDS IN INDIVIDUAL SUBPROGRAMS.
C COMMUNICATE WITH REST OF PACKAGE USING ONLY Z LABELLED COMMON
C COMMANDS
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION K(9)
C DIMENSION C(64),D(5,5)
C DIMENSION JPC1(32),JPC2(32),JPC3(32),JPC4(32)
C
C COMMONS LABELLED WITH Z REPRESENT ALL CONSTANTS OF LIGHT_WASP
C BEING USED AT LEAST TWICE
C
C COMMON
C * /Z1/PMIN, PMAX
C * /Z2/TMIN, TMAX
C * /Z3/PC, TC, VC
C * /Z4/TRT, TR1, TR2, TR3
C * /Z5/PR1, PR2
C * /Z6/R
C * /Z8/K
C * /Z9/C, C010, C011, C012, C310
C * /Z10/D
C * /Z11/PSEUDODC, PSEUDOTC, PSEUDOPC
C * /Z12/JPC1, JPC2, JPC3, JPC4
C DATA
C
C PRESSURE AND TEMPERATURE RANGE OF EQUATIONS FOR THERMODYNAMIC
C AND TRANSPORT PROPERTIES OF LIGHT WATER
C
C * PMIN, PMAX/0.006.D+0,1000.D+0/,
C * TMIN, TMAX/273.16D+0,1073.15D+0/,
C
C CRITICAL PRESSURE,TEMPERATURE AND SPECIFIC VOLUME OF LIGHT WATER
C
C * PC,TC,VC/221.2D+0,647.3D+0,3.17D+0/,
C
C REDUCED TEMPERATURE RANGES OF THERMODYNAMIC SUB-REGIONS
C
C * TRT, TR1, TR2, TR3
C * /4.21999073D-1,9.626911787D-1,1.333462073D+0,1.657886606D+0/,
C
C MAXIMUM REDUCED PRESSURE
C
C * PR1,PR2/7.475191707D-1,4.520795660D+0/,
C
C LIGHT WATER CONSTANT

```



```

*      R/0.46151D+0/
C
C      NUMERICAL VALUES OF PRIMARY CONSTANTS OF EQUATION OF STATE
C      OF LIGHT WATER BEING USED IN THIS PACKAGE
C
C      DATA
C
C      SATURATION LINE
C
*      K
1 /-7.691234564D+0,-2.608023696D+1,-1.681706546D+2,6.423285504D+1,
2 -1.189646225D+2,4.167117320D+0,2.097506760D+1,1.D+9,6.D+0/,
C
C      THERMODYNAMIC SUB-REGIONS 3 AND 4
C
*      C
1 /-1.72260420D-2,-7.77175039D+0,4.20460752D+0,-2.76807038D+0,
2 2.10419707D+0,-1.14649588D+0,2.23138085D-1,1.16250363D-1,
3 -8.20900544D-2,0.D+0,7.08636085D-1,1.23679455D+1,-1.20389004D+1,
4 5.40437422D+0,-9.93865043D-1,6.27523182D-2,-7.74743016D+0,
5 3*0.D+0,-4.29885092D+0,4.31430538D+1,-1.41619313D+1,
6 4.04172459D+0,1.55546326D+0,-1.66568935D+0,3.24881158D-1,
7 2.93655325D+1,2*0.D+0,7.94841842D-6,8.0885947D+1,-8.36153380D+1,
8 3.58636517D+1,7.51895954D+0,-1.26160640D+1,1.09717462D+0,
9 2.12145492D+0,-5.46529566D-1,2.75971776D-6,-5.09073985D-4,
A 8*0.D+0,2.10636332D+2,9*0.D+0,5.528935335D-2,-2.336365955D-1,
B 3.697071420D-1,-2.596415470D-1,6.828087013D-2/,
*      C010,C011,C012,C310
+ /1.94129239D-2,-1.69470576D-3,-4.311577033D+0,8.32875413D+0/,
C
C      THERMODYNAMIC SUB-REGION 4
C
*      D
1 /2*0.D+0,-1.717616747D+0,1.301023613D+0,3.426663535D-4,
1 /5*0.D+0,
2 2*0.D+0,3.526389875D+0,-2.642777743D+0,-1.236521258D-3,
3 2*0.D+0,-2.690899373D+0,1.996765362D+0,1.155018309D-3,2*0.D+0,
4 9.070982605D-1,-6.661557013D-1,3*0.D+0,-1.138791156D-1,
5 8.270860589D-2,0.D+0/
C      DATA
C
C      PSEUDOCRITICAL DENSITY AND TEMPERATURE OF LIGHT WATER TO BE
C      USED IN THE CALCULATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND VISCOSITY
C
*      PSEUDOEC,PSEUDOTC,PSEUDOPC
+ /0.317363D+0,647.27D+0,221.15/
C      DATA
*      JPC1
1 /2,3,6,7,10,11,14,15,18,19,22,23,26,27,30,31,34,
2 35,38,39,42,43,46,47,50,51,54,55,58,59,62,63/,
*      JPC2
1 /4,5,6,7,12,13,14,15,20,21,22,23,28,29,30,31,36,
2 37,38,39,44,45,46,47,52,53,54,55,60,61,62,63/,
*      JPC3
1 /8,9,10,11,12,13,14,15,24,25,26,27,28,29,30,31,40,
2 41,42,43,44,45,46,55,56,57,58,59,60,61,62,63/,
*      JPC4
1 /16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,
2 48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63/
C      END

```

#### 1.1.4 Υπορουτίνα *DENSF*.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/densf.f)

```
C
SUBROUTINE DENSF(DF)
C
C   COMPUTE DENSITY OF LIQUID LIGHT WATER IN g/cm3 GIVEN PRESSURE
C   IN BARS AND TEMPERATURE IN K UNITS. IF PRESSURE OR TEMPERATURE
C   IS EQUAL TO 0 SATURATED LIQUID DENSITY IS RETURNED
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON/K3/DD
EXTERNAL FP,DFPD
DATA EPS,NDEC,ITMAX/1.D-5,5,100/
DF=0.
CALL SVLWV(DL)
DD=DL
CALL SOLVE(FP,DFPD,EPS,NDEC,DD,ITMAX,IER)
DF=DD
RETURN
END
```

#### 1.1.5 Υπορουτίνα *DENSG*.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/densg.f)

```
C
SUBROUTINE DENSG(DG)
C
C   COMPUTE DENSITY OF LIGHT WATER VAPOR IN g/cm3 GIVEN PRESSURE
C   IN BARS AND TEMPERATURE IN K UNITS. IF PRESSURE OR TEMPERATURE
C   IS EQUAL TO 0 SATURATED VAPOR DENSITY IS RETURNED
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON/K3/DD
EXTERNAL FP,DFPD
DATA EPS,NDEC,ITMAX/1.D-5,5,100/
DG=0.
CALL SVLWV(DV)
DD=DV
CALL SOLVE(FP,DFPD,EPS,NDEC,DD,ITMAX,IER)
DG=DD
RETURN
END
```

#### 1.1.6 *Function DFPD*.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/dfpd.f)

```
C
FUNCTION DFPD(DD)
C
C   COMPUTE 1st PARTIAL DERIVATIVE OF LIGHT WATER PRESSURE BY
C   DENSITY
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
```

```

COMMON
* /Z6/R
* /K2/TT,TR
* /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
CALL QMUST
DEPD=R*TT*(1+2*DD*Q+4*DD*DD*QDT+DD*DD*DD*Q2D2T)
RETURN
END

```

### 1.1.7 Function DFPR3.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp\_fin/dfpr3)

```

C
C FUNCTION DFPR3(X3)
C
C COMPUTE 1st PARTIAL DERIVATIVE OF REDUCED PRESSURE OF LIGHT
C WATER VAPOR BY REDUCED SPECIFIC VOLUME IN THERMODYNAMIC
C SUB-REGIONS 3 AND 5
C
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION C(64)
C COMMON
C * /Z9/C,C010,C011,C012,C310
C * /K2/TT,TR
C DXSC0N=0.D+0
C DXSC1N=0.D+0
C DXSC2N=0.D+0
C DXSC3N=0.D+0
C DXSC4N=0.D+0
C DXSC6N=0.D+0
C DO 10 N=0,9
C IF (N.GE.2) DXSC0N=DXSC0N+(N**2-N)*C(N)/(X3**(N+1))
C   IF (N.GE.2).AND.(N.LE.6)
C + DXSC1N=DXSC1N+(N**2-N)*C(10+N)/(X3**(N+1))
C   IF ((N.GE.2).AND.(N.LE.7))
C + DXSC2N=DXSC2N+(N**2-N)*C(20+N)/(X3**(N+1))
C   IF (N.GE.2) DXSC3N=DXSC3N+(N**2-N)*C(30+N)/(X3**(N+1))
C   IF (N.LE.4) DXSC6N=DXSC6N+C(60+N)/(TR**(N+2))
C 10 CONTINUE
C DXSC0N=DXSC0N+(100-10)*C010/(X3**11)
C DXSC0N=DXSC0N+(121-11)*C011/(X3**12)
C DXSC0N=DXSC0N-C012/(X3**2)
C DXSC1N=DXSC1N-C(17)/(X3**2)
C DXSC2N=DXSC2N-C(28)/(X3**2)
C DXSC3N=DXSC3N-C310/(X3**2)
C DXSC4N=-30*C(41)*(TR-1)/((X3**7)*(TR**23))
C DXSC6N=30*(X3**4)*DXSC6N
C DFPR3=-DXSC0N-DXSC1N*(TR-1)-DXSC2N*((TR-1)**2)
C +DXSC3N*((TR-1)**3)+DXSC4N-DXSC6N
C RETURN
C END

```

### 1.1.8 Function DFPR4.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fin/dfpr4.f)

```
C
C
C COMPUTE 1st PARTIAL DERIVATIVE OF REDUCED PRESSURE OF LIQUID
C LIGHT WATER BY REDUCED SPECIFIC VOLUME IN THERMODYNAMIC
C SUB-REGIONS 4 AND 5
C
FUNCTION DFPR4(X4)
COMMON
* /Z4/TRT,TR1,TR2,TR3
* /Z10/D
* /K2/TT,TR
Y=(1-TR)/(1-TR1)
DXSDN1=0.D+0
DXSDN2=0.D+0
DXSDMN=0.D+0
DO 10 M=3,4
  DO 20 N=1,5
    DXSDN1=DXSDN1-N*(N-1)*D(M,N)*(Y**M)/(X4**(N+1))
  20 CONTINUE
  DXSDMN=DXSDMN+DXSDN1
  10 CONTINUE
DO 30 N=1,3
  DXSDN2=DXSDN2+(N-1)*(N-2)*D(5,N)*(X4**(N-3))
  30 CONTINUE
DXSDN2=(Y**32)*DXSDN2
DFPR4=DFPR3(X4)+DXSDMN-DXSDN2
RETURN
END
```

### 1.1.9 Function DFPS.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fin/dfps.f)

```
C
C
C COMPUTE 1st DERIVATIVE OF LIGHT WATER SATURATION PRESSURE BY
C TEMPERATURE
C
FUNCTION DFPS(TS)
COMMON
* /Z3/PC,TC,VC
* /Z8/K
C
C REDUCE SATURATION TEMPERATURE
C
C
C TR=TS/TC
C
C CONVERT PRESSURES IN BARS TO PRESSURES IN MPa
```

```

PPC=PC/10.
SUMKN=0.D+0
DSUMKN=0.D+0
DO 10 N=1,5
  SUMKN=SUMKN+K(N)*((1-TR)**N)
  DSUMKN=DSUMKN+N*K(N)*((1-TR)**(N-1))
10 CONTINUE
PRK1=(1/TR)*SUMKN
PRK2=1+K(6)*(1-TR)+K(7)*(1-TR)**2)
PRK3=K(8)*(1-TR)**2)+K(9)
PRK4=PRK1/PRK2-(1-TR)/PRK3
FPS=DEXP(PRK4)*PPC
DPRK1=(-1/TR)*PRK1/PRK2
DPRK2=DPRK1+(-DSUMKN*PRK2+SUMKN*(K(6)+2*K(7)*(1-TR)))/TR/
*(PRK2**2)
DPS=DPRK2+(-PRK3+(1-TR)*(2*K(8)*(1-TR)))/(PRK3**2)
DFPS=FPS*DPS/TC
RETURN
END

```

### 1.1.10 Υπορουτίνα ENERGY.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/energy.f)

```

C SUBROUTINE ENERGY(U,PSI)
C COMPUTE SPECIFIC INTERNAL ENERGY OF LIGHT WATER IN kJ/kg GIVEN
C TEMPERATURE IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
* /Z6/R
* /K2/TT,TR
* /K3/DD
* /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
U=PSI0-TT*PSI0T+R*1000*DD*QTD
PSI=PSIC+R*TT*(DLOG(DD)+DD*Q)
RETURN
END

```

### 1.1.11 Υπορουτίνα ENTHALPY.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/enthalpy.f)

```

C SUBROUTINE ENTHALPY(H)
C COMPUTE ENTHALPY OF LIGHT WATER IN kJ/kg GIVEN TEMPERATURE
C IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
* /Z6/R
* /K2/TT,TR
* /K3/DD
* /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
H=R*TT*(1+DD*Q+DD*(1000/TT)*QTD+DD*DD*QDT)+PSI0-TT*PSI0T

```

```

RETURN
END

```

### 1.1.12 Υπορουτίνα ENTROPY.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/entropy.f)

```

C      SUBROUTINE ENTROPY(S)
C
C      COMPUTE ENTROPY OF LIGHT WATER IN kJ/(kgK) GIVEN TEMPERATURE
C      IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z);
COMMON
*      /Z6/R
*      /K2/TT,TR
*      /K3/DD
*      /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSIO,PSIOT,PSI02T2
S**R*(DLOG(DD)+DD*Q-DD*(1000/TT)*QTD)-PSIOT
RETURN
END

```

### 1.1.13 Κυρίως Πρόγραμμα EXAMPLE.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/example.f)

```

C      PROGRAM EXAMPLE
C
C      MASTER TEST PROGRAM FOR LIGHT WATER PROPERTY PACKAGE
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C      BYTE BEL,CLRS(4)
C      CHARACTER*1 CHAR
C      CHARACTER*3 B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F
C      DOUBLE PRECISION IBMF,IBMG,JTCF,JTCG,KE,KG,IACFG,MUF,MUG
COMMON
*      /PROPERTY1/
1  B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F,UF,PSIF,HF,SF,
2  CPF,CVF,IBMF,JTCF,GAMMAF,AF,MUF,KE,PRANDTLF
*      /PROPERTY2/
1  B2G,B3G,B4G,DB2G,DB3G,DB4G,UG,PSIG,HG,SG,
2  CPG,CVG,IBMG,JTCG,GAMMAG,AG,MUG,KG,PRANDTLG
*      /PROPERTY3/HFG,SIGMAFG,IACFG
DATA CLRS/27,'H',27,'J'/',BEL/07/
PRINT 100,CLRS,BEL
100 FORMAT(1X,5A1,'National Technical University of Athens')
PRINT *,' Department of Mechanical Engineering'
PRINT *,' Nuclear Engineering Section'
PRINT *
PRINT *,' LIGHT W.A.S.P. (R) '
PRINT *,' LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE.'
PRINT *,'(Thermodynamic and Transport Properties '
PRINT *,' of the Light Water Substance;an
PRINT *,' interactive approach)'
PRINT *,' Version 2 - SEPTEMBER 1999'
PRINT *,' Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>'

```

```

PRINT *
PRINT *, ' This version of the code accepts'
PRINT *, ' as input only pressure and temperature. '
PRINT *, ' (range: 0.006-1000 bar,0.01-800 C)'
PRINT *, ' To obtain a saturation state,equal either '
PRINT *, ' pressure or temperature to zero (for the'
PRINT *, 'desired temperature or pressure,respectively).'
PRINT *
PRINT *
10 WRITE (*,200)
200 FORMAT($,'Please enter desired pressure in bars: ')
READ *, P
WRITE (*,300)
300 FORMAT($,'Please enter desired temperature in C: ')
READ *, T
IF (T.NE.0.D+0) T=T+273.15
JS=1
JP=63
CALL LIGHT_WASP(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS)
PRINT *
WRITE (*,400) P
400 FORMAT (1X,'Pressure in bars: ',F8.3)
WRITE (*,500) T-273.15D+0
500 FORMAT (1X,'Temperature in C: ',F8.3)
PRINT *
IF (IS.EQ.0) THEN
WRITE (*,600)
600 FORMAT (1X,'There is no saturation state for ',
+ 'this pressure and temperature')
PRINT *
END IF
IF (IS.EQ.1) THEN
WRITE (*,700)
700 FORMAT ($,'Exact saturation temperature for this ',
+ 'pressure: ')
WRITE (*,800) TS-273.15D+0
800 FORMAT (F7.3)
PRINT *
END IF
IF (IS.EQ.2) PRINT *, 'This is a saturation state, ',
+ 'or almost a saturation state'
WRITE (*,900)
900 FORMAT(1X,40X,'LIQUID VAPOR')
PRINT *
WRITE (*,1000) SVF,SVG
1000 FORMAT (1X,'Specific Volume in m3/kg:',14X,F8.7,10X,F10.6)
WRITE (*,1100) UF,UG
1100 FORMAT (1X,'Internal Energy in kJ/kg:',10X,F6.1,15X,F6.1)
WRITE (*,1200) HF,HG
1200 FORMAT (1X,'Specific Enthalpy in kJ/kg:', 8X,F6.1,15X,F6.1)
WRITE (*,1300) SF,SG
1300 FORMAT (1X,'Specific Entropy in kJ/(kgK):',9X,F6.4,14X,F7.4)
PRINT *, 'Specific Heat at'
WRITE (*,1400) CPF,CPG
1400 FORMAT (1X,'constant pressure in kJ/(kgK):',4X,F10.4,11X,F10.4)
PRINT *, 'Specific Heat at'
WRITE (*,1500) CVF,CVG
1500 FORMAT (1X,'constant volume in kJ/(kgK):',10X,F6.4,15X,F6.4)
WRITE (*,1600) MUF,MUG
1600 FORMAT (1X,'Viscosity in kg/(ms):',18X,F8.7,13X,F8.7)
WRITE (*,1700) KF,KG

```

```

1700 FORMAT (1X,'Thermal Conductivity in W/(mK):',8X,F5.4,16X,F5.4)
      WRITE (*,1800) PRANDTLF,PRANDTLG
1800 FORMAT (1X,'Prandtl number:',22X,F6.3,15X,F6.3)
      WRITE (*,1900) SIGMAFG,SIGMAFG
1900 FORMAT (1X,'Surface tension in N/m: ',15X,F7.6,14X,F7.6)
      PRINT *
      WRITE (*,2000)
2000 FORMAT($,'Do you want another go?(y/n) ')
      READ (*,2100) CHAR
2100 FORMAT(A1)
      IF (CHAR.EQ.'y') GO TO 10
C
C
C
      END MASTER TEST PROGRAM
C
      STOP
      END

```

### 1.1.14 Function FP.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.f)in/fp.f)

```

C
C
C
C
      FUNCTION FP(DD)
C
C      COMPUTE PRESSURE OF LIGHT WATER IN MPa GIVEN TEMPERATURE
C      IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      COMMON
      * /Z6/R
      * /K1/PP,PR
      * /K2/TT,TR
      * /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
      CALL QMUST
C
C      CONVERT PRESSURE IN BARS TO PRESSURE IN MPa
C
      PPP=PP/10.
      FP=DD*R*TT*(1+DD*Q+DD*DD*QDT)-PPP
      RETURN
      END

```

### 1.1.15 Function FPR3.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wap.f)in/fpr3.f)

```

C
C
C
C
C
      FUNCTION FPR3(X3)
C
C      COMPUTE REDUCED PRESSURE OF LIGHT WATER VAPOR IN THERMODYNAMIC
C      SUB-REGIONS 3 AND 5 CORRESPONDING TO REDUCED TEMPERATURE AND
C      INITIAL GUESS OF REDUCED SPECIFIC VOLUME OF LIGHT WATER
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DIMENSION C(64)
      COMMON

```



```

* /Z9/C,C010,C011,C012,C310
* /K1/PP,PR
* /K2/TT,TR
XSC0N=0.D+0
XSC1N=0.D+0
XSC2N=0.D+0
XSC3N=0.D+0
XSC4N=0.D+0
XSC6N=0.D+0
DO 10 N=0,9
  IF (N,GE.2) XSC0N=XSC0N+(1-N)*C(N)/(X3**N)
  IF ((N,GE.2).AND.(N.LE.6))
    XSC1N=XSC1N+(1-N)*C(10+N)/(X3**N)
    IF ((N,GE.2).AND.(N.LE.7))
      XSC2N=XSC2N+(1-N)*C(20+N)/(X3**N)
      IF (N,GE.2) XSC3N=XSC3N+(1-N)*C(30+N)/(X3**N)
      IF (N.LE.4) XSC6N=XSC6N+C(60+N)/(TR**(N+2))
10 CONTINUE
XSC0N=XSC0N+(1-10)*C010/(X3**10)
XSC0N=XSC0N+(1-11)*C011/(X3**11)
XSC0N=XSC0N+C(1)+C012/X3
XSC1N=XSC1N+C(11)+C(17)/X3
XSC2N=XSC2N+C(21)+C(28)/X3
XSC3N=XSC3N+C(31)+C310/X3
XSC4N=5*C(41)*(TR-1)/(X3**6)*(TR**23)
XSC6N=6*(X3**5)*XSC6N
FPR3=-XSC0N-XSC1N*(TR-1)-XSC2N*((TR-1)**2)-XSC3N*((TR-1)**3)
* +XSC4N-XSC6N-PR
RETURN
END

```

### 1.1.16 Function FPR4.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/fpr4.f)

```

C
C FUNCTION FPR4 (X4)
C
C COMPUTE REDUCED PRESSURE OF LIQUID LIGHT WATER IN THERMODYNAMIC
C SUB-REGIONS 4 AND 5 CORRESPONDING TO REDUCED TEMPERATURE AND
C INITIAL GUESS OF REDUCED SPECIFIC VOLUME OF LIGHT WATER
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION D(5,5)
C COMMON
C * /Z4/TRT,TR1,TR2,TR3
C * /Z10/D
C * /K2/TT,TR
C Y=(1-TR)/(1-TR1)
C XSDN1=0.D+0
C XSDN2=0.D+0
C XSDMN=0.D+0
C DO 10 M=3,4
C DO 20 N=1,5
C XSDN1=XSDN1+(N-1)*D(M,N)*(Y**M)/(X4**N)
C CONTINUE
C XSDMN=XSDMN+XSDN1
C CONTINUE

```

```

DO 30 N=1,3
    XSDN2=XSDN2+(N-1)*D(5,N)*(X4**(N-2))
30 CONTINUE
XSDN2=(Y**32)*XSDN2
FPR4=FPR3(X4)+XSDMN-XSDN2
RETURN
END

```

### 1.1.17 Function FPS.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fm/fps.f)

```

C
C
C
C
FUNCTION FPS(TS)
C
C COMPUTE SATURATION VAPOR PRESSURE OF LIGHT WATER IN MPa AS
C FUNCTION OF REDUCED SATURATION TEMPERATURE
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION K(9)
C COMMON
C * /Z3/PC,TC,VC
C * /Z8/K
C * /K1/PP,PR
C
C REDUCE SATURATION TEMPERATURE
TR=TS/TC
C
C CONVERT PRESSURES IN BARS TO PRESSURES IN MPa
PPC=PC/10.
PPP=PP/10.
SUMKN=0.D+0
DO 10 N=1,5
    SUMKN=SUMKN+K(N)*((1-TR)**N)
10 CONTINUE
PRK=(1/TR)*SUMKN
PRK=PRK/(1+K(6)*(1-TR)+K(7)*((1-TR)**2))
PRK=PRK-(1-TR)/(K(8)*(1-TR)**2)+K(9)
FPS=DEXP(PRK)*PPC-PPP
RETURN
END

```

### 1.1.18 Function FTS.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fm/fts.f)

```

C
C
C
C
FUNCTION FTS(PP)
C
C COMPUTE FIRST APPROXIMATION OF LIGHT WATER SATURATION
C TEMPERATURE IN K UNITS AS FUNCTION OF PRESSURE IN BARS
C ACCORDING TO AUTHORS FIT.THIS APPROXIMATION IS TO BE USED
C AS INITIAL GUESS FOR NUMERICAL CALCULATION OF ACTJAC.
C SATURATION TEMPERATURE OF LIGHT WATER
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

```

```

DATA A/219.88851D+0//,B/146.706.87D+0//,C/0.19753D+0/
FTS=A+B*(PP**C)
RETURN
END

```

### 1.1.19 Υπορουτίνα IBM\_JTC.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fin/ibm\_jtc.f)

```

C
C SUBROUTINE IBM_JTC(IBM,JTC)
C
C COMPUTE ISOTHERMAL BULK MODULUS IN 1/MPa AND JOULE-THOMMSON
C COEFFICIENT IN K/MPa
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION IBM,JTC
C COMMON
C   /Z6/R
C   /K2/TT,TR
C   /K3/CD
C   /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY TEMPERATURE
C
C HTD=-TT*PSI02T2+R*(1+DD*Q+DD*DD*QDT-(1000/TT)
C + *(DD*QTD+DD*DD*Q2DT+DD*(1000/TT)*Q2T2D))
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY DENSITY
C
C HDT=TT*R*(Q+(1000/TT)*(QTD+DD*Q2DT)+3*DD*QDT+DD*DD*Q2D2T)
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY TEMPERATURE
C
C PTD=R*(DD+DD*DD*Q+(DD**3)*QDT-(1000/TT))*((DD**3)*
C - Q2DT+DD*DD*QTD))
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY DENSITY
C
C PDT=TT*R*(1+2*DD*Q+4*DD*DD*QDT+(DD**3)*Q2D2T)
C CP=HTD-HDT*PTD/PDT
C JTC=(1/(DD*CP))*((TT/DD)*(PTD/PDT)-1)
C IBM=1./(DD*PDT)
C RETURN
C END

```

### 1.1.20 Υπορουτίνα LIGHT\_WASP.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fin/light\_wasp.f)

```

C
C SUBROUTINE LIGHT_WASP(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS)
C
C LIGHT WATER AND STEAM PROPERTY PACKAGE DEVELOPED BY
C PETROPOULOS N.P. VERSION
C
C COMPUTE THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF LIGHT WATER
C GIVEN PRESSURE IN BARS AND TEMPERATURE IN DEGREES CENTIGRAD.

```

```

C MAINLY ACCORDING TO EQUATION OF STATE DEVELOPED BY KEYES F.G.,
C KEENAN J.H,HILL P.G.AND MOORE J.G.,AND EQUATIONS FOR TRANSPORT
C PROPERTIES DEVELOPED BY MATSUNAGA N. AND NAGASHIMA A.
C PARTS OF CODE STRUCTURE ARE BASED TO SIMILAR PROPERTY PACKAGE
C FOR LIGHT WATER DEVELOPED BY HENDRICKS R.C.,PELLER I.C. AND
C BARON A.K.PARTS OF EQUATION OF STATE FOR LIGHT WATER DEVELOPED
C BY SCHMIDT E. AND GRIGULL U. ARE USED TO PROVIDE GOOD INITIAL
C GUESSES FOR NUMERICAL CALCULATION OF LIGHT WATER DENSITY.
C VALUE OF JS(INPUT) MUST BE 1.RETURNED THERMODYNAMIC AND
C TRANSPORT PROPERTIES ARE SPECIFIED BY JP(INPUT).JR(OUTPUT)
C REPRESENTS THERMODYNAMIC SUB-REGION OF P-T DIAGRAM IN WHICH
C INPUT LIES.IS(OUTPUT) INDICATES RELATIVE POSITION OF INPUT TO
C SATURATION CURVE.COMPUTE SATURATION PROPERTIES IF EITHER PRESSURE
C OR TEMPERATURE IS EQUAL TO ZERO (FOR RESPECTIVE TEMPERATURE OR
C PRESSURE);
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION IBMF,IBMG,JTCF,JTCG,KF,KG,LACFG,MUF,MUG
C CHARACTER*3 B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F
C
C COMMONS LABELLED WITH K REPRESENT MOST IMPORTANT INPUT OR
C OUTPUT
C
C COMMON
C * /Z3/PC,TC,VC
C * /Z11/PSEUDODC,PSEUDOTC,PSEUDOFC
C * /K1/PP,PR
C * /K2/TT,TR
C * /K3/DD
C * /K4/J
C
C COMMONS LABELLED WITH PROPERTY1 REPRESENT MAINLY PROPERTIES OF
C LIQUID LIGHT WATER
C
C * /PROPERTY1/
C
C SUFFIX F STANDS MAINLY FOR FLUID(LIQUID)
C
C 1 B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F,U,PSIF,HF,SF,
C 2 CPF,CVF,IBMF,JTCF,GAMMAF,AF,MUF,KE,PRANDTLF
C
C COMMONS LABELLED WITH PROPERTY2 REPRESENT MAINLY PROPERTIES OF
C LIGHT WATER VAPOR
C
C * /PROPERTY2/
C
C SUFFIX G STANDS MAINLY FOR GAS(VAPOR)
C
C 1 B2G,B3G,B4G,DB2G,DB3G,DB4G,UG,PSIG,HG,SG,
C 2 CPG,CVG,IBMG,JTCG,GAMMAG,AG,MUG,KG,PRANDTLG
C
C COMMONS LABELLED WITH PROPERTY 3 REPRESENT PROPERTIES
C EXISTING ONLY IN SATURATION STATES,SUFFIX FG STANDS FOR
C SATURATION
C
C * /PROPERTY 3/HFG,SIGMAFG,LACFG
C DATA ZERO/0./
C
C CHECK FOR CORRECT CALL OF LIGHT_WASP ROUTINE
C
C IF (JS.NE.1) THEN

```

```

100 WRITE (6,100)
    FORMAT(/,IX,'Fail to set the JS parameter correctly!',/)
    STOP
END IF
IF (JP.GT.63.OR.JP.LT.0) THEN
    WRITE (6,200)
    FORMAT(/,IX,'Fail to set the JP parameter correctly!',/)
    STOP
END IF
GO TO (10),JS
10 PP=P
TT=T
TS=ZERO
C
C CHECK FOR OUT OF RANGE
C
CALL CHECKPT(TS,JR,IS)
P=PP
I=TT
J=JR
C
C INITIALIZE VALUES OF DENSITIES AND SPECIFIC VOLUMES
C
DF=ZERO
DG=ZERO
SVF=ZERO
SVG=ZERO
C
C INITIALIZE VALUES OF OTHER PROPERTIES
C
C
B2F="N/A"
B2G=ZERO
B3F="N/A"
B3G=ZERO
B4F="N/A"
B4G=ZERO
DB2F="N/A"
DB2G=ZERO
DB3F="N/A"
DB3G=ZERO
DB4F="N/A"
DB4G=ZERO
UF=ZERO
UG=ZERO
PSIF=ZERO
PSIG=ZERO
HF=ZERO
HG=ZERO
SF=ZERO
SG=ZERO
CPF=ZERO
CPG=ZERO
CVF=ZERO
CVG=ZERO
TBMF=ZERO
TBMG=ZERO
JTCF=ZERO
JTCG=ZERO
GAMMAF=ZERO
GAMMAG=ZERO
AF=ZERO

```

```

AG=ZERO
MUF=ZERO
MUG=ZERO
KF=ZERO
KG=ZERO
PRANDTLF=ZERO
PRANDTLG=ZERO
HFG=ZERO
SIGMAFG=ZERO
LACFG=ZERO

C
C
C
DENSITY OF LIQUID LIGHT WATER

IF ((J.EQ.1).OR.(J.EQ.6).OR.(J.EQ.4).OR.(J.EQ.5)) THEN
CALL DENSF(DF)
IF (DF.NE.ZERO) THEN

C
C
C
CONVERT DENSITY TO SPECIFIC VOLUME IN m3/Kg

SVF=1/(1000*DF)
DD=DF
END IF

C
C
C
CHECK FOR CRITICAL POINT VICINITY

IF ((ABS(T-TC).LE.10.).AND.(ABS(DD/PSEUDODC-1.).LE.0.3))
+ THEN
WRITE(6,300)
STOP
END IF

C
C
C
OTHER PROPERTIES OF LIQUID LIGHT WATER

IF (JP.NE.0) CALL TOTAL
1 (JP,B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F,UF,PSIF,HF,SF,
2 CPF,CVF,IBMF,JICF,GAMMAF,AF,MUF,KF,PRANDTLF,SIGMAFG)
END IF

C
C
C
DENSITY OF LIGHT WATER VAPOR

IF ((J.EQ.2).OR.(J.EQ.6).OR.(J.EQ.3).OR.(J.EQ.5)) THEN
CALL DENS(DG)
IF (DG.NE.ZERO) THEN

C
C
C
CONVERT DENSITY TO SPECIFIC VOLUME IN m3/kg

SVG=1/(1000*DG)
DD=DG
END IF

C
C
C
CHECK FOR CRITICAL POINT VICINITY

IF ((ABS(T-TC).LE.10.).AND.(ABS(DD/PSEUDODC-1.).LE.0.3))
+ THEN
WRITE(6,300)
STOP
END IF

C
C
C
OTHER PROPERTIES OF LIGHT WATER VAPOR

IF (JP.NE.0) CALL TOTAL

```

```

1 (JP,B2G,B3G,B4G,DB2G,DB3G,DB4G,UG,PSIG,HG,SG,
2 CPG,CVG,IBMG,JTCG,GAMMAG,AG,MUG,KG,PRANDTIG,SIGMAFC)
END IF
IF ((J.EQ.5).OR.(J.EQ.6)) THEN
C
C COMPUTE LATENT HEAT OF LIGHT WATER IN kJ/kg
C
HFG=HG-HF
C
C COMPUTE LAPLACE CONSTANT OF LIGHT WATER IN m
C
C
IF ((DF.NE.ZERO).AND.(DG.NE.ZERO).AND.(ABS(DF-DG).GE.1.D-3))
+ THEN
G=9.80665D-0
LACFG=DSQRT(SIGMAFG/(G*1000*(DF-DG)))
END IF
END IF
300 FORMAT(/,1X,'Calculations near the critical may not be ',
+ 'accurate!',/)
RETURN
END

```

### 1.1.21 Function PRL.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp/prl.f)

```

FUNCTION PRL(TR)
C
C COMPUTE REDUCED PRESSURE OF LIGHT WATER CORRESPONDING TO
C REDUCED TEMPERATURE OF LIGHT WATER CALCULATED FROM GIVEN
C TEMPERATURE IN K UNITS ALONG THE BOUNDARY BETWEEN THERMODYNAMIC
C SUB-REGIONS 2 AND 3
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DOUBLE PRECISION L
COMMON
* /Z4/TRT,TR1,TR2,TR3
* /Z5/PR1,PR2
DATA L/7.160997524D+0/
PRL=((TR2-TR)*PR1+(TR-TR1)*PR2-L*(TR2-TR)*(TR-TR1))/(TR2-TR1)
RETURN
END

```

### 1.1.22 Function PRS.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp/prs.f)

```

FUNCTION PRS(TR)
C
C COMPUTE SATURATION VAPOR PRESSURE OF LIGHT WATER IN MPa AS
C FUNCTION OF REDUCED SATURATION TEMPERATURE
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DOUBLE PRECISION K(9)
COMMON

```

```

* /Z3/PC,TC,VC
* /Z8/K
* /K1/PP,PR
C
C CONVERT PRESSURES IN BARS TO PRESSURES IN MPa
C
PPC=PC/10.
PPP=PP/10.
SUMKN=0.D+0
DO 10 N=1,5
SUMKN=SUMKN+K(N)*((1-TR)**N)
10 CONTINUE
PRK=(1/TR)*SUMKN
PRK=PRK/(1+K(6))*(1-TR)+K(7)*((1-TR)**2)
PRK=PRK-(1-TR)/(K(8))*((1-TR)**2)+K(9)
PRS=DEXP(PRK)*PPC
RETURN
END

```

### 1.1.23 Υπορουτίνα QMUST.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/qmust.f)

```

SUBROUTINE QMUST
C
C MAIN DATA-FITTING SUBROUTINE
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DIMENSION A(10,7),C(5)
C COMMON
C /Z6/R
C /K2/TT,TR
C /K3/DD
C
C COMMON COMMAND LABELLED WITH Qaux REPRESENT MOST IMPORTANT
C QUANTITIES FOR THE DATA-FITTING PROCEDURE.
C
C /Qaux/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
C
C PRIMARY CONSTANTS OF DOUBLE SERIES EXPANSION OF Q
C
C DATA
C
C COEFFICIENTS Aij
C
C * A
1 /29.492937D+0,-132.13917D+0,274.64632D+0,-360.93828D+0,
2 342.18431D+0,-244.50C42D+0,155.18535D+0,5.9728487D+0,
3 -410.30848D+0,-416.05860D+0,-5.1985860D+0,7.7779182D+0,
4 -33.301902D+0,-16.254622D+0,-177.31074D+0,127.48742D+0,
5 137.46153D+0,155.97386D+0,337.31180D+0,-209.88866,
6 6.8335354D+0,-26.149751D+0,65.326396D+0,-26.181978D+C,
7 4*0.0D+0,-137.46618D+0,-733.96848D+0,-0.1564104D+0,
8 -0.72546108D+0,-9.2734289D+0,4.3125840D+C,4*0.0D+C,
9 6.7874983D+0,10.401717D+0,-6.3972405D+0,26.409282D+0,
A -47.740374D+0,56.323130D+0,4*0.0D+0,136.87317D+C,
B 645.81880D+0,-3.9661401D+0,15.453061D+0,-29.142470D+0,
C 29.568796D+0,4*0.0D+0,79.847970D+0,399.17570D+0,
D -0.69048554D+0,2.7407416D+0,-5.1028070D+0,3.9636085D+0,

```



```

E 4*0.0D+0,13.041253D+0,71.531353D+0/
DATA
C
C COEFFICIENTS Ci
C
* C
+ /1855.3865D+0,3278.642D+0,-379.03D+0,46.174D+0,-1021.17/
C
C OTHER CONSTANTS
C
* TAJ1,TAJ2,E,RAJ1,RAJ2
+ /1.544912D+0,2.5D+0,4.8D+0,0.634D+0,1.0D+0/
C
C TEMPERATURE PARAMETER
C
TAU=1000/TT
TAUC=TAJ1
FX=DEXP(-E*DD)
SUMI1=0.D+C
SUMI3=0.D+0
SUMI5=0.D+0
DO 10 I=1,8
    SUMI1=SUMI1+A(I,1)*(DD-RAJ1)**(I-1)
    IF (I.GE.2) SUMI3=SUMI3+(I-1)*A(I,1)*(DD-RAJ1)**(I-2)
    IF (I.GE.3) SUMI5=SUMI5+A(I,1)*(I-1)*(I-2)*(DD-RAJ1)**(I-3)
10 CONTINUE
SUMJ1=0.D+0
SUMJ2=0.D+0
SUMJ3=0.D+0
SUMJ4=0.D+0
SUMJ5=0.D+0
SUMJ6=0.D+0
DO 30 J=1,7
    SUMI2=SUMI2+A(I,J)*(DD-RAJ2)**(I-1)
    IF (I.GE.2) SUMI4=SUMI4+(I-1)*A(I,J)*(DD-RAJ2)**(I-2)
    IF (I.GE.3) SUMI6=SUMI6+A(I,J)*(I-1)*(I-2)*(DD-RAJ2)**(I-3)
20 CONTINUE
SUMI2=SUMI2+EX*(A(9,J)+A(10,J)*DD)
SUMI4=SUMI4+EX*(-E*(A(9,J)+A(10,J)*DD)+A(10,J))
SUMI6=SUMI6+EX*(-E)*(-E*A(9,J)+A(10,J)*(2-E*DD))
IF (J.GE.2) SUMJ1=SUMJ1+((TAU-TAJ2)**(J-2))*SUMI2
IF (J.GE.3) SUMJ2=SUMJ2+(J-2)*((TAU-TAJ2)**(J-3))*SUMI2
IF (J.GE.2) SUMJ3=SUMJ3+((TAU-TAJ2)**(J-2))*SUMI4
IF (J.GE.3) SUMJ4=SUMJ4+(J-2)*((TAU-TAJ2)**(J-3))*SUMI4
IF (J.GE.2) SUMJ5=SUMJ5+((TAU-TAJ2)**(J-2))*SUMI6
IF (J.GE.4) SUMJ6=SUMJ6+(J-2)*((TAU-TAJ2)**(J-4))*SUMI2
30 CONTINUE
SUMI1=SUMI1+EX*(A(9,1)+A(10,1)*DD)
SUMI3=SUMI3+EX*(-E*(A(9,1)+A(10,1)*DD)+A(10,1))
SUMI5=SUMI5+EX*(-E)*(-E*A(9,1)+A(10,1)*(2-E*DD))
C
C DATA-FITTING FUNCTION,Q
C
Q=SUMI1+(TAU-TAJC)*SUMJ1
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY TEMPERATURE
C
C

```

```

C QTD=SUXJ1+(TAU-TAUC)*SUMJ2
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY DENSITY
C
C QDT=SUMI3+(TAU-TAUC)*SUMJ3
C 2nd PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY DENSITY AND TEMPERATURE
C
C Q2DT=SUMJ3+(TAU-TAUC)*SUMJ4
C 2nd PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY DENSITY
C
C Q2D2T=SUMI5+(TAU-TAUC)*SUMJ5
C 2nd PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY TEMPERATURE
C
C Q2T2D=2*SUMJ2+(TAU-TAUC)*SUMJ6
C SUMI7=0.D+0
C SUMI8=0.D+0
C SUMI9=0.D+0
C DO 40 I=1,3
C SUMI7=SJMI7+C(I)*((TT/1000.))**(I-1))
C SUMI8=SJMI8+C(I)*((I-1)*((TT/1000.))**(I-2))
C SUMI9=SJMI9+C(I)*((I-1)*((I-2)*((TT/1000.))**(I-3)))
C 40 CONTINUE
C REFERENCE FUNCTION, PSIO
C
C PSIO=SUMI7+C(4)*DLOG(TT)+C(5)*TT*DLOG(TT)/1000
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF PSIO BY TEMPERATURE
C
C PSIO1=SUMI8/1000+C(4)/TT+C(5)*DLOG(TT)/1000+C(5)/1000
C 2nd PARTIAL DERIVATIVE OF PSIO BY TEMPERATURE
C
C PSIO2T2=SUMI9*(1.D-6)-C(4)/(TT*TT)+C(5)/(1000*TT)
C RETURN
C END

```

### 1.1.24 Υπορουτίνα SHP.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fin/shp.f)

```

C SUBROUTINE SHP(CP)
C COMPUTE SPECIFIC HEAT OF LIGHT WATER AT CONSTANT PRESSURE IN
C kJ/(kgK) GIVEN TEMPERATURE IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C COMMON
C * /Z6/R
C * /K2/TT,TR
C * /K3/D3
C * /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSIO,PSI0T,PSIO2T2
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY TEMPERATURE
C
C HTD=-TT*PSIO2T2+R*(1+DD*Q+DD*DD*QDT-(1000/TT)

```

```

C      + *(DD*QTD+DD*DD*Q2DT+DD*(1000/TT)*Q2T2D))
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY DENSITY
C
C      HDT=TT*R*(Q+(1000/TT)*(QTD+DD*Q2DT)+3*DD*QDT+DD*DD*Q2D2T)
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY TEMPERATURE
C
C      PTD=R*(DD+DD*DD*Q+(DD**3)*QDT-(1000/TT))*((DD**3)*
C      + Q2DT-DD*DD*QTD))
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY DENSITY
C
C      PDT=TT*R*(1+2*DD*Q+4*DD*DD*QDT+(DD**3)*Q2D2T)
C      CP=HTD-HDT*PTD/PDT
C      RETURN
C      END

```

### 1.1.25 Υπορουτίνα SHR\_SOVE.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fin/shr\_sove.f)

```

C      SUBROUTINE SHR_SOVE(GAMMA,A)
C
C      COMPUTE ISENTROPIC EXPANSION COEFFICIENT(SPECIFIC HEAT RATIO)
C      AND SONIC VELOCITY IN m/s OF LIGHT WATER
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C      COMMON
C      /Z6/R
C      /K2/TT,TR
C      /K3/SD
C      /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSICT,PSI02T2
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY TEMPERATURE
C
C      HTD=-TT*PSI02T2+R*(1+DD*Q+DD*DD*QDT-(1000/TT)
C      + *(DD*QTD-DD*DD*Q2DT+DD*(1000/TT)*Q2T2D))
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY DENSITY
C
C      HDT=TT*R*(Q+(1000/TT)*(QTD+DD*Q2DT)+3*DD*QDT+DD*DD*Q2D2T)
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY TEMPERATURE
C
C      PTD=R*(DD+DD*DD*Q+(DD**3)*QDT-(1000/TT))*((DD**3)*
C      + Q2DT+DD*DD*QTD))
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY DENSITY
C
C      PDT=TT*R*(1+2*DD*Q+4*DD*DD*QDT+(DD**3)*Q2D2T)
C
C      COMPUTE CP
C
C      CP=HTD-HDT*PTD/PDT
C
C      COMPUTE CV
C
C      CV=-R*DD*(1.D+6/(TT*TT))*Q2T2D-TT*PSI02T2

```

```

GAMMA=CP/CV
A=(10**(3/2.))* (1./DSQRT(1/FDT-(TT/(CP*(DD**2))))*(P**2)/
+ (PDT**2))
RETURN
END

```

### 1.1.26 Υπορουτίνα SHV.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/shv.f)

```

C
C SUBROUTINE SHV(CV)
C
C COMPUTE SPECIFIC HEAT OF LIGHT WATER AT CONSTANT VOLUME IN
C kJ/(kgK) GIVEN TEMPERATURE IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
* /Z6/R
* /K2/TT,TR
* /K3/DD
* /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
CV=-R*DD*(1.D+6/(TT*TT))*Q2T2D-TT*PSI02T2
RETURN
END

```

### 1.1.27 Υπορουτίνα SOLVE.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/solve.f)

```

C
C SUBROUTINE SOLVE(F,DF,EPS,NDEC,X,ITMAX,IER)
C
C FIND REAL ZERO X OF REAL FUNCTION F GIVEN GOOD INITIAL GUESS
C X AND FUNCTION DF (1st PARTIAL DERIVATIVE OF F BY X).ROOT X
C IS ACCEPTED IF ABSOLUTE VALUE OF F(X).LE.EPS(INPUT).ROOT X
C IS ACCEPTED IF TWO SUCCESSIVE APPROXIMATIONS AGREE TO FIRST
C NDEC(INPUT) DECIMAL DIGITS.X(INPUT) IS AN INITIAL
C VALUE.X(OUTPUT)
C
C CONTAINS COMPUTED ROOT.ITMAX(INPUT) IS MAXIMUM ALLOWABLE NUMBER
C OF NEWTON_RAPHSON ITERATIONS USED ON ROOT.IER(OUTPUT) WARNING
C ERROR PARAMETER=N,N=1 ROOT X WAS BYPASSED BECAUSE DF BECOMES
C TOO SMALL.X IS SET TO 111111.THIS ERROR CONDITION MAY CAUSE AN
C OVERFLOW,N=2 ROOT X WAS BYPASSED BECAUSE ITMAX WAS EXCEEDED.
C X IS SET TO 222222,N=3 SEVERAL OF THE ABOVE ERROR CONDITIONS
C OCCURED.X IS SET TO EITHER 111111. OR 222222. AS ABOVE.DOUBLE
C PRECISION ROUTINE.
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
EXTERNAL F,DF
TOL=10.**(-NDEC)
IER=0
IF (ITMAX.GT.100) ITMAX=100
DO 20 K=1,ITMAX
IF (ABS(DF(X)).LT.EPS) THEN
X=111111.D+0
IER=1
RETURN
END IF

```

```

XK=X-F(X)/DF(X)
IF (K.EQ.41) TOL=TOL*10
  IF (K.EQ.61) TOL=TOL*10
  IF (K.EQ.81) TOL=TOL*10
  IF (ABS(XK-X).LT.TOL) THEN
    X=XK
    RETURN
  ELSE
    X=XK
  IF (ABS(F(X)).LT.EPS) THEN
    RETURN
  END IF
END IF
20 CONTINUE
X=22222.D+0
IF (IER.EQ.0) THEN
  IER=2
ELSE
  IER=3
END IF
RETURN
END

```

### 1.1.28 Υπορουτίνα SVLWL.

(αρχείο /users2/ηpetro/light\_wasp.fin/svlwl.f)

```

SUBROUTINE SVLWL(DL)
C
C COMPUTE DENSITY OF LIQUID LIGHT WATER IN g/cm3 CORRESPONDING
TO
C REDUCED PRESSURE AND TEMPERATURE OF LIGHT WATER CALCULATED FROM
C GIVEN PRESSURE IN BARS AND TEMPERATURE IN K UNITS
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION AM(12),A(22)
C COMMON
C * /Z3/PC,TC,VC
C * /Z6/R
C * /K1/PP,PR
C * /K2/TT,TR
C * /K4/J
EXTERNAL FPR4,DFPR4
C
C NUMERICAL VALUES OF PRIMARY CONSTANTS IN THERMODYNAMIC
C SUB-REGION 1
C
C DATA
C * AM
1 /8.438375405D-1,5.362162162D-4,1.72D+0,7.342278489D-2,
2 4.97585887D-2,6.5371543D-1,1.15D-6,1.5108D-5,1.4188D-1,
3 7.002753165D+0,2.995284926D-4,2.04D-1/,
C * A
1 /10*0.D+0,7.982692717D+0,-2.616571843D-2,1.52241179D-3,
2 2.284279054D-2,2.421647003D+2,1.269716088D-10,2.074838328D-7,
3 2.17402035D-8,1.105710498D-9,1.293441934D+1,1.308119072D-5,
4 6.047626338D-14/
C DATA

```

```

C
C
C
* EPS,NDEC,ITMAX/1.D-5,5,100/
ACT ACCORDING TO THERMODYNAMIC SUB-REGION SPECIFICATION,JR
IF (J.EQ.6).OR.(J.EQ.5)) PR=PRS(TR)
Y=1-(AM(1)*TR*TR)-(AM(2)/(TR**6))
Z=AM(3)*Y+Y-2*AM(4)*TR+2*AM(5)*PR
IF (Z.LE.0.) THEN
  Z=Y
ELSE
  Z=Y+DSQRT(Z)
END IF
END IF
X1=A(11)*AM(5)/(Z**(5./17.))
1 +(A(12)+A(13)*TR+A(14)*TR*TR+A(15)*((AM(6)-TR)**10)
2 +A(16)/(AM(7)+(TR**19)))
3 -(A(17)+2*A(18)*PR+3*A(19)*PR*PR)/(AM(8)-(TR**11))
4 -A(20)*((TR**18)*(AM(9)+TR*TR)
5 *(-3/((AM(10)+PR)**4)+AM(11))
6 +3*A(21)*AM(12)-TR)*PR*PR+4*(A(22)/(TR**20))*((PR**3)
IF (J.EQ.4) THEN
  X4=X1
CALL SOLVE(FPR4,DFPR4,EPS,NDEC,X4,ITMAX,IER)
  X1=X4
END IF
IF (J.EQ.5) THEN
  X4=X1
CALL SOLVE(FPR4,DFPR4,EPS,NDEC,X4,ITMAX,IER)
  X1=X4
END IF
PR=PP/PC
VL=X1*VC
DL=1/VL
RETURN
END

```

### 1.1.29 Υπορουτίνα SVLWV.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fim/svlwv.f)

```

C
C
C
C
C
SUBROUTINE SVLWV(DV)
C
C COMPUTE DENSITY OF LIGHT WATER VAPOR IN g/cm3 CORRESPONDING TO
C REDUCED PRESSURE AND TEMPERATURE OF LIGHT WATER CALCULATED FROM
C GIVEN PRESSURE IN BARS AND TEMPERATURE IN K UNITS
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DIMENSION NM(8),B(9,6),BM(8,2),IM(8)
DOUBLE PRECISION I1
INTEGER ZM(8,3),XM(8,2)
COMMON
* /Z3/PC,TC,VC
* /Z6/R
* /K1/PP,PR
* /K2/TT,TR
* /K4/J
EXTERNAL FPR3,DFPR3
C
C
C
C
C NUMERICAL VALUES OF PRIMARY CONSTANTS

```

```

C
C
C
DATA
THERMODYNAMIC SUB-REGION 2
* B0,B90/7.633333333D-1,1.936587558D+2/,
* B
1 /6.670375918D-2,8.390104328D-2,4.520918904D-1,
2 -5.975336707D-1,5.958051609D-1,1.190610271D-1,1.6839988603D-1,
3 6.552390126D-3,-1.388522425D+3,1.388983801D+0,2.614670893D-2,
4 1.069036614D-1,-8.847535804D-2,-5.159303373D-1,
5 -9.867174132D-2,-5.809438001D-2,5.710218649D-4,
6 4.126607219D+3,0.D+0,-3.373439453D-2,2*0.D+0,2.075021122D-i,
7 3*0.D+0,-6.508211677D+3,8*0.D+0,5.745984054D+3,
8 8*0.D+0,-2.693088365D+3,8*0.D+0,5.235718623D+2/,
* BM(6,1),BM(7,i),BM(8,1),BM(8,2)
+ /4.006073948D-1,8.636081627D-2,-8.532322921D-1,3.460208861D-i/,
C
C
C
NUMBERS OF TERMS n(m) AND i(m), AND EXPONENTS z(m,n) AND x(ir,n)
* NM/2,3,2,2,3,2,2,2/,
* ZM/i,3,18,18,25,32,12,24,24,3,2,10,14,28,1,18,14,
- 0,1,0,0,24,0,0,0/,
* LM/0,0,0,0,0,1,1,2/,
* XM/0,0,0,0,0,14,19,54,0,0,0,0,0,0,0,0,27/
DATA
* EPS,NDEC,ITMAX/1.D-5,5,100/
C
C
C
ACT ACCORDING TO THERMODYNAMIC SUB-REGION SPECIFICATION, JR
IF ((J.EQ.6).OR.(J.EQ.5)) PR=PRS(TR)
I1=10*R*TC/(PC*VC)
X=EXP(B0*(1-TR))
VSM1=0.D+0
VSM2=0.D+0
VSN=C.D+0
DO 20 M=1,8
  VSN1=0.D+C
  VSN2=0.D+0
  VSL=0.D+0
  IF (M.LE.5) THEN
    DO 30 N=1,NM(M)
      VSNJ=VSN1+B(M,N)*(X**ZM(M,N))
    CONTINUE
    VSM1=VSM1+M*(PR**(M-1))*VSN1
  ELSE
    DO 40 N=1,NM(M)
      VSN2=VSN2+B(M,N)*(X**ZM(M,N))
    CONTINUE
    DO 50 L=1,LM(M)
      VSL=VSL+BM(M,L)*(X**XM(M,L))
    CONTINUE
    VSM2=VSM2+(M-2)*(PR**(1-M))*VSN2/(((PR**(2-M))+VSL)**2)
  END IF
20 CONTINUE
VSN=VSN+(11.*(PR/PRL(TR))**10)*B90
DO 60 N=1,6
  VSN=VSN+(11.*(PR/PRL(TR))**10)*B(9,N)*(X**N)
60 CONTINUE
X2=I1*(TR/PR)-VSM1-VSM2+VSN
IF ((J.EQ.3).OR.(J.EQ.5)) THEN
  IF (X3.LE.0.) THEN

```

```

X3=I1*(TR/PR)
ELSE
  X3=X2
END IF
CALL SOLVE (FPR3, DFPR3, EPS, NDEC, X3, ITMAX, IER)
  X2=X3
END IF
PR=PP/PC
VV=VC*X2
DV=1/VV
RETURN
END

```

### 1.1.30 Υπορουτίνα TENSION.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/tension.f)

```

C
C
C
C
C
SUBROUTINE TENSION(SIGMA)
C
C  COMPUTE SURFACE TENSION OF LIGHT WATER IN N/m GIVEN
C  TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING TO EQUATION DEVELOPED BY
C  STRAUB J., ROSNER N. AND GRIGULL U.
C
C  IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C  DOUBLE PRECISION M
C  COMMON
C  * /K2/TT,TR
C  * /K4/J
C  DATA
C  * SIGMA0,M,B/235.8D-3,1.256D+0,-0.625D+0/
C  * TCSTR/647.15D+0/
C  SIGMA=0.
C  IF ((J.NE.6).AND.(J.NE.5)) RETURN
C  AUT=1-TT/TCSTR
C  SIGMA=SIGMA0*(TAUT**M)*(1-B*TAUT)
RETURN
END

```

### 1.1.31 Υπορουτίνα TOTAL.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/total.f)

```

C
C
C
C
C
SUBROUTINE TOTAL
1  (JP,B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4,U,PSI,H,S,
2  CP,CV,IBM,JTC,GAMMA,A,MU,K,PRANDTL,SIGMA)
C
C  MASTER SERVICE SUBPROGRAM DIRECTLY UNDER LIGHT_WASP ROUTINE.
C  IF VALUES OF SATURATION PROPERTIES ARE NEEDED THIS SUBPROGRAM
C  MUST BE CALLED TWICE.
C
C  IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C  DOUBLE PRECISION IBM,JTC,K,MU
C  DIMENSION JPC1(32),JPC2(32),JPC3(32),JPC4(32)
C  COMMON
1  /K2/TT,TR
2  /K4/J
3  /Z12/JPC1,JPC2,JPC3,JPC4

```



```

C
C ACT ACCORDING TO THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES
C SPECIFICATION,JP
C
C IF (MOD(JP,2)) 60,70,60
C
C VIRIAL COEFFICIENTS,1st DERIVATIVES OF VIRIAL COEFFICIENTS BY
C TEMPERATURE AND INTERNAL ENERGY
C
60 IF ((J.EQ.6).OR.(J.EQ.5).OR.(J.EQ.3).OR.(J.EQ.2)).AND.
+ (TT.LE.573.15)) CALL VIRIAL(B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4)
CALL ENERGY(U,PSI)
70 DO 80 I=1,32
IF (JP-JPC1(I)) 100,90,80
80 CONTINUE
GO TO 100
C
C ENTHALPY AND ENTROPY
C
90 CALL ENTHALPY(H)
CALL ENTROPY(S)
100 DO 110 I=1,32
IF (JP-JPC2(I)) 130,120,110
110 CONTINUE
GO TO 130
C
C SPECIFIC HEAT AT CONSTANT PRESSURE,SPECIFIC HEAT AT CONSTANT
C VOLUME,SPECIFIC HEAT RATIO,SONIC VELOCITY,ISOTHERMAL BULK
C MODULUS AND JOULE-THOMSON COEFFICIENT
C
120 CALL SHP(CP)
CALL SHV(CV)
CALL SHR SOVE(GAMMA,A)
CALL IBM_JTC(IBM,JTC)
130 DO 140 I=1,32
IF (JP-JPC3(I)) 160,150,140
140 CONTINUE
GO TO 160
C
C VISCOSITY,THERMAL CONDUCTIVITY AND PRANDTL NUMBER
C
150 CALL VISCOSITY(MU)
CALL CONDUCTIVE(K)
IF (K.NE.0.D+0) PRANDTL=1000.*MU*CP/K
160 DO 170 I=1,32
IF (JP-JPC4(I)) 190,180,170
170 CONTINUE
GO TO 190
C
C SURFACE TENSION
C
180 IF ((J.EQ.5).OR.(J.EQ.6)) CALL TENSION(SIGMA)
190 IF (JP-32) 200,210,210
C
C RESERVED FOR FUTURE USE
C
210 GO TO 200
200 RETURN
END

```

### 1.1.32 Υπορουτίνα VISCOSITY.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/viscosity.f)

```
C
C SUBROUTINE VISCOSITY(MU)
C COMPUTE VISCOSITY OF LIGHT WATER IN kg/(ms) GIVEN TEMPERATURE
C IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C FROM AN EQUATION SUITABLE FOR INDUSTRIAL USE
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION MU,NR,NR0,NR1,NR2,NC
C DIMENSION H(4),HH(6,7)
C COMMON
C * /Z11/PSEJDODC,PSEUDO0TC,PSEUDO0FC
C * /K2/TT,"R
C * /K3/DD
C DATA
C * H
C + /1.00000D+0,0.978197D+0,0.579829D+0,-0.202354D+0/,
C * HH
C 1 /0.5132047D+0,0.3205656D+0,2*0.D+0,-0.7782567D+0,
C 2 0.1885447D+0,0.2151778D+0,0.7317883D+0,1.241044D+0,
C 3 1.476783D+0,2*0.D+0,-0.2818107D+0,-1.070786D-0,-1.263184D-0,
C 4 3*0.D+0,0.1778064D+0,0.4605040D+0,0.2340379D+0,-0.4924179D+0,
C 5 2*0.D+0,-0.04176610D+0,2*0.D+0,0.1600435D+0,3*0.D+0,
C 6 -0.01578386D+0,7*0.D+0,-0.003629481D+0,2*0.D-0/,
C * NC/55.071D-6/
C PSEUDODR=DD/PSEUDODC
C PSEUDOTR=TT/PSEUDOTC
C NR0=0.D+0
C DO 10 I=1,4
C NR0=NR0+H(I)/(PSEUDOTR** (I-1))
C 10 CONTINUE
C NR0=DSQRT (PSEUDOTR) /NR0
C NR1=0.D+0
C DC 20 J=1,6
C DO 30 K=1,7
C NR1=NR1+
C * HH (J, K) * ((1./PSEUDOTR) -1) ** (J-1)) * ((PSEUDODR-1) ** (K-1))
C 30 CONTINUE
C 20 CONTINUE
C NR1=DEXP (PSEJDODR*NR1)
C NR2=1.D+0
C NR=NR0*NR1*NR2
C MU=NR*NC
C RETURN
C END
```

### 1.2 Τα αρχεία κατασκευής εκτελέσιμου προγράμματος.

#### 1.2.1 makefile1.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp.fn/makefile1)

```

ert: example.o light_wasp.o checkpt.o constants.o densf.o densg.o fts.o \
  fps.o dfps.o prs.o prl.o fp.o dfpd.o qmust.o \
  svlwl.o svlww.o fpr4.o fpr3.o dfpr4.o dfpr3.o solve.o \
  total.o energy.o enthalpy.o entropy.o shp.o \
  shv.o shr_solve.o ibm_jtc.o viscosity.o conductive.f \
  tension.o
f77 -g -o ert example.o light_wasp.o checkpt.o constants.o densf.o \
  densg.o fts.o fps.o dfps.o prs.o prl.o fp.o dfpd.o \
  qmust.o svlwl.o svlww.o fpr4.o fpr3.o \
  dfpr4.o dfpr3.o solve.o total.o energy.o \
  enthalpy.o entropy.o shp.o shv.o shr_solve.o ibm_jtc.o \
  viscosity.o conductive.o tension.o

```

## 1.2.2 makefile2.

(αρχείο /users2/npetro/light\_wasp/fin/makefile2)

```

ert: example.o light_wasp.o checkpt.o constants.o densf.o densg.o fts.o \
  fps.o dfps.o prs.o prl.o fp.o dfpd.o qmust.o \
  svlwl.o svlww.o fpr4.o fpr3.o dfpr4.o dfpr3.o solve.o \
  total.o energy.o enthalpy.o entropy.o shp.o \
  shv.o shr_solve.o ibm_jtc.o viscosity.o conductive.f \
  tension.o
f77 -g -o ert example.o light_wasp.o checkpt.o constants.o densf.o \
  densg.o fts.o fps.o dfps.o prs.o prl.o fp.o dfpd.o \
  qmust.o svlwl.o svlww.o fpr4.o fpr3.o \
  dfpr4.o dfpr3.o solve.o total.o energy.o \
  enthalpy.o entropy.o shp.o shv.o shr_solve.o ibm_jtc.o \
  viscosity.o conductive.o tension.o

```

```

example.o: example.f
f77 -g -c example.f

```

```

light_wasp.o:light_wasp.f
f77 -g -c light_wasp.f

```

```

checkpt.o: checkpt.f
f77 -g -c checkpt.f

```

```

constants.o: constants.f
f77 -g -c constants.f

```

```

densf.o: densf.f
f77 -g -c densf.f

```

```

densg.o: densg.f
f77 -g -c densg.f

```

```

fts.o: fts.f
f77 -g -c fts.f

```

```

fps.o: fps.f
f77 -g -c fps.f

```

```

dfps.o: dfps.f
f77 -g -c dfps.f

```

```
prs.o: prs.f
      f77 -g -c prs.f

prl.o: prl.f
      f77 -g -c prl.f

fp.o: fp.f
      f77 -g -c fp.f

dfpd.o: dfpd.f
      f77 -g -c dfpd.f

qmust.o: qmust.f
      f77 -g -c qmust.f

svlwl.o: svlwl.f
      f77 -g -c svlwl.f

svlww.o: svlww.f
      f77 -g -c svlww.f

fpr4.o: fpr4.f
      f77 -g -c fpr4.f

fpr3.o: fpr3.f
      f77 -g -c fpr3.f

dfpr4.o: dfpr4.f
      f77 -g -c dfpr4.f

dfpr3.o: dfpr3.f
      f77 -g -c dfpr3.f

solve.o: solve.f
      f77 -g -c solve.f

total.o: total.f
      f77 -g -c total.f

energy.o: energy.f
      f77 -g -c energy.f

enthalpy.o: enthalpy.f
      f77 -g -c enthalpy.f

entropy.o: entropy.f
      f77 -g -c entropy.f

shp.o: shp.f
      f77 -g -c shp.f

shv.o: shv.f
      f77 -g -c shv.f

shr_ove.o: shr_ove.f
      f77 -g -c shr_ove.f

ibm_jtc.o: ibm_jtc.f
      f77 -g -c ibm_jtc.f

viscosity.o: viscosity.f
```

```
f77 -g -c viscosity.f  
indconduct.o: conductive.f  
f77 -g -c conductive.f  
tension.o: tension.f  
f77 -g -c tension.f
```

### 1.3 ΕΒΔΕΚΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ.

(βλέπε και' αντίστοιχα και τον Πίνακα 4-11 στο 4ο Κεφάλαιο)

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Light Water Substance;an

interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar,0.01-800 C)

To obtain a saturation state,equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure,respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 0.01

Desired temperature out of range!

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-800 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 200

Pressure in bars: 15.549

Temperature in C: 200.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0011565	Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.127262
Internal Energy in kJ/kg:	850.7	Internal Energy in kJ/kg:	2595.3
Specific Enthalpy in kJ/kg:	852.4	Specific Enthalpy in kJ/kg:	2793.2
Specific Entropy in kJ/(kgK):	2.3309	Specific Entropy in kJ/(kgK):	6.4319
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	4.1931	Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	2.7951
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	3.3428	Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	1.9240
Viscosity in kg/(ms):	.0001347	Viscosity in kg/(ms):	.0000157
Thermal Conductivity in W/(mK):	.6645	Thermal Conductivity in W/(mK):	.0391
Prandtl number:	.911	Prandtl number:	1.123
Surface tension in N/m:	.037684	Surface tension in N/m:	.037684

Do you want another go? (y/n) n

LIGHT W.A.S.F. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.  
 (range: 0.006-1000 bar, 0.01-800 C)

To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 230

Pressure in bars: 27.976

Temperature in C: 230.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0012088

Internal Energy in kJ/kg: 986.7

Specific Enthalpy in kJ/kg: 990.1

Specific Entropy in kJ/(kgK): 2.6099

Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK): 4.6733

Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK): 3.2449

Viscosity in kg/(ms): .0001163

Thermal Conductivity in W/(mK): .6403

Prandtl number: 1.849

Surface tension in N/m: .030746

Do you want another go? (Y/N): n



LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Light Water Substance; an

interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-800 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 260

Pressure in bars: 46.943

Temperature in C: 260.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0012755

Internal Energy in kJ/kg: 1128.4

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1134.4

Specific Entropy in kJ/(kgK): 2.8838

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 4.9674

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.2654

Viscosity in kg/(ms): .0001020

Thermal Conductivity in W/(mK): .6069

Prandtl number: .835

Surface tension in N/m: .023699

Do you want another go? (y/n) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-800 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 290

Pressure in bars: 74.461

Temperature in C: 290.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0013655

Internal Energy in kJ/kg: 1278.9

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1289.1

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.1593

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 5.4893

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.1113

Viscosity in kg/(ms): .0000899

Thermal Conductivity in W/(mK): .5632

Prandtl number: .876

Surface tension in N/m: .016675

Do you want another go? (y/n)

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Light Water Substance; an

interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-800 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0  
Please enter desired temperature in C: 320

Pressure in bars: 112.891  
Temperature in C: 320.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0014987	.015445
Internal Energy in kJ/kg:	1444.5	2524.7
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1461.4	2699.1
Specific Entropy in kJ/(kgK):	3.4479	5.5340
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	6.5579	8.0619
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	3.1028	3.1876
Viscosity in kg/(ms):	.0000786	.0000208
Thermal Conductivity in W/(mK):	1.5073	.0865
Prandtl number:	1.016	1.942
Surface tension in N/m:	.009875	.009875

Do you want another go? (y/n)

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Light Water Substance; an  
interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-800 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 350

Pressure in bars: 165.351

Temperature in C: 350.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0017395

Internal Energy in kJ/kg: 1641.6

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1670.4

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.7773

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 10.0692

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.2092

Viscosity in kg/(ms): .0000663

Thermal Conductivity in W/(mK): .4369

Prandtl number:

Surface tension in N/m: .003673

Do you want another go? (Y/N) n

.003673

1.521

.4369

.0000238

3.7201

16.7328

5.2071

2561.6

2416.5

.008771

LIGHT W.A.S.P. (R)  
 LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)  
 Version 2 - SEPTEMBER 1999  
 Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
 as input only pressure and temperature.  
 (range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)  
 To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0  
 Please enter desired temperature in C: 372  
 Calculations near the critical point may not be accurate!  
 Pressure in bars: 215.616  
 Temperature in C: 372.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

VAPOR	LIVID
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg: .004164	.0041636
Internal Energy in kJ/kg: 2154.7	2154.7
Specific Enthalpy in kJ/kg: 2244.5	2244.5
Specific Entropy in kJ/(kgK): 4.6574	4.6574
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK): 345.3826	345.3833
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK): 4.2663	4.2663
Viscosity in kg/(ms): .0000325	.0000325
Thermal Conductivity in W/(mK): .4484	.4484
Prandtl number: 25.061	25.061
Surface tension in N/m: .000166	.000166

Do you want another go? (Y/N) n

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Light Water Substance/an  
interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
as input only pressure and temperature.  
(range: 0.006-1000 bar,0.01-1000 C)  
To obtain a saturation state,equal either  
pressure or temperature to zero (for the  
desired temperature or pressure,respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0.0001  
Please enter desired temperature in C: 20

Desired pressure out of range!

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 10

Please enter desired temperature in C: 360

Pressure in bars: 10.000

Temperature in C: 360.000

Exact saturation temperature for this pressure: 179.884

LQUID VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0000000

Internal Energy in kJ/kg: .0

Specific Enthalpy in kJ/kg: .0

Specific Entropy in kJ/(kgK): .0000

Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK): .0000

Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK): .0000

Viscosity in kg/(ms): .0000000

Thermal Conductivity in W/(mK): .0000

Prandtl number: .000

Surface tension in N/m: .000000

Do you want another go?(y/n) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an

interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 10  
 Please enter desired temperature in C: 500

Pressure in bars: 10.000

Temperature in C: 500.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

VAPOR LIQUID

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .00000000

Internal Energy in kJ/kg: .0

Specific Enthalpy in kJ/kg: 3478.5

Specific Entropy in kJ/(kgK): 7.7622

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): .0000

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): .0000

Viscosity in kg/(ms): .00000000

Thermal Conductivity in W/(mK): .0000

Prandtl number:

Surface tension in N/m: .0000000

.0000000

.918

.0675

.0000286

1.6845

2.1671

7.7622

3478.5

3124.4

.354105



LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.  
 (range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 50  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 50.000  
 Temperature in C: 263.911

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0012857

Internal Energy in kJ/kg: 1147.4

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1153.8

Specific Entropy in kJ/(kgK): 2.9194

Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK): 5.0190

Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK): 3.1567

Viscosity in kg/(ms): .0001003

Thermal Conductivity in W/(mK): .6018

Prandtl number: .837

Surface tension in N/m: .022779

Do you want another go? (y/n) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 70  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 70.000

Temperature in C: 285.790

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0013509	Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.027357
Internal Energy in kJ/kg:	1257.1	Internal Energy in kJ/kg:	2580.2
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1266.5	Specific Enthalpy in kJ/kg:	2771.7
Specific Entropy in kJ/(kgK):	3.1202	Specific Entropy in kJ/(kgK):	5.8126
Specific Heat at		Specific Heat at	
constant pressure in kJ/(kgK):	5.3947	constant pressure in kJ/(kgK):	5.1869
Specific Heat at		Specific Heat at	
constant volume in kJ/(kgK):	3.1168	constant volume in kJ/(kgK):	2.7068
Viscosity in kg/(ms):	.0000919	Viscosity in kg/(ms):	.0000190
Thermal Conductivity in W/(mK):	.5701	Thermal Conductivity in W/(mK):	.0644
Prandtl number:	.866	Prandtl number:	1.526
Surface tension in N/m:	.017653	Surface tension in N/m:	.017653

Do you want another go? (y/n) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Light Water Substance, an  
interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 80  
Please enter desired temperature in C: 550

Pressure in bars: 80.000

Temperature in C: 550.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.00000000	.045155
Internal Energy in kJ/kg:	.0	3159.8
Specific Enthalpy in kJ/kg:	.0	3521.1
Specific Entropy in kJ/(kgK):	.0000	6.8779
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	.0000	2.4329
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	.0000	1.8132
Viscosity in kg/(ms):	.00000000	.0000309
Thermal conductivity in W/(mK):	.0000	.0791
Prandtl number:	.000	.951
Surface tension in N/m:	.0000000	.0000000

Do you want another go?(Y/N) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Light Water Substance; an  
interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 90  
Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 90.000

Temperature in C: 303.306

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0014173

Internal Energy in kJ/kg: 1349.9

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1362.7

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.2847

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 5.8584

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.0998

Viscosity in kg/(ms): .0000849

Thermal Conductivity in W/(mK): .5401

Prandtl number: .921

Surface tension in N/m: .013616

Do you want another go? (Y/N) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 100  
 Please enter desired temperature in C: 100

Pressure in bars: 100.000

Temperature in C: 100.000

Exact saturation temperature for this pressure: 320.961

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0010385

Internal Energy in kJ/kg: 416.1

Specific Enthalpy in kJ/kg: 426.5

Specific Entropy in kJ/(kgK): 1.2992

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 4.1936

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.7587

Viscosity in kg/(ms): .0002852

Thermal Conductivity in W/(mK): .6844

Prandtl number: 1.747

Surface tension in N/m: .000000

Do you want another go? (y/n) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 110  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 110.000

Temperature in C: 318.045

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0014879

.015972

Internal Energy in kJ/kg: 1433.1

2529.2

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1449.4

2704.9

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.4283

5.5516

Specific Heat at

7.8107

constant pressure in kJ/(kgK): 6.4559

7.8107

Specific Heat at

3.1572

constant volume in kJ/(kgK): 3.1011

.0000207

Viscosity in kg/(ms): .0000793

.0000207

Thermal Conductivity in W/(mK): .5213

.0848

Prandtl number:

1.908

Surface tension in N/m: .010306

.010306

Do you want another go? (Y/N) n

LIGHT W.A.S.P. (R)  
 LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)  
 Version 2 - SEPTEMBER 1999  
 Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
 as input only pressure and temperature.  
 (range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)  
 To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 130  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 130.000  
 Temperature in C: 330.827

This is a saturation state, or almost a saturation state

	LIGUID	VAPOR
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0015662	.012764
Internal Energy in kJ/kg:	1510.4	2495.4
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1530.7	2661.3
Specific Entropy in kJ/(kgK):	3.5593	5.4308
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	7.2780	9.8406
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	3.1205	3.3643
Viscosity in kg/(ms):	.0000743	.0000217
Thermal Conductivity in W/(mK):	.4836	.0983
Prandtl number:	1.119	2.171
Surface tension in N/m:	.007538	.007538

Do you want another go? (y/n) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 150  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 150.000

Temperature in C: 342.131

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0016567

Internal Energy in kJ/kg: 1584.7

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1609.6

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.6833

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 8.5238

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.1604

Viscosity in kg/(ms): .0000696

Thermal Conductivity in W/(mK): .4567

Prandtl number: 1.299

Surface tension in N/m: .005207

Do you want another go? (y/n) n



LIGHT W.A.S.P. (R)  
 LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)  
 Version 2 - SEPTEMBER 1999  
 Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
 as input only pressure and temperature.  
 (range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)  
 To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 170  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 170.000  
 Temperature in C: 352.263

This is a saturation state, or almost a saturation state  
 LIQUID

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0017680	Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0017680
Internal Energy in kJ/kg:	1659.1	Internal Energy in kJ/kg:	1659.1
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1689.1	Specific Enthalpy in kJ/kg:	1689.1
Specific Entropy in kJ/(kgK):	3.8060	Specific Entropy in kJ/(kgK):	3.8060
Specific Heat at		Specific Heat at	
constant pressure in kJ/(kgK):	10.7206	constant pressure in kJ/(kgK):	10.7211
Specific Heat at		Specific Heat at	
constant volume in kJ/(kgK):	3.2280	constant volume in kJ/(kgK):	3.2281
Viscosity in kg/(ms):	.0000649	Viscosity in kg/(ms):	.0000649
Thermal Conductivity in W/(mK):	.4312	Thermal Conductivity in W/(mK):	.4312
Prandtl number:	1.613	Prandtl number:	1.613
Surface tension in N/m:	.003253	Surface tension in N/m:	.003253

Do you want another go? (Y/N) n

National Technical University of Athens  
 Department of Mechanical Engineering  
 Nuclear Engineering Section

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 200  
 Please enter desired temperature in C: 200

Pressure in bars: 200.000

Temperature in C: 200.000

Exact saturation temperature for this pressure: 365.702

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0011387

Internal Energy in kJ/kg: 837.7

Specific Enthalpy in kJ/kg: 860.5

Specific Entropy in kJ/(kgK): 2.3031

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 4.3994

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.3196

Viscosity in kg/(ms): .0001393

Thermal Conductivity in W/(mK): .6802

Prandtl number: .901

Surface tension in N/m: .000000

(Do you want another go? (y/n) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 210

Please enter desired temperature in C: 10

Pressure in bars: 210.000

Temperature in C: 10.000

Exact saturation temperature for this pressure: 369.784

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0009906

Internal Energy in kJ/kg: 41.5

Specific Enthalpy in kJ/kg: 62.3

Specific Entropy in kJ/(kgK): .1488

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 4.1286

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 4.1182

Viscosity in kg/(ms): .0012841

Thermal Conductivity in W/(mK): .5948

Prandtl number: 8.913

Surface tension in N/m: .003000

Do you want another go?(y/n) n

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Light Water Substance; an

interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 220

Please enter desired temperature in C: 0

Calculations near the critical point may not be accurate!

Pressure in bars: 220.000

Temperature in C: 373.692

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0025606

Internal Energy in kJ/kg: 1929.2

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1985.5

Specific Entropy in kJ/(kgK): 4.2543

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 209.3282

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.8579

Viscosity in kg/(ms): .0000460

Thermal Conductivity in W/(mK): .5599

Prandtl number:

Surface tension in N/m: .000016

Do you want another go?(y/n) n

.002561  
 1929.2  
 1985.5  
 4.2542  
 208.9457  
 3.8582  
 .0000460  
 .5599  
 17.187  
 .000016

National Technical University of Athens  
 Department of Mechanical Engineering  
 Nuclear Engineering Section

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Light Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 300  
 Please enter desired temperature in C: 300

Pressure in bars: 300.000

Temperature in C: 300.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

VAPOR LIQUID

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0013304

Internal Energy in kJ/kg: 1287.9

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1327.8

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.1741

Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK): 5.0733

Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK): 3.0311

Viscosity in kg/(ms): .0000935

Thermal Conductivity in W/(mK): .5874

Prandtl number: .808

Surface tension in N/m: .000000

Do you want another go? (Y/N) n

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Light Water Substance;  
interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
as input only pressure and temperature.  
(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)  
To obtain a saturation state, equal either  
pressure or temperature to zero (for the  
desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 400  
Please enter desired temperature in C: 400

Pressure in bars: 400.000  
Temperature in C: 400.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.00000000	.001908
Internal Energy in kJ/kg:	.0	1854.6
Specific Enthalpy in kJ/kg:	.0	1930.9
Specific Entropy in kJ/(kgK):	.0000	4.1136
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	.0000	8.6719
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	.0000	2.9406
Viscosity in kg/(ms):	.00000000	.0000614
Thermal Conductivity in W/(mK):	.0000	.3994
Prandtl number:	.000	1.334
Surface tension in N/m:	.0000000	.0000000

Do you want another go? (Y/N) n

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

LIGHT W.A.S.F. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Light Water Substance; an  
Interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.  
(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either  
pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 500  
Please enter desired temperature in C: 500

Pressure in bars: 500.000

Temperature in C: 500.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0000000

.003893

Internal Energy in kJ/kg: .0

2525.6

Specific Enthalpy in kJ/kg: .0

2720.3

Specific Entropy in kJ/(kgK): .0000

5.1728

Specific Heat at

.0000

7.1945

constant pressure in kJ/(kgK): .0000

.0000

Specific Heat at

.0000

2.5853

constant volume in kJ/(kgK): .0000

.0000000

Viscosity in kg/(ms): .0000000

.0000405

Thermal Conductivity in W/(mK): .0000

.0000

Prandtl number:

.000

1.418

Surface tension in N/m: .000000

.000000

.000000

Do you want another go? (y/n) n

National Technical University of Athens  
 Department of Mechanical Engineering  
 Nuclear Engineering Section

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Light Water Substance; an

interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 800  
 Please enter desired temperature in C: 10

Pressure in bars: 800.000

Temperature in C: 10.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

VAPOR LIQUID

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0009663

Internal Energy in kJ/kg: 39.5

Specific Enthalpy in kJ/kg: 116.8

Specific Entropy in kJ/(kgK): .1377

Specific heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 3.9921

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.9498

Viscosity in kg/(ms): .0012554

Thermal Conductivity in W/(mK): .6252

Prandtl number:

Surface tension in N/m: .000000

Do you want another go? (Y/N) n



National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

LIGHT W.A.S.P. (R)

LIGHT WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Light Water Substance; an  
interactive approach)

Version 2 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.  
(range: 0.006-1000 bar, 0.01-1000 C)

To obtain a saturation state, equal either  
pressure or temperature to zero (for the  
desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 1200  
Please enter desired temperature in C: 10

Desired pressure out of range!

#### 1.4 Λεπτομερής παρουσίαση του κώδικα.

Παρουσιάζονται στη συνέχεια όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εξέταση των υλοποιητών LIGHT\_WASP, CHECKPT, QMUST και TOTAL, οι οποίες είναι τα μεγαλύτερα υποπρογράμματα. Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα (υπορουτίνες -subroutines και συναρτήσεις -functions) παρουσιάζονται συνοπτικότερα. Το σύνολο των υποπρογραμμάτων παρουσιάζεται κατά το δυνατόν με τη σειρά που χρησιμοποιούνται στον κώδικα. Οι κυριότερες συνιστώσες της παρουσίασης κάθε υποπρογράμματος είναι:

- α. Μεταβλητές εισόδου
- β. Μεταβλητές εξόδου
- γ. Τοπικές μεταβλητές
- δ. Μορφολογικά χαρακτηριστικά υποπρογράμματος (εξαρτημένο, ανεξάρτητο ή άλλο, προαιρετικό ή απαραίτητο)
- ε. Υποπρογράμματα που καλούν το παρουσιαζόμενο υποπρόγραμμα και
- στ. Υποπρογράμματα που καλεί το παρουσιαζόμενο υποπρόγραμμα

Σημειώνεται ότι δεν είναι σκόπιμη -και ως εκ τούτου δε γίνεται- η εξέταση του υποδείγματος κυρίως προγράμματος εφαρμογής EXAMPLE (FORTRAN main program). Ο χρήστης του κώδικα που θα θελήσει να πειραματισθεί με αυτό μπορεί πολύ εύκολα να το χρησιμοποιήσει, έχοντας βέβαια πάντοτε υπόψη τις οδηγίες που δίνονται στο Κεφάλαιο 4, σχετικά με τη σύνδεση ενός κυρίου προγράμματος με τον κώδικα LIGHT\_WASP. Επιπλέον δεν παρουσιάζεται το blockdata CONSTANTS. Απλά κατά την εξέταση κάθε υποπρογράμματος, αν τύχει να υπάρχει μεταβλητή εισόδου (σταθερή), η οποία να προέρχεται από το εν λόγω blockdata αυτό σημειώνεται με κατάλληλο τρόπο. Υπενθυμίζεται ότι το blockdata CONSTANTS επικοινωνεί με τον υπόλοιπο κώδικα με τη βοήθεια COMMON εντολών.

Επισημαίνεται πάντως ότι για τη σύνδεση ενός κυρίου προγράμματος όπως το EXAMPLE, με τον κώδικα LIGHT\_WASP -όταν ο κώδικας εργάζεται κάτω από λειτουργικό σύστημα UNIX, πρέπει να χρησιμοποιείται ένα αρχείο κατασκευής εκτελέσιμου προγράμματος εφαρμογής, το ονομαζόμενο **makefile**. Το makefile αυτό

αναλαμβάνει σε γενικές γραμμές τη σύνδεση (**linking**) των επιτυχώς μεταφρασμένων υποπρογραμμάτων του κώδικα LIGHT\_WASP (των **object files**) μεταξύ τους καθώς και με τις εσωτερικές συναρτήσεις της γλώσσας FORTRAN ή ακόμα -αν είναι επιθυμητό- με το object file που περιέχει το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη σε ένα εννιαίο εκτελέσιμο πρόγραμμα εφαρμογής (executable application program). Υπόδειγμα τέτοιου makefile περιλαμβάνεται στο αρχείο **makefile1**<sup>1</sup>. Στο υπόδειγμα αυτό το εκτελέσιμο πρόγραμμα φέρει τη συμβολική ονομασία "ert", η οποία φυσικά μπορεί να αλλάξει σύμφωνα με τις κατά καιρούς απαιτήσεις του χρήστη. Δεύτερο υπόδειγμα τέτοιου makefile περιλαμβάνεται στο αρχείο **makefile2**<sup>2</sup>. Η ιδιαιτερότητα διαφορά αυτού του makefile από το προαναφερθέν makefile1 εντοπίζεται στο ότι το makefile2 διεκπεραιώνει πρώτα τη μετάφραση (**compilation**) των **source files**, στα οποία εμπιρεύονται τα υποπρογράμματα του κώδικα σε γλώσσα FORTRAN. Στη συνέχεια προχωράει στο linking των δημιουργούμενων **object files** και συγκροτεί τέλος το ζητούμενο εκτελέσιμο πρόγραμμα με το όνομα "ert". Φυσικά κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα, βασιζόμενος πάντα στα υποδείγματα makefile1-2, να δημιουργήσει εκείνα τα makefiles που τον εξυπηρετούν καλύτερα.

#### 1.4.1 Η υπορουτίνα LIGHT\_WASP.

**Μεταβλητές εισόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

##### στη λίστα παραμέτρων

JS	(πρέπει να έχει πάντα την τιμή 1)
JP	(πρέπει να έχει πάντα ακέραια τιμή από 0 έως 63)
P	(πίεση σε bar μέσα στην περιοχή ισχύος του κώδικα ή 0)
T	(θερμοκρασία σε K μέσα στην περιοχή ισχύος του κώδικα ή 0)

##### στις COMMON εντολές

PC	(κρίσιμη πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K -από το blockdata CONSTANTS)

---

<sup>1</sup> Βλέπε την επόμενη παράγραφο.

VC	(κρίσιμος ειδικός όγκος σε $\text{cm}^3/\text{g}$ -δεν χρησιμοποιείται)
PP	(πίεση σε bar)
TT	(θερμοκρασία σε K)
PSEUDODC	(ψευδοκρίσιμη πυκνότητα σε $\text{g}/\text{cm}^3$ )

στις λίστες παραμέτρων καλούμενων υποπρογραμματίων

DF	(πυκνότητα του υγρού σε $\text{g}/\text{cm}^3$ )
DG	(πυκνότητα του ατμού σε $\text{g}/\text{cm}^3$ )

**Μεταβλητές εξόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στη λίστα παραμέτρων

P	(πίεση σε bar, αν η P εισόδου ήταν 0 και υπάρχει κατάσταση κορεσμού)
T	(θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$ , αν η T εισόδου ήταν 0 και υπάρχει κατάσταση κορεσμού)
TS	(θερμοκρασία κορεσμού σε $^{\circ}\text{C}$ , αν υπάρχει κατάσταση κορεσμού)
SVF	(ειδικός όγκος του υγρού σε $\text{m}^3/\text{kg}$ )
SVG	(ειδικός όγκος του ατμού σε $\text{m}^3/\text{kg}$ )
JR	(υποπεριοχή του διαγράμματος PT, ακέραιες τιμές από 1 έως 6)
IS	(ακέραιες τιμές από 0 έως 2)

στις COMMON εντολές επικοινωνίας

PP	(πίεση σε bar)
PR	(ανηγγμένη πίεση)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγγμένη θερμοκρασία)
J	(=JR, υποπεριοχή του PT)

<sup>2</sup> Βλέπε την επόμενη παράγραφο.

στην COMMON/PROPERTY1/

UF, PSIF, HF, SF, CPF, CVF, IBMF, JTCF, GAMMAF, AF, MUF, KF, PRANDTLF

στην COMMON/PROPERTY2/

UG, PSIG, HG, SG, CPG, CVG, IBMG, JTCC, GAMMAG, AG, MUG, KG,  
PRANDTLG

στην COMMON/PROPERTY3/

HFG, SIGMAFG, LACFG

**Δεν υπάρχουν τοπικές μεταβλητές**

**H LIGHT\_WASP καλείται από:**

Το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη.

**H LIGHT\_WASP καλεί τα υποπρογράμματα του κώδικα:**

CHECKPT, DENSEF, DENSNG, TOTAL

H LIGHT\_WASP χαρακτηρίζεται ως μετρίως εξαρτημένο υποπρόγραμμα.

H LIGHT\_WASP είναι απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.

(βλέπε το αρχείο **light\_wasp.f**)

**1.4.2 Η υπορουτίνα CHECKPT.**

**Μεταβλητές εισόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στις COMMON εντολές "/Zi/" -από το blockdata CONSTANTS

PMIN	(ελάχιστη πίεση σε bar για την οποία ισχύει ο κώδικας)
PMAX	(μέγιστη πίεση σε bar για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
PC	(κρίσιμη πίεση σε bar)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
VC	(κρίσιμος ειδικός όγκος σε cm <sup>3</sup> /g -δεν χρησιμοποιείται)
TRT	(ανηγγένη θερμοκρασία στο κρίσιμο σημείο)

TR1, TR2, TR3, PR1, PR2

(όρια για τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις που καθορίζουν τις υποπεριοχές -από το blockdata CONSTANTS)

στις COMMON εντολές "/Ki/"

PP	(πίεση σε bar)
TT	(θερμοκρασία σε K)

στις λίστες παραμέτρων καλούμενων υποπρογραμμάτων

IER (δείκτης λάθους που συνέβη στην υπορουτίνα SOLVE)

**Μεταβλητές εξόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στη λίστα παραμέτρων

TS	(θερμοκρασία κορεσμού σε K, αν υπάρχει κατάσταση κορεσμού)
JR	(υποπεριοχή του διαγράμματος PT, JR = 1 έως 6)
IS	(δείκτης του πόσο κοντά είναι η είσοδος σε μία κατάσταση κορεσμού IS = 0 υπερκρίσιμη πίεση και θερμοκρασία εισόδου IS = 1 υποκρίσιμη πίεση και θερμοκρασία εισόδου)

IS = 2 η κατάσταση κορεσμού απέχει μόλις 1 K)

στις COMMON εντολές επικοινωνίας

PP (πίεση σε bar)  
PR (ανηγμένη πίεση)  
TT (θερμοκρασία σε K)  
TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

**Τοπικές Μεταβλητές**

EPS, NDEC, ITMAX

(χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

**Η CHECKPT καλείται από:**

Την υπορουτίνα LIGHT\_WASP

**Η CHECKPT καλεί τα υποπρογράμματα του κώδικα:**

FPS, FTS, DFPS, SOLVE και PRL

Η CHECKPT χαρακτηρίζεται ως **μετρίως εξηρημένο υποπρόγραμμα**.

Η CHECKPT είναι **απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα**.

(βλέπε το αρχείο **checkpt.f**)

### ***1.4.3 Η υπορουτίνα QMUST.***

**Μεταβλητές εισόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στις COMMON εντολές

R (σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)  
 TT (θερμοκρασία σε K)  
 DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)

**Μεταβλητές εξόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στις COMMON εντολές επικοινωνίας

Q, QDT, Q2D2T, QTD, Q2T2D, Q2DT, PSI0, PSI0T, PSI02T2

[πρόκειται για ποσότητες που δίνονται από την εξίσωση (3-4) και τις εξισώσεις (4-7) έως και (4-17)]

**Τοπικές Μεταβλητές**

A (πίνακας σταθερών A<sub>ij</sub> για τις εξισώσεις)  
 C (πίνακας σταθερών C<sub>i</sub> για τις εξισώσεις)

TAJ1, TAJ2, E, RAJ1, RAJ2

(άλλες σταθερές των εξισώσεων -βλέπε και Keyes F.G. et al., 1968)

I, J (δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)

SUMIm (n-οστό άθροισμα **SUM** ως προς το δείκτη **I**, m = 1 έως 9)

SUMJn (n-οστό άθροισμα **SUM** ως προς το δείκτη **J**, n = 1 έως 6)

Αναλυτικότερα έχουμε:

$$\mathbf{SUMII} = \sum_{i=1}^8 \mathbf{A}_{ii}(\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \exp(-E\rho) (\mathbf{A}_{9,1} + \mathbf{A}_{10,1}\rho) \quad (\mathbf{I-1})$$



$$\text{SUMI2} = \sum_{i=1}^8 A_{ij}(\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \exp(-E\rho) (A_{9j} + A_{10j}\rho) \quad (\text{I-2})$$

$$\text{SUMI3} = \sum_{i=2}^8 (i-1)A_{ij}(\rho - \rho_{aj})^{i-2} + \exp(-E\rho) [-E(A_{9,1} + A_{10,1}\rho) + A_{10,1}] \quad (\text{I-3})$$

$$\text{SUMI4} = \sum_{i=2}^8 (i-1)A_{ij}(\rho - \rho_{aj})^{i-2} + \exp(-E\rho) [-E(A_{9j} + A_{10j}\rho) + A_{10j}] \quad (\text{I-4})$$

$$\text{SUMI5} = \sum_{i=3}^8 (i-1)(i-2)(\rho - \rho_{aj})^{i-3} + \exp(-E\rho) \left\{ -E [-EA_{9,1} + A_{10,1}(2 - E\rho)] \right\} \quad (\text{I-5})$$

$$\text{SUMI6} = \sum_{i=3}^8 A_{ij}(i-1)(i-2)(\rho - \rho_{aj})^{i-3} + \exp(-E\rho) \left\{ -E [-EA_{9j} + A_{10j}(2 - E\rho)] \right\} \quad (\text{I-6})$$

$$\text{SUMI7} = \sum_{i=1}^3 C_i(T/1000)^{i-1} \quad (\text{I-7})$$

$$\text{SUMI8} = \sum_{i=2}^3 C_i(i-1)(T/1000)^{i-2} \quad (\text{I-8})$$

$$\text{SUMI9} = \sum_{i=2}^3 C_i(i-1)(i-2)(T/1000)^{i-3} \quad (\text{I-9})$$

Ακόμα:

$$\text{SUMJ1} = \sum_{j=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \times \text{SUMI2} \quad (\text{I-10})$$

$$\text{SUMJ2} = \sum_{j=3}^7 (j - 2)(\tau - \tau_{aj})^{j-3} \times \text{SUMI2} \quad (\text{I-11})$$

$$\text{SUMJ3} = \sum_{j=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \times \text{SUMI4} \quad (\text{I-12})$$

$$\text{SUMJ4} = \sum_{j=3}^7 (j - 2)(\tau - \tau_{aj})^{j-3} \times \text{SUMI4} \quad (\text{I-13})$$

$$\text{SUMJ5} = \sum_{j=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \times \text{SUMI6} \quad (\text{I-14})$$

$$\text{SUMJ6} = \sum_{j=3}^7 (j - 2)(j - 3)(\tau - \tau_{aj})^{j-4} * \text{SUMI2} \quad (\text{I-15})$$

**Η QMUST καλείται από:**

Τα υποπρογράμματα function FP και function DFP

**Η QMUST δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα.**

Η QMUST χαρακτηρίζεται ως πλήρως εξηγημένο υποπρόγραμμα.

Η QMUST είναι **απαραίτητο** υποπρόγραμμα του κώδικα.

(βλέπε το αρχείο **qmust.f**)

#### ***1.4.4 Η υπορουτίνα TOTAL.***

Μεταβλητές εισόδου (κατά σειρά εμφανίσεως)

στη λίστα παραμέτρων

JP (διακóπτης που καθορίζει ποιές από τις θερμοφυσικές ιδιότητες θα υπολογισθούν, JP = 1 έως 63)

U, PSI, H, S, CP, CV, IBM, JTC, GAMMA,A, MU, K, PRANDTL, SIGMA  
(στην είσοδο όλες οι παραπάνω μεταβλητές έχουν μηδενική τιμή)

στις COMMON εντολές

J (υποπεριοχή του διαγράμματος PT, J = 1 έως 6)

JPC1, JPC2, JPC3, JPC4

(πίνακες από το blockdata CONSTANTS που περιέχουν σταθερές, οι οποίες διευκολύνουν τους χειρισμούς που πρέπει να γίνουν από την TOTAL για να ικανοποιηθεί το αίτημα του χρήστη που υποβλήθηκε με τον διακόπτη JP)

**Μεταβλητές εξόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στη λίστα παραμέτρων

U, PSI, H, S, CP, CV, IBM, JTC, GAMMA, A, MU, K, PRANDTL, SIGMA

**Τοπικές Μεταβλητές**

I (δείκτης για επαναληπτικές διαδικασίες)

**H TOTAL καλείται από:**

Την υπερωτίνα LIGHT\_WASP

**H TOTAL καλεί τα υποπρογράμματα του κώδικα:**

ENERGY, ENTHALPY, ENTROPY, SHP, SHV, SHR, SOVE, IBM\_JTC,  
VISCOSITY, CONDUCTIVE, TENSION

(Το πόσα από αυτά τα υποπρογράμματα θα κληθούν ή όχι εξαρτάται από την τιμή του δείκτη JP).

Η TOTAL χαρακτηρίζεται ως **μετρίως εξηρημένο υποπρόγραμμα**.

Η TOTAL είναι **προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα**.

(βλέπε το αρχείο **total.f** )

#### ***1.4.5 Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα.***

##### **1.4.5.1 Η function FTS.**

[στο αρχείο **fts.f** -ολοποίηση της εξίσωσης (4-32), (μετρίως εξηρημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

Μεταβλητές εισόδου:

PP (πίεση σε bar)  
A [πίνακας σταθερών της εξίσωσης (4-32)]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η function καλείται από την υπορουτίνα CHECKRPT και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **I.4.5.2 Η function FPS.**

[στο αρχείο fps.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-23), (μετρώς εξηρητημένο, απαραιήτη υποπρόγραμμα του κώδικα)]

##### Μεταβλητές εισόδου:

TS	(θερμοκρασία κορεσμού σε K)
PC	(κρίσιμη πίεση σε bar -από το blockdata CONSTANTS)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K -από το blockdata CONSTANTS)
VC	(κρίσιμος ειδικός όγκος -δεν χρησιμοποιείται)

K

[πίνακος σταθερών για την εξίσωση (3-23) από το blockdata CONSTANTS]

PP (πίεση σε bar)

PR (ανηγμένη πίεση -δεν χρησιμοποιείται)

##### Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: PPC (κρίσιμη πίεση σε MPa), PPP (πίεση σε MPa)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα CHECKPT- και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **I.4.5.3 Η function DFPS.**

[στο αρχείο dfps.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-31), (μετρώς εξηρητημένο, απαραιήτη υποπρόγραμμα του κώδικα)]

##### Μεταβλητές εισόδου:

TS (θερμοκρασία κορεσμού σε K)

PC (κρίσιμη πίεση σε bar -από το blockdata CONSTANTS)  
TC (κρίσιμη θερμοκρασία σε K -από το blockdata CONSTANTS)  
VC (κρίσιμος ειδικός όγκος -δεν χρησιμοποιείται)

K

[σταθερές για την εξίσωση (4-32) από το blockdata CONSTANTS]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΙΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: FPSS [πίεση κορεσμού σε MPa -σχέση (3-23)]

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα CHECKPT- και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **1.4.5.4 Η υπορουτίνα DENSF.**

[στο ερχείο densf.f (μετρίως εξηγημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

Μεταβλητές εισόδου: DL (πυκνότητα του ελαφρού ύδατος σε g/cm<sup>3</sup> από την υπορουτίνα SVLWL), IER (δείκτης λάθους που μπορεί να συμβεί στην υπορουτίνα SOLVE)

Μεταβλητές εξόδου: DF, DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)

Τοπικές μεταβλητές: EPS, NDEC, ITMAX (χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

(η υπορουτίνα καλείται από την LIGHT\_WASP και καλεί τα υποπρογράμματα SVLWL, FP, DFPD και SOLVE)

#### **1.4.5.5 Η υπορουτίνα DENSF.**

[στο αρχείο densg.f (μετρίως εξηρημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: DV (πυκνότητα του ελαφρού ύδατος σε g/cm<sup>3</sup> από την υπορουτίνα SVLWV), IER (δείκτης λάθους που μπορεί να συμβεί στην υπορουτίνα SOLVE)

Μεταβλητές εξόδου: DG, DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)

Τοπικές μεταβλητές: EPS, NDEC, ITMAX (χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

(η υπορουτίνα καλείται από την LIGHT\_WASP και καλεί τα υποπρογράμματα SVLWV, FP, DFPD και SOLVE)

#### **I.4.5.6 Η υπορουτίνα SVLWL.**

[στο αρχείο svlw.f -υλοποίηση των εξισώσεων (4-18) και (4-26), (μετρίως εξηρημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

PC, VC	(κρίσιμη πίεση και κρίσιμος ειδικός όγκος -από το blockdata CONSTANTS)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
R	(σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
PP	(πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)
PR	(αυξημένη πίεση)
TT	(θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)
TR	(αυξημένη θερμοκρασία)
J	(=JR, υποπεριοχή)
IER	(δείκτης λάθους που συνέβη στην υπορουτίνα SOLVE)

Μεταβλητές εξόδου: PR (ανηγμένη πίεση), DL (αρχική προσέγγιση για την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος σε g/cm<sup>3</sup>)

Τοπικές μεταβλητές:

AM [πίνακας σταθερών  $a_i$ ,  $i = 1$  έως 12 -εξίσωση (4-18)]  
A [πίνακας σταθερών  $A_i$ ,  $i = 11$  έως 22 -εξίσωση (4-18)]

EPS, NDEC, ITMAX

(χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

Y [ποσότητα που δίνεται από την εξίσωση (4-20)]  
Z [ποσότητα που δίνεται από την εξίσωση (4-19)]  
X1 [ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 1 και 6 -εξίσωση (4-18)]  
X4 [ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 4 και 5 -εξίσωση 4-26)]  
VL (ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος σε cm<sup>3</sup>/g)

(η υπορουτίνα καλείται από την DENSF και καλεί την function PRS καθώς και την υπορουτίνα SOLVE)

#### 1.4.5.7 Η υπορουτίνα SVLWV.

[στο αρχείο svlww.f -υλοποίηση των εξισώσεων (4-21) και (4-25), (μετρίως εξηρημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

PC, VC (κρίσιμη πίεση και κρίσιμος ειδικός όγκος -από το blockdata CONSTANTS)  
TC (κρίσιμη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)  
R (σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)



PP	(πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)
PR	(ανηγγμένη πίεση)
TT	(θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)
TR	(ανηγγμένη θερμοκρασία)
J	(=JR, υλοπεριογή)
IER	(δείκτης λάθους που συνέβη στην υπορουτίνα SOLVE)

Μεταβλητές εξόδου: PR (ανηγγμένη πίεση), DV (αρχική προσέγγιση για την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος σε g/cm<sup>3</sup>)

Τοπικές μεταβλητές:

B0, B90	[σταθερές για την εξίσωση (4-21)]
B	[πίνακας σταθερών $B_{ij}$ , $i = 1$ έως 9, $j = 1$ έως 6 -εξίσωση (4-21)]
NM	[πίνακας σταθερών $n(\mu)$ ]
ZM	[πίνακας σταθερών $z(\mu, \nu)$ ]
LM	[πίνακας σταθερών $l(\mu)$ ]
XM	[πίνακας σταθερών $x(\mu, \lambda)$ ]

EPS, NDEC, ITMAX

(χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

PI	[παράμετρος της εξίσωσης (4-21)-σχέση (4-22)]
X	[παράμετρος της εξίσωσης (4-21) -σχέση (4-23)]

VSM1, VSM2, VSN, VSN1, VSN2, VSL  
(μερικά αθροίσματα ως προς  $\mu$ ,  $\nu$  και  $\lambda$ )

X2	[ανηγγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος στις υλοπεριοχές 2 και 6 -εξίσωση (4-21)]
X3	[ανηγγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος στις υλοπεριοχές 3 και 5 -εξίσωση (4-25)]
VV	(ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος σε cm <sup>3</sup> /g)

(η υπορουτίνα καλείται από την DENSQ και καλεί τις function FPS και PRL καθώς και την υπορουτίνα SOLVE )

#### **1.4.5.8 Η function PRL.**

[στο αρχείο prl.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-24) (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TR	(ανηγμένη θερμοκρασία)
TRT	(ανηγμένη θερμοκρασία τριπλού σημείου -δεν χρησιμοποιείται)
TR1, TR2	[ανηγμένες θερμοκρασίες από το blockdata CONSTANTS -σταθερές για την εξίσωση (4-24)]
TR3	(μέγιστη ανηγμένη θερμοκρασία για την οποία ισχύει η τυλοποίηση IFC-1967 -δεν χρησιμοποιείται)
PR1, PR2	[ανηγμένες πιέσεις από το blockdata CONSTANTS -σταθερές για την εξίσωση (4-24)]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: L [σταθερή για την εξίσωση (4-24)]

(η function καλείται από τις υπορουτίνες CHECKPT, SVLWL και SVLWV και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **1.4.5.9 Η function FPR3.**

[στο αρχείο fpr3.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-25), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

X3

[κακή προσέγγιση του ανηγμένου ειδικού όγκου του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 3 και 5 με βάση την εξίσωση (4-21). Χρησιμοποιείται για την εύρεση καλύτερης προσέγγισης από την εξίσωση (4-25). Η καλύτερη αυτή προσέγγιση του ανηγμένου ειδικού όγκου είναι απαραίτητη για τη λύση της εξίσωσης (3-7) ως προς την ακριβή τιμή της πυκνότητας για τις υποπεριοχές 3 και 5 αν είναι βεβαίως δεδομένες η πίεση και η θερμοκρασία (βλέπε και τις υπορουτίνες DENSQ, SVLWV και SOLVE)].

C(64) [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (4-25) από το blockdata  
CONSTANTS -δεν χρησιμοποιούνται όλες]

C010, C011, C012, C310

[άλλες σταθερές για την εξίσωση (4-25) από το blockdata CONSTANTS]

PP (πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)

PR (ανηγμένη πίεση)

TT (θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές:

XSC0N, XSC1N, XSC2N, XSC3N, XSC4N, XSC6N

[δηλαδή γενικά μεταβλητές της μορφής XSC<sub>i,n</sub> με  $i = 0, 1, 2, 3, 4$  και  $n$  από 0 έως και 9, οι οποίες συμβολίζουν απαραίτητα μερικά αθροίσματα ( $S \equiv \text{SUM}$ ) της εξίσωσης (4-25) για τον υπολογισμό του ανηγμένου ειδικού όγκου **X**, που σχηματίζονται κυρίως χρησιμοποιώντας τις σταθερές **C(in)**, όπου  $i$  είναι δεκάδες και  $n$  είναι μονάδες]

N (δείκτης για επαναληπτικές διαδικασίες)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα SVLWV- καθώς και από την function FPR4 και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα.)

#### **I.4.5.10 Η function DFPR3.**

[στο αρχείο dfr3.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-29), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

##### Μεταβλητές εισόδου:

X3 (βλέπε σχετικά στην περιγραφή της function FPR3)  
C(64) [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (4-29) από το blockdata  
CONSTANTS -δεν χρησιμοποιούνται όλες]

C010, C011, C012, C310

[άλλες σταθερές για την εξίσωση (4-29) από το blockdata CONSTANTS]

ΤΓ (θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

##### Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

##### Τοπικές μεταβλητές:

DXSC0N, DXSC1N, DXSC2N, DXSC3N, DXSC4N, DXSC6N

[δηλαδή γενικά μεταβλητές της μορφής DXSC<sub>i,n</sub> με  $i = 0, 1, 2, 3, 4$  και  $n$  από 0 έως και 9, οι οποίες συμβολίζουν απαραίτητα μερικά αθροίσματα ( $S \equiv \text{SUM}$ ) της εξίσωσης (4-29) για τον υπολογισμό της παραγώγου ( $D \equiv \text{Derivative}$ ) της σχέσεως (4-25) ως προς τον ανηγμένο ειδικό όγκο  $X$ , που σχηματίζονται κυρίως χρησιμοποιώντας τις σταθερές  $C(\mathbf{in})$ , όπου  $i$  είναι δεκάδες και  $n$  είναι μονάδες]

N (δείκτης για επαναληπτικές διαδικασίες)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα SVLWV- καθώς και από την function DFPR4 και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **I.4.5.11 Η function FPR4.**

[στο αρχείο fpr4.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-26), (μετρίως εξηρημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

##### Μεταβλητές εισόδου:

X4

[κακή προσέγγιση του ανηγμένου ειδικού όγκου του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 4 και 5 με βάση την εξίσωση (4-18). Χρησιμοποιείται για την εύρεση καλύτερης προσέγγισης από την εξίσωση (4-26). Η καλύτερη αυτή προσέγγιση του ανηγμένου ειδικού όγκου είναι απαραίτητη για τη λύση της εξίσωσης (3-7) ως προς την ακριβή τιμή της πυκνότητας για τις υποπεριοχές 4 και 5 αν είναι βεβαίως δεδομένες η πίεση και η θερμοκρασία (βλέπε και τις υπορουτίνες DENSE, SVLWL και SOLVE)].

TRT (ανηγμένη θερμοκρασία τριπλού σημείου -δεν χρησιμοποιείται)  
TRI [ανηγμένη θερμοκρασία από το blockdata CONSTANTS -σταθερή για την εξίσωση (4-26)]  
TR2, TR3 (άλλες ανηγμένες θερμοκρασίες -δεν χρησιμοποιούνται)  
D(5,4) [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (4-26) από το blockdata CONSTANTS -δεν χρησιμοποιούνται όλες]

D30, D40, D50

[άλλες σταθερές για την εξίσωση (4-26) από το blockdata CONSTANTS]

TT (θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

## Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

### Τοπικές μεταβλητές:

Y [σχέση (4-27)]

XSDN1, XSDN2

[μερικά αθροίσματα απαραίτητα για τον προσδιορισμό του ανηγμένου ειδικού όγκου στις υποπεριοχές 4 και 5 με βάση την εξίσωση (4-26)]

XSDMN

[μεταβλητή της μορφής XSDm,n με m = 3 ή 4 και n από 1 έως και 4. Είναι και αυτή απαραίτητο μερικό άθροισμα της εξίσωσης (4-27) για τον υπολογισμό του ανηγμένου ειδικού όγκου, το οποίο σχηματίζεται κυρίως χρησιμοποιώντας τις σταθερές D(m,n)]

M, N (δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα SVLWL και καλεί την function FPR3)

### **1.4.5.12 H function DFPR4.**

[στο αρχείο dfpr4.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-30), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

### Μεταβλητές εισόδου:

X4 (βλέπε σχετικά στην περιγραφή της function FPR4)

TRT (ανηγμένη θερμοκρασία τριπλού σημείου -δεν χρησιμοποιείται)

TR1 [ανηγμένη θερμοκρασία από το blockdata CONSTANTS -σταθερή για την εξίσωση (4-27)]

TR2, TR3 (άλλες ανηγμένες θερμοκρασίες -δεν χρησιμοποιούνται)

D(5,4) [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (4-30) από το blockdata

CONSTANTS -δεν χρησιμοποιούνται όλες]

D30, D40, D50

[άλλες σταθερές για την εξίσωση (4-30) από το blockdata CONSTANTS]

TT (θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές:

Y [σχέση (4-29)]

DXSDN1, DXSDN2

[μερικά αθροίσματα απαραίτητα για τον προσδιορισμό της παραγώγου της εξίσωσης (4-28) ως προς τον ανηγμένο ειδικό όγκο στις υποπεριοχές 4 και 5]

DXSDMN

[μεταβλητή της μορφής DXSD<sub>m,n</sub> με  $m = 3$  ή 4 και  $n$  από 1 έως και 4. Είναι και αυτή απαραίτητο μερικό άθροισμα για τον υπολογισμό της παραγώγου της εξίσωσης (4-28) ως προς τον ανηγμένο ειδικό όγκο, το οποίο σχηματίζεται κυρίως χρησιμοποιώντας τις σταθερές  $D(m,n)$ ]

M, N (δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα SVLWL, και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **I.4.5.13 H function FP.**

[στο αρχείο `fr.f` -υλοποίηση της εξίσωσης (3-7), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

DD	(πυκνότητα σε $g/cm^3$ )
R	(σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το <code>blockdata CONSTANTS</code> )
PP	(πίεση σε bar)
PR	(αηγημένη πίεση -δεν χρησιμοποιείται)
T	(θερμοκρασία σε K)
TR	(αηγημένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: PPP (πίεση σε MPa)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στις υπορουτίνες DENSF και DENG- και καλεί την υπορουτίνα QMUST)

**I.4.5.14 H function DFPD.**

[στο αρχείο `dfrd.f` -υλοποίηση της εξίσωσης (4-1), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

DD	(πυκνότητα σε $g/cm^3$ )
R	(σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το <code>blockdata CONSTANTS</code> )



T	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4--8)
Q2D2T	-υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/ [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-10) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στις υπορουτίνες DENSF και DENSF- και καλεί την υπορουτίνα QMUST)

#### **I.4.5.15 Η υπορουτίνα SOLVE.**

[στο αρχείο solve.f -υλοποίηση της αριθμητικής μεθόδου Newton - Raphson (ανεξάρτητο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

F	[συνάρτηση $F \equiv f(x) = 0$ , πεπλαγμένη ως προς x, για την οποία ζητείται ρίζα(-ες) x]
DF	[παράγωγος $df(x)/dx$ ]
EPS	[κριτήριο σύγκλισης, μία ρίζα x γίνεται αποδεκτή αν είναι $ f(x)  \leq EPS$ ]
NDEC	(κριτήριο σύγκλισης, μία ρίζα x γίνεται αποδεκτή αν δύο διαδοχικές προσεγγίσεις της συμφωνούν στα NDEC πρώτα δεκαδικά τους ψηφία)
X	(αρχική προσέγγιση της ζητούμενης ρίζας)
ITMAX	(μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων)

(Σημείωση: Στις περισσότερες από τις περιπτώσεις υπολογισμών που έγιναν με τον κώδικα LIGHT\_WASP η ζητούμενη ρίζα  $x$  βρέθηκε σε λιγότερες από 40 επαναλήψεις. Εξαιρείται συνήθως η γειτονιά του κρίσιμου σημείου και ορισμένες περιοχές στην υψηλή φάση. Όπως όμως και να έχει το πράγμα η υπορουτίνα SOLVE περιορίζει εσωτερικά τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό επαναλήψεων στις 100. Αν δηλαδή ο χρήστης έχει ζητήσει κατά την κλήση της υπορουτίνας να είναι ITMAX > 100, το αίτημά του αυτό αγνοείται. Συνήθεις τιμές για τις μεταβλητές εισόδου EPS, NDEC και ITMAX είναι οι  $10^{-5}$ , 5 και 100 αντίστοιχα.)

Μεταβλητές εξόδου:

X (ζητούμενη ρίζα  $x$ )  
IER (προειδοποιητική παράμετρος λάθους)

(Σημείωση: Αν επιτευχθεί η εύρεση της ζητούμενης ρίζας  $x$  τότε επιστρέφεται IER = 0. Αν η ζητούμενη ρίζα  $x$  δεν είναι δυνατόν να βρεθεί επειδή η παράγωγος DF παίρνει κάποια στιγμιαία τιμή που είναι "πολύ κοντά" στο 0, τότε επιστρέφεται IER = 1 και X = 111111. Αν η ζητούμενη ρίζα  $x$  δεν είναι δυνατόν να βρεθεί επειδή χρειάζεται για αυτό περισσότερες από ITMAX επαναλήψεις, τότε επιστρέφεται IER = 2 και X = 222222. Αν η ζητούμενη ρίζα  $x$  δεν είναι δυνατόν να βρεθεί επειδή συμβαίνουν και τα δύο αυτά ανωγή γεγονότα, τότε επιστρέφεται IER = 3 και X = 111111 ή X = 222222.)

Τοπικές μεταβλητές:

K (δείκτης για την επαναληπτική διαδικασία)  
TOL (κριτήριο σύγκλισης)

(Σημείωση: Σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν  $|x_k - x_{k-1}| \leq TOL$ . Η τιμή της TOL είναι  $10^{-NDEC}$  για τις επαναλήψεις από 1 έως 40,  $10^{-(NDEC-1)}$  για τις επαναλήψεις από 41 έως 60,  $10^{-(NDEC-2)}$  για τις επαναλήψεις από 61 έως 80 και  $10^{-(NDEC-3)}$  για τις επαναλήψεις από 81 έως 100. Στις λίγες περιπτώσεις όπου οι επαναλήψεις ξεπερνούν τις 40 - γειτονιά του κρίσιμου σημείου κτλ- η ζητούμενη ρίζα  $x$  που τελικά υπολογίζεται με την

*αυξημένη ανοχή TOL είναι η καλύτερη που μπορεί να ληφθεί από τις κάθε φορά συναρτήσεις προς επίλυση.)*

Η υπορουτίνα SOLVE καλείται από τις υπορουτίνες CHECKPT, DENSF, DENSF, SVLWL, SVLWV και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα. Αναλυτικότερα:

- καλείται από την υπορουτίνα CHECKPT με σκοπό την επίλυση της εξισώσεως κορεσμού [function FPS -σχέση (3-23)] ως προς τη θερμοκρασία κορεσμού αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού. Η προσέγγιση της λύσης δίνεται από την function FTS -σχέση (4-32)- ενώ η παράγωγος της συνάρτησης FPS υπολογίζεται στην function DFPS -σχέση (4-31).
- καλείται από την υπορουτίνα DENSF με σκοπό την επίλυση της εξισώσεως (3-2), function FP, ως προς την πυκνότητα για τις υποπεριοχές 1, 4, 5 και 6, αν τα δεδομένα είναι η πίεση και η θερμοκρασία. Η προσέγγιση της λύσης δίνεται από την υπορουτίνα SVLWL -σχέσεις (4-18) και (4-26)- ενώ η παράγωγος της συνάρτησης FP ως προς την πυκνότητα υπολογίζεται στην function DFPD -σχέση (4-1).
- καλείται από την υπορουτίνα DENSF με σκοπό την επίλυση της εξισώσεως (3-2), function FP, ως προς την πυκνότητα για τις υποπεριοχές 1, 3, 5 και 6, αν τα δεδομένα είναι η πίεση και η θερμοκρασία. Η προσέγγιση της λύσης δίνεται από την υπορουτίνα SVLWV -σχέσεις (4-21) και (4-25)- ενώ η παράγωγος της συνάρτησης FP ως προς την πυκνότητα υπολογίζεται στην function DFPD -σχέση (4-1).
- καλείται από την υπορουτίνα SVLWL με σκοπό την επίλυση της εξισώσεως (4-26), function FPR4, ως προς την προσέγγιση της λύσης για την πυκνότητα στις υποπεριοχές 4 και 5, αν τα δεδομένα είναι η πίεση και η θερμοκρασία. Και εδώ χρειάζεται μία προσέγγιση για την προσέγγιση της λύσης, η οποία δίνεται από την εξίσωση (4-18) -αν αυτή υποτεθεί ότι ισχύει και για τις υποπεριοχές 4 και 5 (κανονικά ισχύει μόνο για τις υποπεριοχές 1 και 6). Η παράγωγος της συνάρτησης FPR4 ως προς την πυκνότητα υπολογίζεται στην function DFPR4 -σχέση (4-30).
- τέλος καλείται από την υπορουτίνα SVLWV με σκοπό την επίλυση της εξισώσεως (4-25), function FPR3, ως προς την προσέγγιση της λύσης για την πυκνότητα στις υποπεριοχές 3 και 5, αν τα δεδομένα είναι πίεση και η

θερμοκρασία. Και εδώ χρειάζεται μία προσέγγιση για την προσέγγιση της λύσης, η οποία δίνεται είτε από την εξίσωση (4-21) -αν αυτή υποτεθεί ότι ισχύει και για τις υποπεριοχές 3 και 5 (κανονικά ισχύει μόνο για τις υποπεριοχές 2 και 6), είτε από την καταστατική εξίσωση τελείου αερίου. Η παράγωγος της συνάρτησης FPR3 ως προς την πυκνότητα υπολογίζεται στην function DFPR3 -σχέση (4-29).

#### 1.4.5.16 Η υπορουτίνα ENERGY.

[στο αρχείο energy.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-1) και (3-9) (μετρώς εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

##### Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
DD	(πυκνότητα σε g/cm <sup>3</sup> )
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI0	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-5) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI0T	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-12) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: U (ειδική εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg), PSI (ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg)

##### Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### I.4.5.17 Η υπορουτίνα ENTHALPY.

[στο αρχείο enthalpy.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-13), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

##### Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
DD	(πυκνότητα σε g/cm <sup>3</sup> )
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI0	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-5) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI0T	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-12) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: H (ειδική ενθαλπία σε kJ/kg)

##### Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### I.4.5.18 Η υπορουτίνα ENTROPY.

[στο αρχείο entropy.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-11), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
DD	(πυκνότητα σε g/cm <sup>3</sup> )
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI0T	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-12) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: S [ειδική εντροπία σε kJ/(kgK)]

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

**I.4.5.19 Η υπορουτίνα SHP.**

[στο αρχείο shp.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-15), χρησιμοποιούνται επιπλέον και οι εξισώσεις (4-1) έως και (4-5), (μετρίως εξηρημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2D2T	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-10) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2T2D	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-11) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2DT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-9) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI02T2	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-17) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: CP [ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση σε kJ/(kgK)]

Τοπικές μεταβλητές:

HTD	{παράγωγος $(\partial h/\partial T)_p$ -σχέση (4-4)}
HDT	{παράγωγος $(\partial h/\partial p)_T$ -σχέση (4-5)}
PTD	{παράγωγος $(\partial P/\partial T)_p$ -σχέση (4-3)}
PDT	{παράγωγος $(\partial P/\partial p)_T$ -σχέση (4-1)}

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### 1.4.5.20 Η υπορουτίνα SHV.

[στο αρχείο shv.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-17), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
TT	(θερμοκρασία σε K)

TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
DD	(πυκνότητα σε g/cm <sup>3</sup> )
Q2T2D	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-11) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI02T2	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-17) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: CV [ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σε kJ/(kgK)]

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### 1.4.5.21 Η υπορουτίνα SHR\_SOVE.

[στο αρχείο shr\_sove.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-18) και (3-22), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2D2T	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-10) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2T2D	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-11) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]



Q2DT [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-9)  
 -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

PSI02T2 [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-17)  
 -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: GAMMA (λόγος των ειδικών θερμοχωρητικοτήτων -εκθέτης  
 ισηντροπικής μεταβολής), A (ταχύτητα του ήχου σε m/sec)

Τοπικές μεταβλητές:

HTD [παράγωγος  $(\partial h/\partial T)_p$  -σχέση (4-4)]

HDT [παράγωγος  $(\partial h/\partial p)_T$  -σχέση (4-5)]

PTD [παράγωγος  $(\partial P/\partial T)_p$  -σχέση (4-3)]

PDT [παράγωγος  $(\partial P/\partial p)_T$  -σχέση (4-1)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### 1.4.5.22 Η υπορουτίνα IBM\_JTC.

[στο αρχείο ibm\_jtc.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-20) και (3-21), (μετρίως  
 εξηρημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

R (σταθερή του ελαφρού ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)

TT (θερμοκρασία σε K)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)

Q [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4)  
 -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

QDT [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8)  
 -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Q2D2T [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-10)  
 -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2T2D	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-11) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2DT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-9) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI02T2	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-17) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: IBM (ισοθερμοκρασιακή συμπίεσιότητα σε MPa<sup>-1</sup>), JTC (συντελεστής Joule - Thomson σε K/MPa)

Τοπικές μεταβλητές:

HTD	[παράγωγος $(\partial h/\partial T)_p$ -σχέση (4-4)]
HDT	[παράγωγος $(\partial h/\partial p)_T$ -σχέση (4-5)]
PTD	[παράγωγος $(\partial P/\partial T)_p$ -σχέση (4-3)]
PDT	[παράγωγος $(\partial P/\partial p)_T$ -σχέση (4-1)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα.)

#### **I.4.5.23 Η υπορουτίνα VISCOSITY.**

[στο αρχείο viscosity.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-32), (μερίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: PSEUDODC (ψευδοκρίσιμη πυκνότητα -από το blockdata CONSTANTS), PSEUDOTC (ψευδοκρίσιμη θερμοκρασία -από το blockdata CONSTANTS, TT (θερμοκρασία σε K), TR (ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται), DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>), XTR (από την υπορουτίνα QMUST)

Μεταβλητές εξόδου: MU [δυναμική συνεκτικότητα σε kg/(ms)]

Τοπικές μεταβλητές:

H	(πίνακας με τις σταθερές $H_i$ , $i = 1$ έως 4)
HH	(πίνακας με τις σταθερές $H_{j,k}$ , $j = 1$ έως 6, $k = 1$ έως 7)
NC	[δυναμική συνεκτικότητα στο κρίσιμο σημείο $\text{kg}/(\text{ms})$ ]
PSEUDODR	(ψευδοανηγμένη πυκνότητα)
PSEUDOTR	(ψευδοανηγμένη θερμοκρασία)
NR0	[υλοποίηση σχέσης (3-33)]
NR1	[υλοποίηση σχέσης (3-34)]
I,J,K	(δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)
NR2	[παράγων της εξίσωσης (3-32)]
XTR	$\equiv \rho_r (\partial \rho_r / \partial P_r)_{T_r}$ (από την υπορουτίνα QMUST)
NR	(ανηγμένη δυναμική συνεκτικότητα)
N	(=MU η δυναμική συνεκτικότητα)

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### 1.4.5.24 Η υπορουτίνα CONDUCTIVE.

[στο αρχείο `conductive.f` -υλοποίηση της εξίσωσης (3-35), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: PSEUDODC (ψευδοκρίσιμη πυκνότητα), PSEUDOTC (ψευδοκρίσιμη θερμοκρασία -από το `blockdata CONSTANTS`, TT (θερμοκρασία σε K), TR (ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται), DD (πυκνότητα σε  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) PRTRDR και XTR (από την υπορουτίνα QMUST)

Μεταβλητές εξόδου: K [θερμική αγωγιμότητα σε  $\text{W}/(\text{mK})$ ]

Τοπικές μεταβλητές:

H	(πίνακας με τις σταθερές $H_i$ , $i = 1$ έως 4)
HH	(πίνακας με τις σταθερές $H_{j,k}$ , $j = 1$ έως 6, $k = 1$ έως 7)

L	(πίνακας με τις σταθερές $L_i$ , $i = 1$ έως 4)
LL	(πίνακας με τις σταθερές $L_{j,k}$ , $j = 1$ έως 6, $k = 1$ έως 7)
ELC	[θερμική αγωγιμότητα στο κρίσιμο σημείο kg/(ms)]
PSEUDODR	(ψευδοανηγμένη πυκνότητα)
PSEUDOTR	(ψευδοανηγμένη θερμοκρασία)
NR0	[υλοποίηση σχέσης (3-33)]
NR1	[υλοποίηση σχέσης (3-34)]
ELR0	[υλοποίηση σχέσης (3-36)]
ELR1	[υλοποίηση σχέσης (3-37)]
ELR2	[υλοποίηση σχέσης (3-38)]
A, B	[άλλες σταθερές για την εξίσωση (3-35)]
I,J,K	(δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)
PRTRDR	$\equiv (\partial P_r / \partial T_r)_{pr}$
XTR	$\equiv \rho_r (\partial \rho_r / \partial P_r)_{T_r}$
EL	(=K, η θερμική αγωγιμότητα)

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### 1.4.5.25 Η υπορουτίνα TENSION.

[στο αρχείο tension.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-39), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: TT (θερμοκρασία σε K), TR (ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται), J (=JR, υποπεριοχή)

Μεταβλητές εξόδου: SIGMA (επιφανειακή τάση σε N/m)

Τοπικές μεταβλητές:

SIGMA0	[σταθερή για την εξίσωση (3-39)]
M	(ομοίως)
B	(ομοίως)

TCSTR (κρίσιμη θερμοκρασία του ελαφρού ύδατος σύμφωνα με τους Staub J. et al., 1980)

TAUT (ειδική μορφή της ανηγμένης θερμοκρασίας)

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

### ΤΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ HEAVY\_WASP

#### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΙΙ.1	Τα κείμενα των υποπρογραμμάτων.....	1
ΙΙ.1.1	Υπορουτίνα CHECKPT.....	1
ΙΙ.1.2	Υπορουτίνα CONDUCTIVE.....	3
ΙΙ.1.3	Blockdata CONSTANTS.....	4
ΙΙ.1.4	Υπορουτίνα DENSF.....	6
ΙΙ.1.5	Υπορουτίνα DENSG.....	6
ΙΙ.1.6	Function DFPD.....	7
ΙΙ.1.7	Function DFPR3.....	7
ΙΙ.1.8	Function DFPR4.....	8
ΙΙ.1.9	Function DFPS.....	8
ΙΙ.1.10	Υπορουτίνα ENERGY.....	9
ΙΙ.1.11	Υπορουτίνα ENTHALPY.....	9
ΙΙ.1.12	Υπορουτίνα ENTROPY.....	9
ΙΙ.1.13	Κυρίως Πρόγραμμα EXAMPLE.....	10
ΙΙ.1.14	Function FP.....	12
ΙΙ.1.15	Function FPR3.....	12
ΙΙ.1.16	Function FPR4.....	13
ΙΙ.1.17	Function FPS.....	13
ΙΙ.1.18	Function FTS.....	14
ΙΙ.1.19	Υπορουτίνα IBM_JTC.....	14
ΙΙ.1.20	Υπορουτίνα HEAVY_WASP.....	15
ΙΙ.1.21	Function PRL.....	18
ΙΙ.1.22	Function PRS.....	19
ΙΙ.1.23	Υπορουτίνα QMUST.....	19
ΙΙ.1.24	Υπορουτίνα SHP.....	22
ΙΙ.1.25	Υπορουτίνα SHR_SOVE.....	22

II.1.26	Υπορουτίνα SHV	23
II.1.27	Υπορουτίνα SOLVE	23
II.1.28	Υπορουτίνα SVLWL	24
II.1.29	Υπορουτίνα SVLWV	25
II.1.30	Υπορουτίνα TENSION	27
II.1.31	Υπορουτίνα TOTAL	27
II.1.32	Υπορουτίνα VISCOSITY	29
II.2	Τα αρχεία κατασκευής εκτελέσιμου προγράμματος	30
II.2.1	makefile1	30
II.2.2	makefile2	30
II.3	Ενδεικτικά αποτελέσματα του κώδικα	33
II.4	Λεπτομερής παρουσίαση του κώδικα	60
II.4.1	Η υπορουτίνα HEAVY_WASP	61
II.4.2	Η υπορουτίνα CHECKPT	63
II.4.3	Η υπορουτίνα QMUST	65
II.4.4	Η υπορουτίνα TOTAL	68
II.4.5	Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα	70
II.4.5.1	H function FTS	70
II.4.5.2	H function FPS	70
II.4.5.3	H function DFPS	71
II.4.5.4	Η υπορουτίνα DENSF	72
II.4.5.5	Η υπορουτίνα DENSJ	72
II.4.5.6	Η υπορουτίνα SVLWL	73
II.4.5.7	Η υπορουτίνα SVLWV	74
II.4.5.8	H function PRL	75
II.4.5.9	H function FPR3	76
II.4.5.10	H function DFPR3	77
II.4.5.11	H function FPR4	78
II.4.5.12	H function DFPR4	80
II.4.5.13	H function FP	81
II.4.5.14	H function DFPD	82
II.4.5.15	Η υπορουτίνα SOLVE	83
II.4.5.16	Η υπορουτίνα ENERGY	85
II.4.5.17	Η υπορουτίνα ENTHALPY	86
II.4.5.18	Η υπορουτίνα ENTROPY	87



Π.4.5.19 Η υπορουτίνα SHP.....	88
Π.4.5.20 Η υπορουτίνα SHV.....	89
Π.4.5.21 Η υπορουτίνα SHR_SOVE.....	89
Π.4.5.22 Η υπορουτίνα IBM_JTC.....	91
Π.4.5.23 Η υπορουτίνα VISCOSITY.....	92
Π.4.5.24 Η υπορουτίνα CONDUCTIVE.....	92
Π.4.5.25 Η υπορουτίνα TENSION.....	93



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

### ΤΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ HEAVY\_WASP

#### II.1 Τα κείμενα των υποπρογραμμάτων.

Τα υποπρογράμματα παρατίθενται κατά την αλφαβητική σειρά της ονομασίας τους. Συμπεριλαμβάνεται το κυρίως πρόγραμμα EXAMPLE. Αναφέρονται τα αρχεία του Υπολογιστικού Συστήματος HP-UX filippos 7.05 B 9000/375 στα οποία βρίσκονται τα υποπρογράμματα σε ηλεκτρονική μορφή.

##### II.1.1 Υπορουτίνα CHECKPT.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp/checkpt.f)

```
C
C      SUBROUTINE CHECKPT(TS, JR, IS)
C
C      CHECK PRESSURE AND TEMPERATURE FOR OUT OF RANGE
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C
C      COMMON
C      * /Z1/PMIN, PMAX
C      * /Z2/TMIN, TMAX
C      * /Z3/PC, TC, VC
C      * /Z4/TRT, TR1, TR2, TR3
C      * /Z5/PR1, PR2
C      * /K1/PP, PR
C      * /K2/TT, TR
C      EXTERNAL FPS, DFPS
C      DATA ZERO/0./
C      DATA EPS, NDEC, ITMAX/1.D-5, 5, 100/
C
C      CHECK PRESSURE FOR OUT OF RANGE
C
C      IF (((PP.LT.PMIN).OR.(PP.GT.PMAX)).AND.(PP.NE.ZERO)) THEN
C          PRINT *
C          PRINT *, 'Desired pressure out of range!'
C          PRINT *
C          STOP
C      END IF
C
C      CHECK TEMPERATURE FOR OUT OF RANGE
C
C      IF (((TT.LT.TMIN).OR.(TT.GT.TMAX)).AND.(TT.NE.ZERO)) THEN
C          PRINT *
C          PRINT *, 'Desired temperature out of range!'
C          PRINT *
C          STOP
C      END IF
```

```

C IF PRESSURE AND TEMPERATURE ARE EQUAL TO 0 CHECK FOR CORRECT CALL
C OF SATURATION PROPERTIES
C
C IF ((PP.EQ.ZERO).AND.(TT.EQ.ZERO)) THEN
C   PRINT *
C   PRINT *, 'Both pressure and temperature cannot be 0.!'
C   PRINT *
C   STOP
C END IF
C
C IF PRESSURE OR TEMPERATURE IS EQUAL TO 0 CHECK FOR OUT OF
C SATURATION RANGE
C
C IF (( (PP.GT.PC).AND.(TT.EQ.ZERO)).OR.
+   ((TT.GT.TC).AND.(PP.EQ.ZERO)) ) THEN
C   PRINT *
C   PRINT *, 'Such a saturation state does not exist!'
C   PRINT *
C   STOP
C END IF
C IS=0
C TS=ZERO
C IF (TT.EQ.ZERO) TT=TT+273.15D+0
C IF (PP.EQ.ZERO) THEN
C   PP=FPS(TT)*10
C   TS=TT
C   IS=1
C ELSE
C   IF ((PP.LE.PC).AND.(TT.LE.TC)) THEN
C     TS=FTS(PP)
C     IF (ABS(FPS(TS)).GT.EPS)
+     CALL SOLVE(FPS,DFPS,EPS,NDEC,TS,ITMAX,IER)
C     IS=1
C     IF (TT.EQ.273.15D+0) TT=TS
C   END IF
C END IF
C IF (ABS(TT-TS).LE.1.D+0) IS=2
C REDUCED PRESSURE AND TEMPERATURE
C PR=PP/PC
C TR=TT/TC
C DETERMINE THERMODYNAMIC SUB-REGION SPECIFICATION, JR
C JR=0
C IF ((TR.GE.TRT).AND.(TR.LE.TR1)) THEN
C   IF (ABS(TT-TS).LE.1.D-5) THEN
C     JR=6
C   ELSE
C     IF ((PR.GE.ZERO).AND.(PR.LT.PRS(TR))) JR=2
C     IF ((PR.GT.PRS(TR)).AND.(PR.LE.PR2)) JR=1
C   END IF
C END IF
C IF ((TR.GT.TR1).AND.((TR-1).LT.1.D-5)) THEN
C   IF (ABS(TT-TS).LE.1.D-5) THEN
C     JR=5
C   ELSE
C     IF ((PR.GE.ZERO).AND.(PR.LE.PRL(TR))) JR=2
C     IF ((PR.GT.PRL(TR)).AND.(PR.LT.PRS(TR))) JR=3

```

```

      IF ((PR.GT.PRS(TR)).AND.(PR.LT.PR2)) JR=4
      END IF
    END IF
  IF ((TR-1).GE.1.D-5).AND.(TR.LT.TR2)) THEN
    IF ((PR.GE.ZERO).AND.(PR.LE.PRL(TR))) JR=-2
    IF ((PR.GT.PRL(TR)).AND.(PR.LE.PR2)) JR=3
  END IF
  IF ((TR.GE.TR2).AND.(TR.LE.TR3)) JR=2
  IF (JR.EQ.0) THEN
    PRINT *, 'JR indicator value is zero!'
    STOP
  END IF
  RETURN
END

```

### II.1.2 Υπορουτίνα CONDUCTIVE.

(αρχείο /users2/ηpetro/heavy\_wasp.fin/conductive.f)

```

C
C SUBROUTINE CONDUCTIVE(K)
C COMPUTE THERMAL CONDUCTIVITY OF HEAVY WATER IN W/(mK) GIVEN
C TEMPERATURE IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C COMPUTATION AT VICINITY OF CRITICAL POINT IS NOT ACCURATE WITH
C THIS FIT
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DOUBLE PRECISION K,LAMDA
      DIMENSION A(5),B(4)
      COMMON
      * /Z11/PSEUDODC
      * /K2/TT,TR
      * /K3/DD
      DATA
      * A0,A
      +/1.0C000D+0,37.3223D+0,22.5485D+0,13.0465D+0,C.D+0,-2.60735D+0/
      * B,BE,B0
      1 /483.65600D+0,-191.039D+0,73.0358D+0,-7.57467D+0,-2.506D+0,
      2 -167.31D+0/
      * CT1,CT2,CR1,CR2,CR3,PSEUDODR1
      1 /0.144847D+0,-5.64493D+0,-2.80000D+0,-0.0807385;3D+0,
      2 -17.9430D+0,0.125698D+0/
      * C1,C2,D1,LAMDA
      + /0.354296D+5,0.5D+10,-741.112D+0,0.742128D-3/
      PSEUDODR=DD/PSEUDODC
      ELC=A0
      DO 10 I=1,5
        EL0=EL0+A(I)*(TR**I)
      CONTINUE
      DELTAEL=0.D+0
      DO 20 J=1,4
        DELTAEL=DELTAEL+B(J)*(PSEUDODR**J)
      CONTINUE
      DELTAEL=DELTAEL+B0*(1-EXP(BE*PSEUDODR))
      F1=EXP(CT1*TR+CT2*(TR**2))
      F2=EXP(CR1*((PSEUDODR-1)**2))+CR2*EXP(CR3*(PSEUDODR
      -PSEUDODR1)**2))
      TAUR=TR/(ABS(TR-1.1)+1.1)

```

```

F3=1+EXP(60*(TAUR-1)+20)
F4=1+EXP(100*(TAUR-1)+15)
DELTAELC=1+(F2**2)*(C2*(F1**4)/F3+3.5*F2/F4)
DELTAELC=C1*F1*F2*DELTAELC
DELTAELL=D1*(F1**1.2)*(1-EXP(-(PSEUDODR/2.5)**10)))
EL=LAMDA*(ELC+DELTAEL+DELTAELC+DELTAELL)
K=EL
RETURN
END

```

### II.1.3 Blockdata CONSTANTS.

(apxsisio /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/constants.f)

```

BLOCKDATA CONSTANTS
C
C BLOCKDATA SUBPROGRAM CONTAINING ALL CONSTANTS OF HEAVY_WASP
C BEING USED AT LEAST TWICE.ALL OTHER ONCE USED CONSTANTS ARE
C PART OF CORRESPONDING DATA COMMANDS IN INDIVIDUAL SUBPROGRAMS.
C COMMUNICATE WITH REST OF PACKAGE USING ONLY Z LABELLED COMMON
C COMMANDS
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION K(9)
C DIMENSION C(64),D(5,5),JPC1(32),JPC2(32),JPC3(32),JPC4(32)
C
C COMMONS LABELLED WITH Z REPRESENT ALL CONSTANTS OF HEAVY_WASP
C BEING USED AT LEAST TWICE
C
C COMMON
C * /Z1/PMIN,PMAX
C * /Z2/TMIN,TMAX
C * /Z3/PC,TC,VC
C * /Z4/TR1,TR1,TR2,TR3
C * /Z5/PR1,PR2
C * /Z6/R
C * /Z7/A1,A2,A4,A11,A20
C * /Z8/K
C * /Z9/C,C010,C011,C012,C310
C * /Z10/D
C * /Z11/PSEUDODC
C * /Z12/JPC1,JPC2,JPC3,JPC4
C DATA
C
C PRESSURE AND TEMPERATURE RANGE OF EQUATIONS FOR THERMODYNAMIC
C AND TRANSPORT PROPERTIES OF HEAVY WATER
C
C * PMIN,PMAX/0.006601D+0,1000.D+0/,
C * TMIN,TMAX/276.95D+0,775.D+0/,
C
C CRITICAL PRESSURE,TEMPERATURE AND SPECIFIC VOLUME OF HEAVY
C WATER
C
C * PC,TC,VC/216.6D+0,643.89D+0,2.793D+0/,
C
C REDUCED TEMPERATURE RANGES OF THERMODYNAMIC SUB-REGIONS
C
C * TR1,TR2,TR3
C + /4.30120051D-1,9.626911787D-1,1.333462073D+0,1.657886606D+0/,

```

```

C
C MAXIMUM REDUCED PRESSURE
C
C * PR1,PR2/7.454108957D-1,4.616805171D+0/,
C
C HEAVY WATER CONSTANT
C
C * R/0.415147D+0/,
C
C
C CONSTANTS OF HEAVY WATER SATURATION LINE
C
C * A1,A2,A4,A11,A20
C + /-7.81583D+0,17.6012D+0,-18.1747D+0,-3.92488D+0,4.19174D+0/
C
C NUMERICAL VALUES OF PRIMARY CONSTANTS OF EQUATION OF STATE
C OF LIGHT WATER BEING USED IN THIS PACKAGE:
C
C DATA
C
C SATURATION LINE
C
C * K
C 1 /-7.691234564D+0,-2.608023696D+1,-
1.681706546D+2,6.423285504D+1,
C 2 -1.189646225D+2,4.167117320D+0,2.097506760D+1,1.D+9,6.D+0/,
C
C THERMODYNAMIC SUB-REGIONS 3 AND 4
C
C * C
C 1 /-1.72260420D-2,-7.77175039D+0,4.20460752D+0,-
2.76807038D+0,
C 2 2.10419707D+0,-1.14649588D+0,2.23138085D-1,1.16250363D-1,
C 3 -8.20900544D-2,0.D+0,7.08636085D-1,1.23679455D+1,-
1.20389004D+1,
C 4 5.40437422D+0,-9.93865043D-1,6.27523182D-2,-7.74743016D+0,
C 5 3*0.D+0,-4.29885092D+0,4.31430538D+1,-1.41619313D+1,
C 6 4.04172459D+0,1.55546326D+0,-1.66568935D+0,3.24881158D-1,
C 7 2.93655325D+1,2*0.D+0,7.94841842D-6,8.0885947D+1,-
8.36153380D+1,
C 8 3.58636517D+1,7.51895954D+0,-1.26160640D+1,1.09717462D+0,
C 9 2.12145492D+0,-5.46529566D-1,2.75971776D-6,-5.09073985D-4,
C A 8*0.D+0,2.10636332D+2,9*0.D+0,5.528935335D-2,-2.336365955D-1,
C B 3.697071420D-1,-2.596415470D-1,6.828087013D-2/,
C * C010,C011,C012,C310
C + /1.94129239D-2,-1.69470576D-3,-4.311577033D+C,8.32875413D+0/,
C
C THERMODYNAMIC SUB-REGION 4
C
C * D
C 1 /2*0.D+0,-1.717616747D+0,1.301023613D+0,3.4266663535D-4,
C 1 /5*0.D+C,
C 2 2*0.D+0,3.526389875D+0,-2.642777743D-0,-1.236521258D-3,
C 3 2*0.D+0,-2.690899373D+0,1.996765362D+0,1.155018309D-
3,2*0.D+0,
C 4 9.070982605D-1,-6.661557013D-1,3*0.D+0,-1.138791156D-1,
C 5 8.270860589D-2,0.D+0/
C DATA
C
C PSEUDOCRITICAL DENSITY OF HEAVY WATER TO BE USED IN THE
C CALCULATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND VISCOSITY
C

```

```

* PSEUDODC/0.358D+C/
DATA
* JPC1
1 /2,3,6,7,10,11,14,15,18,19,22,23,26,27,30,31,34,
2 35,38,39,42,43,46,47,50,51,54,55,58,59,62,63/,
* JPC2
1 /4,5,6,7,12,13,14,15,20,21,22,23,28,29,30,31,36,
2 37,38,39,44,45,46,47,52,53,54,55,60,61,62,63/,
* JPC3
1 /8,9,10,11,12,13,14,15,24,25,26,27,28,29,30,31,40,
2 41,42,43,44,45,46,55,56,57,58,59,60,61,62,63/,
* JPC4
1 /16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,
2 48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63/
END

```

#### II.1.4 Υπορουτίνα DENSF.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/densf.f)

```

C
C SUBROUTINE DENSF(DF)
C
C COMPUTE DENSITY OF LIQUID HEAVY WATER IN g/cm3 GIVEN PRESSURE,
C IN BARS AND TEMPERATURE IN K UNITS.IF PRESSURE OR TEMPERATURE
C IS EQUAL TO 0 SATURATED LIQUID DENSITY IS RETURNED
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON/K3/DD
EXTERNAL FP,DFFD
DATA EPS,NDEC,ITMAX/1.D-5,5,100/
DF=0.
CALL SVLWL(DL)
DD=DL
CALL SOLVE(FP,DFFD,EPS,NDEC,DD,ITMAX,IER)
DF=DD
RETURN
END

```

#### II.1.5 Υπορουτίνα DENSF.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/densf.f)

```

C
C SUBROUTINE DENSF(DG)
C
C COMPUTE DENSITY OF HEAVY WATER VAPOR IN g/cm3 GIVEN PRESSURE
C IN BARS AND TEMPERATURE IN K UNITS.IF PRESSURE OR TEMPERATURE
C IS EQUAL TO 0 SATURATED VAPOR DENSITY IS RETURNED
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON/K3/DD
EXTERNAL FP,DFFD
DATA EPS,NDEC,ITMAX/1.D-5,5,100/
DG=0.
CALL SVLWV(DV)
DD=DV
CALL SOLVE(FP,DFFD,EPS,NDEC,DD,ITMAX,IER)
DG=DD
RETURN
END

```



### II.1.6 Function DFPD.

(apxyeio /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/dfpd.f)

```
FUNCTION DFPD(DD)
C
C   COMPUTE 1st PARTIAL DERIVATIVE OF HEAVY WATER PRESSURE BY
C   DENSITY
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
*   /Z6/R
*   /K2/TT,TR
*   /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSIO,PSIOT,PSIO2T2
CALL QMUST
DFPD=R*TT*(1+2*DD*Q+4*DD*DQ+QDT+DD*DD*DD*DD*Q2D2T)
RETURN
END
```

### II.1.7 Function DFPR3.

(apxyeio /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/dfpr3)

```
FUNCTION DFPR3(X3)
C
C   COMPUTE 1st PARTIAL DERIVATIVE OF REDUCED PRESSURE OF LIGHT
C   WATER VAPOR BY REDUCED SPECIFIC VOLUME IN THERMODYNAMIC
C   SUB-REGIONS 3 AND 5
C
C   IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DIMENSION C(64)
COMMON
*   /Z9/C,C010,C011,C012,C310
*   /K2/TT,TR
DXSC0N=0.D+0
DXSC1N=0.D+0
DXSC2N=0.D+0
DXSC3N=0.D+0
DXSC4N=0.D+0
DXSC6N=0.D+0
DO 10 N=0,9
IF (N.GE.2) DXSC0N=DXSC0N+(N**2-N)*C(N)/(X3**(N+1))
IF ((N.GE.2).AND.(N.LE.6))
+   DXSC1N=DXSC1N+(N**2-N)*C(10+N)/(X3**(N+1))
+   DXSC2N=DXSC2N+(N**2-N)*C(20+N)/(X3**(N+1))
IF (N.GE.2) DXSC3N=DXSC3N+(N**2-
N)*C(30+N)/(X3**(N+1))
IF (N.LE.4) DXSC6N=DXSC6N+C(60+N)/(TR**(N+2))
10 CONTINUE
DXSC0N=DXSC0N+(100-10)*C010/(X3**11)
DXSC0N=DXSC0N+(121-11)*C011/(X3**12)
DXSC0N=DXSC0N-C012/(X3**2)
DXSC1N=DXSC1N-C(17)/(X3**2)
DXSC2N=DXSC2N-C(28)/(X3**2)
DXSC3N=DXSC3N-C310/(X3**2)
DXSC4N=-30*C(41)*(TR-1)/((X3**7)*(TR**23))
DXSC6N=30*(X3**4)*DXSC6N
```

```

DFPR3=-DXSC0N-DXSC1N*(TR-1)-DXSC2N*((TR-1)**2)
+ -DXSC3N*((TR-1)**3)+DXSC4N-DXSC6N
RETURN
END

```

### II.1.8 Function DFPR4.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp\_fin/dfpr4.f)

```

C
C FUNCTION DFPR4 (X4)
C COMPUTE 1st PARTIAL DERIVATIVE OF REDUCED PRESSURE OF LIQUID
C LIGHT WATER BY REDUCED SPECIFIC VOLUME IN THERMODYNAMIC
C SUB-REGIONS 4 AND 5
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION D(5,5)
C COMMON
C /Z4/TRT,TR1,TR2,TR3
C /Z10/D
C /K2/TT,TR
C Y=(1-TR)/(1-TR1)
C DXSDN1=0.D+0
C DXSDN2=0.D+0
C DXSDMN=0.D+0
C DO 10 M=3,4
C DO 20 N=1,5
C DXSDN1=DXSDN1-N*(N-1)*D(M,N)*(Y**M)/(X4**(N+1))
C CONTINUE
C DXSDMN=DXSDMN+DXSDN1
C 10 CONTINUE
C DO 30 N=1,3
C DXSDN2=DXSDN2+(N-1)*(N-2)*D(5,N)*(X4**(N-3))
C CONTINUE
C DXSDN2=(Y**32)*DXSDN2
C DFPR4=DFPR3(X4)+DXSDMN-DXSDN2
C RETURN
C END

```

### II.1.9 Function DFPS.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp\_fin/dfps.f)

```

C
C FUNCTION DFPS (TS)
C COMPUTE 1st DERIVATIVE OF HEAVY WATER SATURATION PRESSURE BY
C TEMPERATURE
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C COMMON
C /Z3/PC,TC,VC
C /Z7/A1,A2,A4,A11,A20
C TAUS=1-(TS/TC)

```

```

FPSS=A1*TAUS+A2*(TAUS**1.9D+0)+A4*TAUS*TAUS+A11*(TAUS**5.5D+0)*
+ A20*(TAUS**10)
DFPS=(PC/10)*EXP((TC/TS)*FPSS)*((-TC/(TS*TS))*FPSS+
1 (-1/TS)*(A1+A2*1.9D+0*(TAUS**0.9D+0)+A4*2*TAUS-A11*5.5D+0*
2 (TAUS**4.5D+0)+A20*10*(TAUS**9)))
RETURN
END

```

### II.1.10 Υπορουτίνα ENERGY.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fn/energy.f)

```

C
C SUBROUTINE ENERGY(U,PSI)
C
C COMPUTE SPECIFIC INTERNAL ENERGY OF HEAVY WATER IN kJ/kg GIVEN
C TEMPERATURE IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
* /Z6/R
* /K2/TT,TR
* /K3/DD
* /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSIC2T2
U=PSI0-TT*PSI0T+R*1000*DD*QTD
PSI=PSI0+R*TT*(DLOG(DD)+DD*Q)
RETURN
END

```

### II.1.11 Υπορουτίνα ENTHALPY.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fn/enthalpy.f)

```

C
C SUBROUTINE ENTHALPY(H)
C
C COMPUTE ENTHALPY OF HEAVY WATER IN kJ/kg GIVEN TEMPERATURE.
C IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
* /Z6/R
* /K2/TT,TR
* /K3/DD
* /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
H=R*TT*(1+DD*Q+DD*(1000/TT)*QTD+DD*DD*QDT)+PSI0-TT*PSI0T
RETURN
END

```

### II.1.12 Υπορουτίνα ENTROPY.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fn/entropy.f)

```

C
C SUBROUTINE ENTROPY(S)
C
C COMPUTE ENTROPY OF HEAVY WATER IN kJ/(kgK) GIVEN TEMPERATURE
C IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C

```

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
* /Z6/R
* /K2/T, TR
* /K3/DD
* /QAUX/Q, QDT, Q2D2T, QTD, Q2T2D, Q2DT, PSI0, PSI0T, PSI02T2
S=-R*(DLOG(DD)+DD*Q-DD*(1000/TT)*QTD)-PSI0T
RETURN
END

```

### II.1.13 Κυρίως Πρόγραμμα EXAMPLE.

(αρχείο /users2/ηpetro/heavy\_wasp.fin/example.f)

```

C
C
C
PROGRAM EXAMPLE
MASTER TEST PROGRAM FOR HEAVY WATER PROPERTY PACKAGE
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
BYTE BEL,CLRS(4)
CHARACTER*1 CHAR
DOUBLE PRECISION IBMF, IBMG, JTCF, JTCG, KE, KG, LACFG, MUF, MUG
COMMON
* /PROPERTY1/
1 B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F,UF,PSIF,HF,SF,
2 CPF,CVF,IBMF,JTCF,GAMMAF,AF,MUF,KE,PRANDTLF
* /PROPERTY2/
1 B2G,B3G,B4G,DB2G,DB3G,DB4G,UG,PSIG,HG,SG,
2 CPG,CVG,IBMG,JTCG,GAMMAG,AG,MUG,KG,PRANDTLG
* /PROPERTY3/HFG,SIGMAFG,LACFG
DATA CLRS/27,'H',27,'J',/,BEL/07/
PRINT 100,CLRS,BEL
100 FORMAT(1X,5A1,'National Technical University of Athens')
PRINT *, ' Department of Mechanical Engineering'
PRINT *, ' Nuclear Engineering Section'
PRINT *
PRINT *, ' HEAVY W.A.S.F. (R) '
PRINT *, 'HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE'
PRINT *, '(Thermodynamic and Transport Properties '
PRINT *, ' of the Heavy Water Substance;an '
PRINT *, ' interactive approach)'
PRINT *, ' Version 3 - DECEMBER 1999'
PRINT *, ' Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>'
PRINT *
PRINT *, ' This version of the code accepts'
PRINT *, ' as input only pressure and temperature. '
PRINT *, ' (range: 0.00660:-1000 bar,3.8-600 C)'
PRINT *, ' To obtain a saturation state,equal either '
PRINT *, ' pressure or temperature to zero (for the'
PRINT *, 'desired temperature or pressure,respectively).'
PRINT *
PRINT *
10 WRITE (*,200)
200 FORMAT($,'Please enter desired pressure in bars: ')
READ *, P
WRITE (*,300)
300 FORMAT($,'Please enter desired temperature in C: ')
READ *, T
IF (T.NE.0.D+0) T=T+273.15
JS=1

```

```

JP=63
CALL HEAVY_WASP(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS)
PRINT *
WRITE (*,400) P
400  FORMAT (1X,'Pressure in bars: ',F8.3)
WRITE (*,500) T-273.15D+0
500  FORMAT (1X,'Temperature in C: ',F8.3)
PRINT *
IF (IS.EQ.0) THEN
WRITE (*,600)
600  FORMAT (1X,'There is no saturation state for ',
+      'this pressure and temperature')
PRINT *
END IF
IF (IS.EQ.1) THEN
WRITE (*,700)
700  FORMAT ($,'Exact saturation temperature for this ',
+      'pressure: ')
WRITE (*,800) TS-273.15D+0
800  FORMAT (F7.3)
PRINT *
END IF
END IF
IF (IS.EQ.2) PRINT *, 'This is a saturation state,',
+      'or almost a saturation state'
WRITE (*,900)
900  FORMAT(1X,40X,'LIQUID          VAPOR')
PRINT *
WRITE (*,1000) SVF,SVG
1000  FORMAT (1X,'Specific Volume in m3/kg:',14X,F8.7,10X,F10.6)
WRITE (*,1100) UF,UG
1100  FORMAT (1X,'Internal Energy in kJ/kg:',10X,F6.1,15X,F6.1)
WRITE (*,1200) HF,HG
1200  FORMAT (1X,'Specific Enthalpy in kJ/kg:', 8X,F6.1,15X,F6.1)
WRITE (*,1300) SF,SG
1300  FORMAT (1X,'Specific Entropy in kJ/(kgK):',9X,F6.4,14X,F7.4)
PRINT *, 'Specific Heat at'
WRITE (*,1400) CPF,CPG
1400  FORMAT (1X,'constant pressure in kJ/(kgK):',4X,F10.4,11X,F10.4)
PRINT *, 'Specific Heat at'
WRITE (*,1500) CVF,CVG
1500  FORMAT (1X,'constant volume in kJ/(kgK):',10X,F6.4,15X,F6.4)
WRITE (*,1600) MUF,MUG
1600  FORMAT (1X,'Viscosity in kg/(ms):',18X,F8.7,13X,F8.7)
WRITE (*,1700) KE,KG
1700  FORMAT (1X,'Thermal Conductivity in W/(mK):', 8X,F5.4,16X,F5.4)
WRITE (*,1800) PRANDTLF,PRANDTLG
1800  FORMAT (1X,'Prandtl number:',22X,F6.3,15X,F6.3)
WRITE (*,1900) SIGMAFG,SIGMAFG
1900  FORMAT (1X,'Surface tension in N/m: ',15X,F7.6,14X,F7.6)
PRINT *
WRITE (*,2000)
2000  FORMAT($,'Do you want another go?(y/n) ')
READ (*,2100) CHAR
2100  FORMAT(A1)
IF (CHAR.EQ.'y') GO TO 10
C
C
C      END MASTER TEST PROGRAM
      STOP
      END

```

### II.1.14 Function FP.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fim/fp.f)

```
FUNCTION FP(DD)
C
C COMPUTE PRESSURE OF HEAVY WATER IN MPa GIVEN TEMPERATURE
C IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
* /Z6/R
* /K1/PP,PR
* /K2/TT,TR
* /QAUX/Q,QDT,Q2D,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSIC2T2
CALL QMUST
C
C CONVERT PRESSURE IN BARS TO PRESSURE IN MPa
C
C PPP=PP/10.
FP=DD*R*TT*(1+DD*Q+DD*DD*QDT)-PPP
RETURN
END
```

### II.1.15 Function FPR3.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wap.fim/fpr3.f)

```
FUNCTION FPR3(X3)
C
C COMPUTE REDUCED PRESSURE OF LIGHT WATER VAPOR IN THERMODYNAMIC
C SUB-REGIONS 3 AND 5 CORRESPONDING TO REDUCED TEMPERATURE AND
C INITIAL GUESS OF REDUCED SPECIFIC VOLUME OF HEAVY WATER
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DIMENSION C(64)
COMMON
* /Z9/C,C010,C011,C012,C310
* /K1/PP,PR
* /K2/TT,TR
XSC0N=0.D+0
XSC1N=0.D+0
XSC2N=0.D+0
XSC3N=0.D+0
XSC4N=0.D+0
XSC6N=0.D+0
DO 10 N=0,9
IF (N.GE.2) XSC0N=XSC0N+(1-N)*C(N)/(X3**N)
IF ((N.GE.2).AND.(N.LE.6))
+ XSC1N=XSC1N+(1-N)*C(10+N)/(X3**N)
IF ((N.GE.2).AND.(N.LE.7))
+ XSC2N=XSC2N+(1-N)*C(20+N)/(X3**N)
IF (N.GE.2) XSC3N=XSC3N+(1-N)*C(30+N)/(X3**N)
IF (N.LE.4) XSC6N=XSC6N+C(60+N)/(TR** (N+2))
10 CONTINUE
```

```

XSC0N=XSC0N+(1-10)*C010/(X3**10)
XSC0N=XSC0N+(1-11)*C011/(X3**11)
XSC0N=XSC0N+C(1)+C012/X3
XSC1N=XSC1N+C(11)+C(17)/X3
XSC2N=XSC2N+C(21)+C(28)/X3
XSC3N=XSC3N+C(31)+C310/X3
XSC4N=5*C(41)*(TR-1)/(X3**6)*(TR**23))
XSC6N=6*(X3**5)*XSC6N
FPR3=-XSC0N-XSC1N*(TR-1)-XSC2N*((TR-1)**2)-XSC3N*((TR-1)**3)
+ XSC4N-XSC6N-PR
RETURN
END

```

### II.1.16 Function FPR4.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.f.in/fpr4.f)

```

C
C FUNCTION FPR4 (X4)
C
C COMPUTE REDUCED PRESSURE OF LIQUID LIGHT WATER IN THERMODYNAMIC
C SUB-REGIONS 4 AND 5 CORRESPONDING TO REDUCED TEMPERATURE AND
C INITIAL GUESS OF REDUCED SPECIFIC VOLUME OF HEAVY WATER
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION D(5,5)
C COMMON
C * /Z4/TRT,TR1,TR2,TR3
C * /Z10/D
C * /K2/TT,TR
C Y=(1-TR)/(1-TR1)
C XSDN1=0.D+0
C XSDN2=0.D+0
C XSDMN=0.D+0
C DO 10 M=3,4
C DO 20 N=1,5
C XSDN1=XSDN1+(N-1)*D(M,N)*(Y**M)/(X4**N)
C CONTINUE
C 20
C XSDMN=XSDMN+XSDN1
C 10 CONTINUE
C DO 30 N=1,3
C XSDN2=XSDN2+(N-1)*D(5,N)*(X4**(N-2))
C 30 CONTINUE
C XSDN2=(Y**32)*XSDN2
C FPR4=FPR3(X4)+XSDMN-XSDN2
C RETURN
C END

```

### II.1.17 Function FPS.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.f.in/fps.f)

```

C
C FUNCTION FPS(TS)
C
C COMPUTE SATURATION PRESSURE OF HEAVY WATER IN MPa AS
C FUNCTION OF TEMPERATURE IN K UNITS

```

```

C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      COMMON
      *      /Z3/PC,TC,VC
      *      /Z7/A1,A2,A4,A11,A20
      *      /K1/PP,PR
C      CONVERT PRESSURES IN BARS TO PRESSURES IN MPa
C
C      PPC=PC/10.
C      PPP=PP/10.
      TAUS=1-(TS/TC)
      EPS=PPC*DEXP((TC/TS)*(A1*TAUS+A2*(TAUS**1.9))+
      + A4*TAUS*TAUS+A11*(TAUS**5.5)+A20*(TAUS**10.)))-PPP
      RETURN
      END

```

### II.1.18 Function FTS.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fim/fts.f)

```

C      FUNCTION FTS(PP)
C      COMPUTE FIRST APPROXIMATION OF HEAVY WATER SATURATION
C      TEMPERATURE IN K UNITS AS FUNCTION OF PRESSURE IN BARS
C      ACCORDING TO AUTHORS FIT.THIS APPROXIMATION IS TO BE USED
C      AS INITIAL GUESS FOR NUMERICAL CALCULATION OF ACTUAL
C      SATURATION TEMPERATURE OF LIGHT WATER
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DATA A/226.1602382D+0/,B/146.0981428D+0/,C/0.1940222581D+0/
      FTS=A+B*(PP**C)
      RETURN
      END

```

### II.1.19 Υπορουτίνα IBM\_JTC.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fim/ibm\_jtc.f)

```

C      SUBROUTINE IBM_JTC(IBM,JTC)
C      COMPUTE ISOTHERMAL BULK MODULUS IN 1/MPa AND JOULE-THOMMSON
C      COEFFICIENT IN K/MPa
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
      DOUBLE PRECISION IBM,JTC
      COMMON
      *      /Z6/R
      *      /K2/TT,TR
      *      /K3/DD
      *      /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSIGT,PSI02T2
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY TEMPERATURE
C
      HTD=-7T+PSI02T2+R*(1+DD*Q+DD*DD*QDT-(1000/TT)
      * (DD*QTD+DD*DD*Q2DT+DD*(1000/TT)*Q2T2D))

```



```

C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY DENSITY
C
C HDI='T'R*(Q+(1000/TT)*(QTD+DD*Q2DT)+3*DD*QDT+DD*DD*Q2D2T)
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY TEMPERATURE
C
C PTD=R*(DD+DD*DD*Q+(DD**3)*QDT-(1000/TT)*(DD**3)*
- Q2DT+DD*DD*QTD))
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY DENSITY
C
C PDI='T'R*(1+2*DD*Q+4*DD*DD*QDT+(DD**3)*Q2D2T)
C CP=HTD-HD*'P'D/PDT
C JTC=(1/(DD*CP))*(TT/DD)*(PTD/PDT)-1)
C IBM=1./(DD*PDT)
C RETURN
C END

```

## II.1.20 Υπορουτίνα HEAVY\_WASP.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fim/light\_wasp.f)

```

C SUBROUTINE HEAVY_WASP(JS,JP,P,T,TS,SVF,SVG,JR,IS)
C
C HEAVY WATER AND STEAM PROPERTY PACKAGE DEVELOPED BY
C PETROPOULOS N.P.
C
C COMPUTE THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF HEAVY WATER
C GIVEN PRESSURE IN BARS AND TEMPERATURE IN DEGREES CENTIGRADE
C MAINLY ACCORDING TO EQUATION OF STATE DEVELOPED BY HILL P.S.,
C MACMILLAN R.D.C. AND LEE V.,AND EQUATIONS FOR TRANSPORT
C PROPERTIES DEVELOPED BY MATSUNAGA N. AND NAGASHIMA A.
C PARTS OF CODE STRUCTURE ARE BASED TO SIMILAR PROPERTY PACKAGE
C FOR LIGHT WATER DEVELOPED BY HENDRICKS R.C.,PELLER I.C. AND
C BARON A.K.PARTS OF EQUATION OF STATE FOR LIGHT WATER DEVELOPED
C BY SCHMIDT E. AND GRIGULL U. ARE USED TO PROVIDE GOOD INITIAL
C GUESSES FOR NUMERICAL CALCULATION OF HEAVY WATER DENSITY.
C VALUE OF JS(INPUT) MUST BE 1.RETURNED THERMODYNAMIC AND
C TRANSPORT PROPERTIES ARE SPECIFIED BY JP(INPUT).JR(OUTPUT)
C REPRESENTS THERMODYNAMIC SUB-REGION OF P-T DIAGRAM IN WHICH
C INPUT LIES.IS(OUTPUT) INDICATES RELATIVE POSITION OF INPUT TO
C SATURATION CURVE.COMPUTE SATURATION PROPERTIES IF EITHER PRESSURE
C OR TEMPERATURE IS EQUAL TO ZERO (FOR RESPECTIVE TEMPERATURE OR
C PRESSURE)
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION IBMF,IBMG,JTCF,JTCG,KF,KG,LACFG,MUF,MJG
C
C COMMONS LABELLED WITH K REPRESENT MOST IMPORTANT INPUT OR
C OUTPUT
C
C COMMON
C * /Z3/PC,TC,VC
C * /Z11/PSEUDODC
C * /K1/PP,PR
C * /K2/TT,TR
C * /K3/DD
C * /K4/J
C
C COMMONS LABELLED WITH PROPERTY1 REPRESENT MAINLY PROPERTIES OF

```

```

C LIQUID HEAVY WATER
C
C * /PROPERTY1/
C
C SUFFIX F STANDS MAINLY FOR FLUID(LIQUID)
C
C 1 B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F,UF,PSIF,HF,SF,
C 2 CPF,CVF,IBMF,JTCF,GAMMAF,AF,MUF,KF,PRANDTLF
C
C COMMONS LABELLED WITH PROPERTY2 REPRESENT MAINLY PROPERTIES OF
C HEAVY WATER VAPOR
C
C * /PROPERTY2/
C
C SUFFIX G STANDS MAINLY FOR GAS(VAPOR)
C
C 1 B2G,B3G,B4G,DB2G,DB3G,DB4G,UG,PSIG,HG,SG,
C 2 CPG,CVG,IBMG,JTCG,GAMMAG,AG,MUG,KG,PRANDTLG
C
C COMMONS LABELLED WITH PROPERTY 3 REPRESENT PROPERTIES
C EXISTING ONLY IN SATURATION STATES,SUFFIX FG STANDS FOR
C SATURATION
C
C * /PROPERTY 3/HFG,SIGMAFG,IACFG
C DATA ZERO/0./
C
C CHECK FOR CORRECT CALL OF HEAVY_WASP ROUTINE
C
C IF (JS.NE.1) THEN
C WRITE (6,100)
C 100 FORMAT(/,1X,'Fail to set the JS parameter correctly!',/)
C STOP
C
C END IF
C IF (JP.GT.63.OR.JP.LT.0) THEN
C WRITE (6,200)
C 200 FORMAT(/,1X,'Fail to set the JP parameter correctly!',/)
C STOP
C
C END IF
C GO TO (10),JS
C 10 PP=P
C TT=T
C TS=ZERO
C
C CHECK FOR OUT OF RANGE
C
C CALL CHECKPT(TS,JR,IS)
C P=PP
C T=TT
C J=JR
C
C INITIALIZE VALUES OF DENSITIES AND SPECIFIC VOLUMES
C
C DF=ZERO
C DG=ZERO
C SVF=ZERO
C SVG=ZERO
C
C INITIALIZE VALUES OF OTHER PROPERTIES
C
C B2F=ZERO
C B2G=ZERO

```

```

B3F=ZERO
B3G=ZERO
B4F=ZERO
B4G=ZERO
DB2F=ZERO
DB2G=ZERO
DB3F=ZERO
DB3G=ZERO
DB4F=ZERO
DB4G=ZERO
UF=ZERO
UG=ZERO
PSIF=ZERO
PSIG=ZERO
HF=ZERO
HG=ZERO
SF=ZERO
SG=ZERO
CPF=ZERO
CPG=ZERO
CVF=ZERO
CVG=ZERO
IBMF=ZERO
IBMG=ZERO
JTCF=ZERO
JTGF=ZERO
GAMMAF=ZERO
GAMMAG=ZERO
AF=ZERO
AG=ZERO
MUF=ZERO
MUG=ZERO
KF=ZERO
KG=ZERO
PRANDTLF=ZERO
PRANDTLG=ZERO
HFG=ZERO
SIGMAFG=ZERO
LACFG=ZERO

C          DENSITY OF LIQUID HEAVY WATER
C
C          IF ((J.EQ.1).OR.(J.EQ.6).OR.(J.EQ.4).OR.(J.EQ.5)) THEN
CALL DENSF(DF)
IF (DF.NE.ZERO) THEN

C          CONVERT DENSITY TO SPECIFIC VOLUME IN m3/Kg
C          SVF=1/(1000*DF)
C          DD=DF
C          END IF

C          CHECK FOR CRITICAL POINT VICINITY
C
C          IF ((ABS(T-TC).LE.10.).AND.(ABS(DD/PSEUDODC-1.).LE.0.3))
+ THEN
WRITE(6,300)
STOP
END IF

C
C          OTHER PROPERTIES OF LIQUID HEAVY WATER

```

```

C      IF (JP.NE.0) CALL TOTAL
1      (JP,B2F,B3F,B4F,DB2F,DB3F,DB4F,UF,PSIF,HF,SF,
2      CPF,CVF,IBMF,IBMG,JTCF,GAMMAF,AF,MUF,KF,PRANDTLF,SIGMAFG)
END IF
C
C      DENSITY OF HEAVY WATER VAPOR
C
C      IF ((J.EQ.2).OR.(J.EQ.6).OR.(J.EQ.3).OR.(J.EQ.5)) THEN
CALL DENS(DG)
IF (DG.NE.ZERO) THEN
C
C      CONVERT DENSITY TO SPECIFIC VOLUME IN m3/kg
C
C      SVG=1/(1000*DG)
DD=DG
END IF
C
C      CHECK FOR CRITICAL POINT VICINITY
C
C      IF ((ABS(T-TC).LE.10.).AND.(ABS(DD/PSEUDODC-1.).LE.0.3))
+ THEN
WRITE(6,300)
STOP
END IF
C
C      OTHER PROPERTIES OF HEAVY WATER VAPOR
C
C      IF (JP.NE.0) CALL TOTAL
1      (JP,B2G,B3G,B4G,DB2G,DB3G,DB4G,UG,PSIG,HG,SG,
2      CPG,CVG,IBMG,IBMG,JTCG,GAMMAG,AG,MUG,KG,PRANDTLG,SIGMAFG)
END IF
IF ((J.EQ.5).OR.(J.EQ.6)) THEN
C
C      COMPUTE LATENT HEAT OF HEAVY WATER IN kJ/kg
C
C      HFG=HG-HF
C
C      COMPUTE LAPLACE CONSTANT OF HEAVY WATER IN m
C
C      IF ((DF.NE.ZERO).AND.(DG.NE.ZERO).AND.(ABS(DF-DG).GE.1.D-3))
+ THEN
G=9.80665D+0
LACFG=DSQRT(SIGMAFG/(G*1000*(DF-DG)))
END IF
END IF
300  FORMAT(/,1X,'Calculations near the critical point have ',
+ 'no validity!','/)
RETURN
END

```

### II.1.21 Function PRL.

```

(alpha) /users2/npetro/heavy_wasp.fn/prl.f
C
C      FUNCTION PRL(TR)
C
C      COMPUTE REDUCED PRESSURE OF LIGHT WATER CORRESPONDING TO
C      REDUCED TEMPERATURE OF HEAVY WATER CALCULATED FROM GIVEN
C      TEMPERATURE IN K UNITS ALONG THE BOUNDARY BETWEEN THERMODYNAMIC

```

```

C SUB-REGIONS 2 AND 3
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION L
C COMMON
C * /Z4/TRT,TR1,TR2,TR3
C * /Z5/PR1,PR2
C DATA L/7.160997524D+0/
C PRL=((TR2-TR)*PR1+(TR-TR1)*PR2-L*(TR2-TR)*(TR-TR1))/(TR2-TR1)
C RETURN
C END

```

### II.1.22 Function PRS.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp\_fin/prs.f)

```

C FUNCTION PRS(TR)
C
C COMPUTE REDUCED SATURATION VAPOR PRESSURE OF HEAVY WATER AS
C FUNCTION OF TEMPERATURE IN K UNITS
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C COMMON
C * /Z3/PC,TC,VC
C * /Z7/A1,A2,A4,A11,A20
C TS=TR*TC
C TAUS=1-(TS/TC)
C PRS=DEXP((TC/TS)*(A1*TAUS+A2*(TAUS**1.9)+
C + A4*TAUS*TAUS+A11*(TAUS**5.5)+A20*(TAUS**10.)))
C RETURN
C END

```

### II.1.23 Υπορουτίνα QMUST.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp\_fin/qmust.f)

```

C SUBROUTINE QMUST
C
C MAIN DATA-FITTING SUBROUTINE
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION A(10,7),C(8)
C COMMON
C * /Z6/R
C * /K2/TT,TR
C * /K3/DD
C
C COMMON COMMAND LABELLED WITH QAUX REPRESENT MOST IMPORTANT
C QUANTITIES FOR THE DATA-FITTING PROCEDURE
C
C * /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSIC,PSI0T,PSI02T2
C
C PRIMARY CONSTANTS OF DOUBLE SERIES EXPANSION OF Q
C
C DATA
C
C COEFFICIENTS Aij

```

```

C
* A
1 /73.13848592D+0,-285.20415917D+0,535.71659288D+0,
2 -649.81000614D+0,574.63280680D+0,-387.92157774D+0,
3 206.34569512D+0,-79.89428513D+0,-996.36169097D+0,
4 -766.27290006D+0,24.74108348D+0,-105.57317181D+0,
5 200.87302906D+0,-235.18776440D+0,224.56976938D+0,
6 -40.09924297D+0,128.77154771D+0,-28.40907978D+0,
7 -1389.08003142D+0,-1672.09705556D+0,11.64775625D+0,
8 -42.51820251D+0,72.45541064D+0,-82.55391989D+0,4*C.D+0,
9 -267.85482520D+0,-998.64982710D+0,2.66566642D+0,
A -9.19657655D+0,15.13096920D+0,-7.24860975D+0,4*0.D+0,
B -46.83904320D+0,-227.34793319D+0,-6.73408249D+0,
C 24.03602093D+0,-41.08079830D+0,45.39111005D+0,
D 4*0.D+0,139.21659329D+0,566.02305152D+0,-5.24802962D+0,
E 18.52690633D+0,-31.42397369D+0,26.43208802D+0,
F 4*0.D+0,96.31411481D+0,453.20280933D+0,-1.17583447D+0,
G 4.13816432D+0,-6.55842224D+0,4.75774631D+0,4*0.D+0,
H 19.39184297D+0,103.56819758D+0/
DATA
C
COEFFICIENTS Ci
C
* C
+ /1866.73D+0,4661.9D+0,64.605D+0,-284.8833D+0,100.1333D+0,
+ -13.135D+0,0.32684D+0,-1211.253D+0/,
C
OTHER CONSTANTS
C
* TAJ1,TAJ2,E,RAJ1,RAJ2
+ /1.553D+0,2.53D+0,4.3D+0,0.7D+0,1.1D+0/
C
TEMPERATURE PARAMETER
TAU=1000/TT
TAUC=TAJ1
EX=EXP(-E*DD)
SUMI1=0.D+0
SUMI3=0.D+0
SUMI5=0.D+0
DO 10 I=1,8
SUMI1=SUMI1+A(I,1)*(DD-RAJ1)**(I-1)
IF (I.GE.2) SUMI3=SUMI3+(I-1)*A(I,1)*(DD-RAJ1)**(I-2)
IF (I.GE.3) SUMI5=SUMI5+A(I,1)*(I-1)*(I-2)*(DD-RAJ1)**(I-3)
10 CONTINUE
SUMJ1=0.D+0
SUMJ2=0.D+0
SUMJ3=0.D+0
SUMJ4=0.D+0
SUMJ5=0.D+0
SUMJ6=0.D+0
DO 30 J=1,7
SUMI2=0.D+0
SUMI4=0.D+0
SUMI6=0.D+0
DO 20 I=1,8
SUMI2=SUMI2+A(I,J)*(DD-RAJ2)**(I-1)
IF (I.GE.2) SUMI4=SUMI4+(I-1)*A(I,J)*(DD-RAJ2)**(I-2)
IF (I.GE.3) SUMI6=SUMI6+A(I,J)*(I-1)*(I-2)*(DD-RAJ2)**(I-3)
20 CONTINUE
SUMI2=SUMI2+EX*(A(9,J)+A(10,J)*DD)

```

```

SUMI4=SUMI4+EX*(-E*(A(9,J)+A(10,J)*DD)+A(10,J))
SUMI6=SUMI6+EX*(-E)*(-E*A(9,J)+A(10,J))*(2-E*DD)
IF (J.GE.2) SUMJ1=SUMJ1-((TAU-TAJ2)**(J-2))*SUMI2
IF (J.GE.3) SUMJ2=SUMJ2-(J-2)*((TAU-TAJ2)**(J-3))*SUMI2
IF (J.GE.2) SUMJ3=SUMJ3-((TAU-TAJ2)**(J-2))*SUMJ4
IF (J.GE.3) SUMJ4=SUMJ4-(J-2)*((TAU-TAJ2)**(J-3))*SUMI4
IF (J.GE.2) SUMJ5=SUMJ5-((TAU-TAJ2)**(J-2))*SUMI6
IF (J.GE.4) SUMJ6=SUMJ6-(J-2)*(J-3)*((TAU-TAJ2)**(J-4))*SUMI2
30 CONTINUE
SUMI1=SUMI1+EX*(A(9,1)+A(10,1)*DD)
SUMI3=SUMI3+EX*(-E*(A(9,1)+A(10,1)*DD)+A(10,1))
SUMI5=SUMI5+EX*(-E)*(-E*A(9,1)+A(10,1))*(2-E*DD)
C
C DATA-FITTING FUNCTION,Q
C
C Q=SUMI1+(TAU-TAUC)*SUMJ1
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY TEMPERATURE
C
C QTD=SUMJ1+(TAU-TAUC)*SUMJ2
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY DENSITY
C
C QDT=SUMI3+(TAU-TAUC)*SUMJ3
C
C 2nd PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY DENSITY AND TEMPERATURE
C
C Q2DT=SUMJ3+(TAU-TAUC)*SUMJ4
C
C 2nd PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY DENSITY
C
C Q2D2T=SUMI5+(TAU-TAUC)*SUMJ5
C
C 2nd PARTIAL DERIVATIVE OF Q BY TEMPERATURE
C
C Q2TD=2*SUMJ2+(TAU-TAUC)*SUMJ6
SUMI7=0.D+0
SUMI8=0.D+0
SUMI9=0.D+0
DO 40 I=1,6
SUMI7=SUMI7+C(I)*((TT/1000.))**(I-1)
SUMI8=SUMI8+C(I)*(I-1)*((TT/1000.))**(I-2)
SUMI9=SUMI9+C(I)*(I-1)*(I-2)*((TT/1000.))**(I-3)
40 CONTINUE
C
C REFERENCE FUNCTION,PSIO
C
C PSIO=SUMI7+C(7)*DLOG(TT)+C(8)*TT*DLOG(TT)/1000
C
C 1st PARTIAL DERIVATIVE OF PSIO BY TEMPERATURE
C
C PSIO1=SUMI8/1000+C(7)/TT+C(8)*DLOG(TT)/1000+C(8)/1000
C
C 2nd PARTIAL DERIVATIVE OF PSIO BY TEMPERATURE
C
C PSIO2=SUMI9*(1.D-6)-C(7)/(TT*TT)+C(8)/(1000*TT)
RETURN
END

```

### II.1.24 Υπορουτίνα SHP.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fn/shp.f)

```
C      SUBROUTINE SHP(CP)
C
C      COMPUTE SPECIFIC HEAT OF HEAVY WATER AT CONSTANT PRESSURE IN
C      KJ/(kgK) GIVEN TEMPERATURE IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
*      /Z6/R
*      /K2/TT, TR
*      /K3/DD
*      /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY TEMPERATURE
C
C      HTD=-TT*PSI02T2+R*(1+D3*Q+D3*DD*QDT-(1000/TT)
C      + *(DD*QTD+D3*DD*Q2DT+DD*(1000/TT)*Q2T2D))
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY DENSITY
C
C      HDT=TT*R*(Q+(1000/TT)*(QTD+DD*Q2DT)+3*DD*QDT+DD*DD*Q2D2T)
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY TEMPERATURE
C
C      PTD=R*(DD+DD*DD*Q+(DD**3)*QDT-(1000/TT))*((DD**3)*
C      + Q2DT+DD*DD*QTD))
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY DENSITY
C
C      PDT=TT*R*(1+2*DD*Q+4*DD*DE*QDT+(DD**3)*Q2D2T)
CP=HTD-HDT*PTD/PDT
RETURN
END
```

### II.1.25 Υπορουτίνα SHR\_SOVE.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fn/shr\_sove.f)

```
C      SUBROUTINE SHR_SOVE(GAMMA,A)
C
C      COMPUTE ISENTROPIC EXPANSION COEFFICIENT(SPECIFIC HEAT RATIO)
C      AND SONIC VELOCITY IN m/s OF HEAVY WATER
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
*      /Z6/R
*      /K2/TT, TR
*      /K3/DD
*      /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY TEMPERATURE
C
C      HTD=-TT*PSI02T2+R*(1+DD*Q+DD*DD*QDT-(1000/TT)
C      + *(DD*QTD+DD*DD*Q2DT+DD*(1000/TT)*Q2T2D))
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF ENTHALPY BY DENSITY
```



```

C      HCT=TT*R*(Q+(1000/TT))*(QTD+DD*Q2DT)+3*DD*QDT+DD*DD*Q2D2T)
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY TEMPERATURE
C
C      PTD=R*(DD+DD*DD*Q+(DD**3)*QDT-(1000/TT))*(DD**3)*
+      Q2DT+DD*DD*QTD))
C
C      1st PARTIAL DERIVATIVE OF PRESSURE BY DENSITY
C
C      PDT=TT*R*(1+2*DD*Q+4*DD*DD*QDT+(DD**3)*Q2D2T)
C
C      COMPUTE CP
C
C      CP=HTD-HDT*PTD/PDT
C
C      COMPUTE CV
C
C      CV=-R*DD*(1.D+6/(TT*TT))*Q2T2D-TT*PSI02T2
      GAMMA=CP/CV
C
C      A=(10**(3/2.))* (1./DSQRT(1/PDT-(TT/(CP*(DD**2)))*(PTD**2)))/
+      (PDT**2))
C
C      RETURN
C
C      END

```

### 11.1.26 Υπορουτίνα SHV.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fn/shv.f)

```

C
C      SUBROUTINE SHV(CV)
C
C      COMPUTE SPECIFIC HEAT OF HEAVY WATER AT CONSTANT VOLUME IN
C      kJ/(kgK) GIVEN TEMPERATURE IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
COMMON
*      /Z6/R
*      /K2/TT,TR
*      /K3/DD
*      /QAUX/Q,QDT,Q2D2T,QTD,Q2T2D,Q2DT,PSI0,PSI0T,PSI02T2
CV=-R*DD*(1.D+6/(TT*TT))*Q2T2D-TT*PSI02T2
RETURN
END

```

### 11.1.27 Υπορουτίνα SOLVE.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fn/solve.f)

```

C
C      SUBROUTINE SOLVE(F,DF,EPS,NDEC,X,ITMAX,IER)
C
C      FIND REAL ZERO X OF REAL FUNCTION F GIVEN GOOD INITIAL GUESS
C      X AND FUNCTION DF (1st PARTIAL DERIVATIVE OF F BY X).ROOT X
C      IS ACCEPTED IF ABSOLUTE VALUE OF F(X).LE.EPS(INPUT).ROOT X
C      IS ACCEPTED IF TWO SUCCESSIVE APPROXIMATIONS AGREE TO FIRST
C      NDEC(INPUT) DECIMAL DIGITS.X(INPUT) IS AN INITIAL
VALUE.X(OUTPUT)
C
C      CONTAINS COMPUTED ROOT.ITMAX(INPUT) IS MAXIMUM ALLOWABLE NUMBER

```

```

C OF NEWTON_RAPHSON ITERATIONS USED ON ROOT.IER(OUTPUT) WARNING
C ERROR PARAMETER=N,N=1 ROOT X WAS BYPASSED BECAUSE DF RFCOMES
C TOO SMALL.X IS SET TO 111111.THIS ERROR CONDITION MAY CAUSE AN
C OVERFLOW,N=2 ROOT X WAS BYPASSED BECAUSE ITMAX WAS EXCEEDED.
C X IS SET TO 222222,N=3 SEVERAL OF THE ABOVE ERROR CONDITIONS
C OCCURED.X IS SET TO EITHER 111111. OR 222222. AS ABOVE.DOUBLE
C PRECISION ROUTINE.
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C EXTERNAL F,DF
C TOL=10.**(-NDEC)
C IER=0
C IF (ITMAX.GT.100) ITMAX=100
C DO 20 K=1,ITMAX
C IF (ABS(DF(X)).LT.EPS) THEN
C X=111111.D+0
C IER=1
C RETURN
C END IF
C XK=X-F(X)/DF(X)
C IF (K.EQ.41) TOL=TOL*10
C IF (K.EQ.61) TOL=TOL*10
C IF (K.EQ.81) TOL=TOL*10
C IF (ABS(XK-X).LT.TOL) THEN
C X=XK
C RETURN
C ELSE
C X=XK
C IF (ABS(F(X)).LT.EPS) THEN
C RETURN
C END IF
C END IF
C 20 CONTINUE
C X=222222.D+0
C IF (IER.EQ.0) THEN
C IER=2
C ELSE
C IER=3
C END IF
C RETURN
C END

```

## II.1.28 Υπορουτίνα SVLWL.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fn/svlwl.f)

```

C SUBROUTINE SVLWL(DL)
C COMPUTE DENSITY OF LIQUID LIGHT WATER IN g/cm3 CORRESPONDING TO
C REDUCED PRESSURE AND TEMPERATURE OF HEAVY WATER CALCULATED FROM
C GIVEN PRESSURE IN BARS AND TEMPERATURE IN K UNITS
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION AM(12),A(22)
C COMMON
C * /Z3/PC,TC,VC
C * /Z6/R
C * /K1/PP,PR
C * /K2/TT,TR

```

```

* /K4/J
EXTERNAL FPR4,DFPR4
C
C NUMERICAL VALUES OF PRIMARY CONSTANTS IN THERMODYNAMIC
C SUB-REGION 1
C
DATA
* AM
1 /8.438375405D-1,5.362162162D-4,1.72D+0,7.342278489D-2,
2 4.97585887D-2,6.5371543D-1,1.15D-6,1.5108D-5,1.4188D-1,
3 7.002753165D+0,2.995284926D-4,2.04D-1/,
* A
1 /10*0.D+0,7.982692717D+0,-2.616571843D-2,1.52241179D-3,
2 2.284279054D-2,2.421647003D+2,1.269716088D-10,2.074838328D-7,
3 2.17402035D-8,1.105710498D-9,1.293441934D+1,1.308119072D-5,
4 6.047626338D-14/
DATA
* EPS,NDEC,ITMAX/1.D-5,5,100/
C
C ACT ACCORDING TO THERMODYNAMIC SUB-REGION SPECIFICATION,JR
C
IF (J.EQ.6).OR.(J.EQ.5) PR=PRS(TR)
Y=1-(AM(1)*TR*TR)-(AM(2)/(TR**6))
Z=AM(3)*Y*Y-2*AM(4)*TR+2*AM(5)*PR
IF (Z.LE.0.) THEN
Z=Y
ELSE
Z=Y+DSQRT(Z)
END IF
X1=A(11)*AM(5)/(Z**(5./17.))
1 +(A(12)+A(13)*TR+A(14)*TR*TR+A(15)*((AM(6)-TR)**10)
2 +A(16)/(AM(7)+(TR**19)))
3 -(A(17)+2*A(18)*PR+3*A(19)*PR*PR)/(AM(8)+(TR**11))
4 -A(20)*(TR**18)*(AM(9)+TR*TR)
5 *(-3/((AM(10)+PR)**4)+AM(11))
6 +3*A(21)*(AM(12)-TR)*PR*PR+4*(A(22)/(TR**20))*(PR**3)
IF (J.EQ.4) THEN
X4=X1
CALL SOLVE(FPR4,DFPR4,EPS,NDEC,X4,ITMAX,IER)
X1=X4
END IF
IF (J.EQ.5) THEN
X4=X1
CALL SOLVE(FPR4,DFPR4,EPS,NDEC,X4,ITMAX,IER)
X1=X4
END IF
PR=PP/PC
Vj=X1*VC
DL=1/VL
RETURN
END

```

## II.1.29 Υπορουτίνα SVLWV.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp\_fin/svlwv.f)

```

SUBROUTINE SVLWV(DV)
C
C COMPUTE DENSITY OF LIGHT WATER VAPOR IN g/cm3 CORRESPONDING TO
C REDUCED PRESSURE AND TEMPERATURE OF HEAVY WATER CALCULATED FROM

```

```

C      GIVEN PRESSURE IN BARS AND TEMPERATURE IN K UNITS
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C      DIMENSION NM(8),B(9,6),BM(8,2),LM(8)
C      DOUBLE PRECISION I1
C      INTEGER ZM(8,3),XM(8,2)
C      COMMON
C      /Z3/PC,TC,VC
C      /Z6/R
C      /K1/PP,PR
C      /K2/TT,TR
C      /K4/J
C      EXTERNAL FPR3,DFPR3
C
C      NUMERICAL VALUES OF PRIMARY CONSTANTS
C
C      DATA
C
C      THERMODYNAMIC SUB-REGION 2
C
C      * B0,B90/7.6333333333D-1,.936587558D+2/,
C      * B
C      1      /6.670375918D-2,8.390104328D-2,4.520918904D-1,
C      2      -5.975336707D-1,5.958051609D-1,1.190610271D-1,j.683998803D-1,
C      3      6.552390126D-3,-1.388522425D+3,1.388983801D+0,2.614670893D-2,
C      4      1.069036614D-1,-8.847535804D-2,-5.159303373D-1,
C      5      -9.867174132D-2,-5.809438001D-2,5.710218649D-4,
C      6      4.126607219D+3,0.D+0,-3.373439453D-2,2*0.D+0,2.075021122D-1,
C      7      3*0.D+0,-6.508211677D+3,8*0.D+0,5.745984054D+3,
C      8      8*0.D+0,-2.693088365D+3,8*0.D+0,5.235718623D+2/,
C      * BM(6,1),BM(7,1),BM(8,1),BM(8,2)
C      + /4.006073948D-1,8.636081627D-2,-8.532322921D-1,3.460208861D-1/,
C
C      NUMBERS OF TERMS n(m) AND l(m),AND EXPONENTS z(m,n) AND x(m,n)
C
C      * NM/2,3,2,2,3,2,2,2/,
C      * ZM/13,18,18,25,32,12,24,24,3,2,10,14,28,11,18,14,
C      + 0,1,0,0,24,0,0,0/,
C      * LM/0,0,0,0,0,1,1,2/,
C      * XM/0,0,0,0,0,14,19,54,0,0,0,0,0,0,0,27/
C      DATA
C      * EPS,NDEC,ITMAX/1.D-5,5,100/
C
C      ACT ACCORDING TO THERMODYNAMIC SUB-REGION SPECIFICATION,JR
C
C      IF ((J.EQ.6).OR.(J.EQ.5)) PR=PRS(TR)
C      I1=10*R*TC/(PC*VC)
C      X=EXP(B0*(1-TR))
C      VSM1=0.D+0
C      VSM2=0.D+0
C      VSN=0.D+0
C      DO 20 M=1,8
C          VSN1=0.D+0
C          VSN2=0.D+0
C          VSL=0.D+0
C          IF (M.LE.5) THEN
C              DO 30 N=1,NM(M)
C                  VSN1=VSN1+B(M,N)*(X**ZM(M,N))
C              CONTINUE
C                  VSM1=VSM1+M*(PR**(M-1))*VSN1
C              ELSE
C
C      30

```

```

40      DO 40 N=1,NM(M)
          VSN2=VSN2+B(M,N)*(X**ZM(M,N))
          CONTINUE
          DO 50 L=1,LM(M)
              VSL=VSL+BM(M,L)*(X**XM(M,L))
              CONTINUE
              VSM2=VSM2+((M-2)*(PR**(1-M))*VSN2)/(((PR**(2-M))+VSL)**2)
              END IF
          CONTINUE
          VSN=VSN+(11.*(PR/PRL(TR))**10)*B90
          DO 60 N=1,6
              VSN=VSN+(11.*(PR/PRL(TR))**10)*B(9,N)*(X**N)
          CONTINUE
          X2=I1*(TR/PR)-VSM1-VSM2+VSN
          IF ((J.EQ.3).OR.(J.EQ.5)) THEN
              IF (X2.LE.0.) THEN
                  X3=I1*(TR/PR)
              ELSE
                  X3=X2
              END IF
          END IF
          CALL SOLVE(FPR3,DFPR3,EPS,NDEC,X3,ITMAX,IER)
          X2=X3
          END IF
          PR=PP/PC
          VV=VC*X2
          DV=1/VV
          RETURN
          END

```

### II.1.30 Υπορουτίνα TENSION.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/tension.f)

```

C      SUBROUTINE TENSION(SIGMA)
C
C      COMPUTE SURFACE TENSION OF HEAVY WATER IN N/m GIVEN
C      TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING TO EQUATION DEVELOPED BY
C      STRAUB J.,ROGNER N. AND GRIGULL U.
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C      DOUBLE PRECISION M
C      COMMON
C      *      /K2/FT,TR
C      *      /K4/J
C      DATA
C      *      SIGMA0,M,B/245.3D-3,1.27D+0,-0.663D+0/
C      *      TCSTR/644.65D+0/
C      SIGMA=0.
C      IF ((J.NE.6).AND.(J.NE.5)) RETURN
C      TAUT=1-TT/TCSTR
C      SIGMA=SIGMA0*(TAUT**M)*(1+B*TAUT)
C      RETURN
C      END

```

### II.1.31 Υπορουτίνα TOTAL.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/total.f)

```

SUBROUTINE TOTAL
  1   (JP,B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4,U,PSI,H,S,
  2   CP,CV,IBM,JTC,GAMMA,A,MU,K,PRANDTL,SIGMA)
C
C MASTER SERVICE SUBPROGRAM DIRECTLY UNDER HEAVY WASP ROUTINE.
C IF VALUES OF SATURATION PROPERTIES ARE NEEDED THIS SUBPROGRAM
C MUST BE CALLED TWICE.
C
  IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
  DOUBLE PRECISION IBM,JTC,K,MU
  DIMENSION JPC1(32),JPC2(32),JPC3(32),JPC4(32)
  COMMON
  1 /K4/J
  2 /Z12/JPC1,JPC2,JPC3,JPC4
C
C ACT ACCORDING TO THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES
C SPECIFICATION,JP
C
  IF (MOD(JP,2)) 60,70,60
C
C VIRIAL COEFFICIENTS,1st DERIVATIVES OF VIRIAL COEFFICIENTS BY
C TEMPERATURE AND INTERNAL ENERGY
  60 CALL VIRIAL(B2,B3,B4,DB2,DB3,DB4)
  CALL ENERGY(U,PSI)
  70 DO 80 I=1,32
  IF (JP-JPC1(I)) 100,90,80
  80 CONTINUE
  GO TO 100
C
C ENTHALPY AND ENTROPY
  90 CALL ENTHALPY(H)
  CALL ENTROPY(S)
  100 DO 110 I=1,32
  IF (JP-JPC2(I)) 130,120,110
  110 CONTINUE
  GO TO 130
C
C SPECIFIC HEAT AT CONSTANT PRESSURE,SPECIFIC HEAT AT CONSTANT
C VOLUME,SPECIFIC HEAT RATIO,SONIC VELOCITY,ISOTHERMAL BULK
C MODULUS AND JOULE-THOMSON COEFFICIENT
  120 CALL SHP(CP)
  CALL SHV(CV)
  CALL SHR SOVE(GAMMA,A)
  CALL IBM_JTC(IBM,JTC)
  130 DO 140 I=1,32
  IF (JP-JPC3(I)) 160,150,140
  140 CONTINUE
  GO TO 160
C
C VISCOSITY,THERMAL CONDUCTIVITY AND PRANDTL NUMBER
  150 CALL VISCOSITY(MU)
  CALL CONDUCTIVE(K)
  IF (K.NE.0.D+0) PRANDTL=1000.*MU*CP/K
  160 DO 170 I=1,32
  IF (JP-JPC4(I)) 190,180,170
  170 CONTINUE
  GO TO 190

```

```

C
C SURFACE TENSION
C
180 IF ((J.EQ.5).OR.(J.EQ.6)) CALL TENSION(SIGMA)
190 IF (JP-32) 200,210,210
C
C RESERVED FOR FUTURE USE
C
C
210 GO TO 200
200 RETURN
END

```

### II.1.32 Υπορουτίνα VISCOSITY.

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/viscosity.f)

```

C
C SUBROUTINE VISCOSITY (MU)
C
C COMPUTE VISCOSITY OF HEAVY WATER IN kg/(ms) GIVEN TEMPERATURE
C IN K UNITS AND DENSITY IN g/cm3
C COMPUTATION AT VICINITY OF CRITICAL POINT IS NOT ACCURATE WITH
C THIS FIT
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION MU,N,NSIJ,NSK,N0
C DIMENSION A(6,7),B(4)
C COMMON
C /Z11/PSEUDODC
C /K2/TR,TR
C /K3/DD
C DATA
C A
1 /0.4864192D+0,-0.2448372D+0,-0.8702035D+0,0.8716056D+0,
2 -1.051126D+0,0.3458395D+0,0.3509007D+0,1.315436D-0,
3 1.297752D+0,1.353448D+0,2*0.D+0,-0.2847572D+0,-1.037026D+0,
4 -1.287846D+0,2*0.D+0,-
0.02148229D+0,0.07013759D+0,0.4660127D+0,
5 0.2292075D+0,-0.4857462D+0,2*0.D+0,0.01641220D+0,
6 -0.02884911D+0,0.D+0,0.607171D+0,0.D+0,-0.009603846D+0,
7 -0.01163815D+0,-
0.008239587D+0,3*0.D+0,0.004559914D+0,3*0.D+0,
8 -0.003886659D+0,2*0.D+0/
C B/1.00000D+0,0.940695D+0,0.578377D+0,-0.202044D+0/
C HETA/55.26516D-6/
PSEUDODR=DD/PSEUDODC
NSIJ=0.
NSK=0.
DO 10 I=1,6
DO 20 J=1,7
NSIJ=NSIJ+A(I,J)*((1./TR)-1)**(I-1))*((PSEUDODR-1)**(J-1))
20 CONTINUE
10 CONTINUE
DO 30 K=1,4
NSK=NSK+B(K)*((1./TR)**(K-1))
30 CONTINUE
N0=HETA*(TR**0.5)*(1./NSK)
N=N0*EXP(PSEUDODR*NSIJ)
MU=N
RETURN

```

END

## 11.2 Τα αρχεία κατασκευής εκτελέσιμου προγράμματος.

### 11.2.1 *makefile1.*

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/makefile1)

```
ert: example.o heavy_wasp.o checkpt.o constants.o densf.o densg.o fts.o \  
    fps.o dfps.o prs.o prl.o fp.o dfpd.o qmust.o \  
    svlwl.o svlww.o fpr4.o fpr3.o dfpr4.o dfpr3.o solve.o \  
    total.o energy.o enthalpy.o entropy.o shp.o \  
    shv.o shr_sove.o ibm_jtc.o viscosity.o conductive.f \  
    tension.o  
f77 -g -o ert example.o heavy_wasp.o checkpt.o constants.o densf.o \  
    densg.o fts.o fps.o dfps.o prs.o prl.o fp.o dfpd.o cfpd.o \  
    qmust.o svlwl.o svlww.o fpr4.o fpr3.o \  
    dfpr4.o dfpr3.o solve.o total.o energy.o \  
    enthalpy.o entropy.o shp.o shv.o shr_sove.o ibm_jtc.o \  
    viscosity.o conductive.o tension.o
```

### 11.2.2 *makefile2.*

(αρχείο /users2/npetro/heavy\_wasp.fin/makefile2)

```
ert: example.o heavy_wasp.o checkpt.o constants.o densf.o densg.o fts.o \  
    fps.o dfps.o prs.o prl.o fp.o dfpd.o qmust.o \  
    svlwl.o svlww.o fpr4.o fpr3.o dfpr4.o dfpr3.o solve.o \  
    total.o energy.o enthalpy.o entropy.o shp.o \  
    shv.o shr_sove.o ibm_jtc.o viscosity.o conductive.f \  
    tension.o  
f77 -g -o ert example.o heavy_wasp.o checkpt.o constants.o densf.o \  
    densg.o fts.o fps.o dfps.o prs.o prl.o fp.o dfpd.o \  
    qmust.o svlwl.o svlww.o fpr4.o fpr3.o \  
    dfpr4.o dfpr3.o solve.o total.o energy.o \  
    enthalpy.o entropy.o shp.o shv.o shr_sove.o ibm_jtc.o \  
    viscosity.o conductive.o tension.o
```

```
example.o: example.f  
    f77 -g -c example.f
```

```
light_wasp.o:heavy_wasp.f  
    f77 -g -c heavy_wasp.f
```

```
checkpt.o: checkpt.f  
    f77 -g -c checkpt.f
```

```
constants.o: constants.f  
    f77 -g -c constants.f
```

```
densf.o: densf.f  
    f77 -g -c densf.f
```

```
densg.o: densg.f
```



f77 -g -c densg.f  
fts.o: fts.f  
f77 -g -c fts.f  
fps.o: fps.f  
f77 -g -c fps.f  
dfps.o: dfps.f  
f77 -g -c dfps.f  
prs.o: prs.f  
f77 -g -c prs.f  
prl.o: prl.f  
f77 -g -c prl.f  
fp.o: fp.f  
f77 -g -c fp.f  
dfpd.o: dfpd.f  
f77 -g -c dfpd.f  
qmust.o: qmust.f  
f77 -g -c qmust.f  
svlwl.o: svlwl.f  
f77 -g -c svlwl.f  
svlww.o: svlww.f  
f77 -g -c svlww.f  
fpr4.o: fpr4.f  
f77 -g -c fpr4.f  
fpr3.o: fpr3.f  
f77 -g -c fpr3.f  
dfpr4.o: dfpr4.f  
f77 -g -c dfpr4.f  
dfpr3.o: dfpr3.f  
f77 -g -c dfpr3.f  
solve.o: solve.f  
f77 -g -c solve.f  
total.o: total.f  
f77 -g -c total.f  
energy.o: energy.f  
f77 -g -c energy.f  
enthalpy.o: enthalpy.f  
f77 -g -c enthalpy.f  
entropy.o: entropy.f  
f77 -g -c entropy.f  
shp.o: shp.f  
f77 -g -c shp.f

```
shv.o: shv.f
      f77 -g -c shv.f

shr_scv.o: shr_sove.f
      f77 -g -c shr_sove.f

ibm_jtc.o: ibm_jtc.f
      f77 -g -c ibm_jtc.f

viscosity.o: viscosity.f
      f77 -g -c viscosity.f

indconduct.o: conductive.f
      f77 -g -c conductive.f

tension.o: tension.f
      f77 -g -c tension.f
```

### 11.3 ΕΠΙΒΕΒΛΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ.

(βλ. και τα αποτελέσματα και τον Η/υακ 5-5 στο 5ο κεφάλαιο)

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Heavy Water Substance; an

interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0  
Please enter desired temperature in C: 3

Desired temperature out of range!

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Heavy Water Substance; an  
interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 200

Pressure in bars: 15.460

Temperature in C: 200.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0010436	.114865
Internal Energy in kJ/kg:	823.7	2411.2
Specific Enthalpy in kJ/kg:	825.3	2588.8
Specific Entropy in kJ/(kgK):	2.2495	5.9767
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	4.3130	2.6322
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	3.2309	1.8288
Viscosity in kg/(ms):	.0001519	.0000160
Thermal Conductivity in W/(mK):	.5920	.0390
Prandtl number:	1.107	1.079
Surface tension in N/m:	.037592	.037592

Do you want another go? (Y/N) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Heavy Water Substance; an  
interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 230

Pressure in bars: 28.003

Temperature in C: 230.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0010920

Internal Energy in kJ/kg: 954.2

Specific Enthalpy in kJ/kg: 957.3

Specific Entropy in kJ/(kgK): 2.5171

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 4.4784

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.1246

Viscosity in kg/(ms): .0001297

Thermal Conductivity in W/(mK): .5635

Prandtl number:

Surface tension in N/m: .030550

Do you want another go?(Y/N) n

.030550

1.030

1.264

.0459

.0001297

.0000170

2.0606

3.1246

3.1498

4.4784

3.1498

2.5171

5.7795

957.3

2598.7

954.2

2419.5

.0010920

.063990

HEAVY W.A.S.P. (R)  
 HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)  
 Version 3 - DECEMBER 1999  
 Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
 as input only pressure and temperature.  
 (range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)  
 To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0  
 Please enter desired temperature in C: 260  
 Pressure in bars: 47.223  
 Temperature in C: 260.000

This is a saturation state, or almost a saturation state  
 LIQUID VAPOR

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0011541	.037432
Internal Energy in kJ/kg:	1089.9	2415.9
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1095.3	2592.7
Specific Entropy in kJ/(kgK):	2.7794	5.5879
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	4.7500	3.9413
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	3.0409	2.3530
Viscosity in kg/(ms):	.0001125	.0000180
Thermal Conductivity in W/(mK):	.5289	.0558
Prandtl number:	1.010	1.273
Surface tension in N/m:	.023388	.023388

Do you want another go? (Y/N) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Heavy Water Substance; an  
interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 290

Pressure in bars: 75.199

Temperature in C: 290.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0012383	Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.022486
Internal Energy in kJ/kg:	1233.6	Internal Energy in kJ/kg:	2396.0
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1242.9	Specific Enthalpy in kJ/kg:	2565.1
Specific Entropy in kJ/(kgK):	3.0425	Specific Entropy in kJ/(kgK):	5.3903
constant pressure in kJ/(kgK):	5.2360	Specific Heat at	5.2416
constant volume in kJ/(kgK):	2.9827	Specific Heat at	2.6993
Viscosity in kg/(ms):	.0000981	Viscosity in kg/(ms):	.0000192
Thermal Conductivity in W/(mK):	.4882	Thermal Conductivity in W/(mK):	.0698
Prandtl number:	1.052	Prandtl number:	1.442
Surface tension in N/m:	.016256	Surface tension in N/m:	.016256

Do you want another go? (Y/N) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 320

Pressure in bars: 114.424

Temperature in C: 320.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0013646

Internal Energy in kJ/kg: 1391.5

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1407.1

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.3176

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 6.2793

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 2.9658

Viscosity in kg/(ms): .0000847

Thermal Conductivity in W/(mK): .4416

Prandtl number:

Surface tension in N/m: .009380

Do you want another go? (Y/N) n

.009380

1.798

.0909

.0000208

3.0965

7.8507

5.1663

2503.6

2349.6

.013465



National Technical University of Athens  
 Department of Mechanical Engineering  
 Nuclear Engineering Section

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (R) H.E.A.V.Y.W.A.S.P.

(Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 350

Pressure in bars: 168.181

Temperature in C: 350.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0016036 .007501

Internal Energy in kJ/kg: 1581.3 2246.4

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1608.2 2372.6

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.6350 4.8616

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 10.1505 16.9152

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.0557 3.5647

Viscosity in kg/(ms): .0000691 .0000237

Thermal Conductivity in W/(mK): .3914 .1430

Prandtl number: 1.791 2.805

Surface tension in N/m: .003194 .003194

Do you want another go? (Y/N) n

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)  
 Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
 as input only pressure and temperature.  
 (range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)  
 To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0  
 Please enter desired temperature in C: 370  
 Calculations near the critical may not be accurate!  
 Pressure in bars: 214.666  
 Temperature in C: 370.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID	VAPOR
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0022990
Internal Energy in kJ/kg:	1819.5
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1868.8
Specific Entropy in kJ/(kgK):	4.0317
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	221.6298
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	3.5412
Viscosity in kg/(ms):	.0000464
Thermal Conductivity in W/(mK):	.5379
Prandtl number:	19.134
Surface tension in N/m:	.000111

Do you want another go? (Y/N) n

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Heavy Water Substance; an

interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0.0001  
Please enter desired temperature in C: 20

Desired pressure out of range!

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Heavy Water Substance; an  
interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either  
pressure or temperature to zero (for the  
desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 10  
Please enter desired temperature in C: 360

Pressure in bars: 10.000

Temperature in C: 360.000

Exact saturation temperature for this pressure: 180.380

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .00000000

.258401

Internal Energy in kJ/kg: .0

2698.8

Specific Enthalpy in kJ/kg: .0

2957.2

Specific Entropy in kJ/(kgK): .0000

6.8253

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): .0000

2.0521

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): .0000

1.9556

Viscosity in kg/(ms): .00000000

.0000233

Thermal Conductivity in W/(mK): .0000

.0522

Prandtl number: .000

.917

Surface tension in N/m: .000000

.000000

Do you want another go?(y/n) n

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Heavy Water Substance; an  
interactive approach)  
Version 3 - DECEMBER 1999  
Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
as input only pressure and temperature.  
(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)  
To obtain a saturation state, equal either  
pressure or temperature to zero (for the  
desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 10  
Please enter desired temperature in C: 500

Pressure in bars: 10.000  
Temperature in C: 500.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

	LIQUID	VAPOR
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0000000	.318428
Internal Energy in kJ/kg:	.0	2929.9
Specific Enthalpy in kJ/kg:	.0	3248.3
Specific Entropy in kJ/(kgK):	.0000	7.2405
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	.0000	2.1184
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	.0000	1.6846
Viscosity in kg/(ms):	.0000000	.0000293
Thermal Conductivity in W/(mK):	.0000	.0705
Prandtl number:	.000	.882
Surface tension in N/m:	.000000	.000000

Do you want another go?(y/n) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 50  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 50.000

Temperature in C: 263.510

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID		VAPOR	
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0011626	.035233	
Internal Energy in kJ/kg:	1106.2	2414.6	
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1112.0	2590.7	
Specific Entropy in kJ/(kgK):	2.8100	5.5654	
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	4.7925	4.0599	
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	3.0326	2.3909	
Viscosity in kg/(ms):	.0001107	.0000181	
Thermal Conductivity in W/(mK):	.5244	.0572	
Prandtl number:	1.011	1.287	
Surface tension in N/m:	.022549	.022549	

Do you want another go? (Y/N) n

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 70  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 70.000

Temperature in C: 285.163

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0012227	.024393
Internal Energy in kJ/kg:	1209.7	2400.6
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1218.3	2571.4
Specific Entropy in kJ/(kgK):	2.9997	5.4233
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	5.1344	4.9778
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	2.9900	2.6401
Viscosity in kg/(ms):	.0001003	.0000190
Thermal Conductivity in W/(mK):	.4952	.0674
Prandtl number:	1.040	1.404
Surface tension in N/m:	.017396	.017396

Do you want another go? (Y/N): n

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Heavy Water Substance; an  
interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 90  
Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 90.000

Temperature in C: 302.490

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0012838

Internal Energy in kJ/kg: 1297.1

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1308.6

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.1547

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 5.5631

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 2.9689

Viscosity in kg/(ms): .0000925

Thermal Conductivity in W/(mK): .4695

Prandtl number:

Surface tension in N/m: .013344

Do you want another go? (Y/N) n

.013344

1.569

.0767

.0000198

2.8582

6.0749

5.3020

2544.7

2380.8

.018212



HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Heavy Water Substance; an  
interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either  
pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 100  
Please enter desired temperature in C: 100

Pressure in bars: 100.000

Temperature in C: 100.000

Exact saturation temperature for this pressure: 310.058

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg:

.0009359

Internal Energy in kJ/kg:

402.5

Specific Enthalpy in kJ/kg:

411.8

Specific Entropy in kJ/(kgK):

1.2490

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK):

4.1403

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK):

3.7486

Viscosity in kg/(ms):

.0003324

Thermal Conductivity in W/(mK):

.6411

Prandtl number:

2.147

Surface tension in N/m:

.000000

Do you want another go?(Y/N) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 110

Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 110.000

Temperature in C: 317.060

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0013492

Internal Energy in kJ/kg: 1375.1

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1389.9

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.2896

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 6.1280

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 2.9646

Viscosity in kg/(ms): .0000860

Thermal Conductivity in W/(mK): .4464

Prandtl number: 1.181

Surface tension in N/m: .010033

Do you want another go? (Y/N) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an

interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 130  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 130.000

Temperature in C: 329.688

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0014222

Internal Energy in kJ/kg: 1447.6

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1466.1

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.4126

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 6.9235

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 2.9765

Viscosity in kg/(ms): .0000801

Thermal Conductivity in W/(mK): .4254

Prandtl number: 1.304

Surface tension in N/m: .007275

Do you want another go? (y/n) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 150  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 150.000

Temperature in C: 340.855

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0015077

.009120

Internal Energy in kJ/kg: 1517.5

2288.2

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1540.1

2425.0

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.5294

4.9706

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 8.1617

12.3537

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.0067

3.4111

Viscosity in kg/(ms): .0000744

.0000225

Thermal Conductivity in W/(mK): .4065

.1205

Prandtl number:

1.494

2.311

Surface tension in N/m: .004962

.004962

Do you want another go?(y/n) :

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 170

Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 170.000

Temperature in C: 350.869

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0016147

.007353

Internal Energy in kJ/kg: 1587.8

2241.7

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1615.2

2366.7

Specific Entropy in kJ/(kgK): 3.6457

4.8499

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 10.4350

17.5547

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.0621

3.5800

Viscosity in kg/(ms): .0000685

.0000238

Thermal Conductivity in W/(mK): .3901

.1457

Prandtl number:

1.832

2.872

Surface tension in N/m: .003034

.003034

Do you want another go?(y/n) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 200

Please enter desired temperature in C: 200

Pressure in bars: 200.000

Temperature in C: 200.000

Exact saturation temperature for this pressure: 364.155

	LIQUID	VAPOR
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0010275	.0000000
Internal Energy in kJ/kg:	811.7	.0
Specific Enthalpy in kJ/kg:	832.3	.0
Specific Entropy in kJ/(kgK):	2.2238	.0000
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	4.2234	.0000
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	3.2132	.0000
Viscosity in kg/(ms):	.0001575	.0000000
Thermal Conductivity in W/(mK):	.6053	.0000
Prandtl number:	1.099	.000
Surface tension in N/m:	.000000	.000000

Do you want another go?(y/n) n

HEAVY W.A.S.P. (R)  
 HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Substance; an  
 interactive approach)  
 Version 3 - DECEMBER 1999  
 Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
 as input only pressure and temperature.  
 (range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)  
 To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).  
 Please enter desired pressure in bars: 210  
 Please enter desired temperature in C: 10

Pressure in bars: 210.000  
 Temperature in C: 10.000

Exact saturation temperature for this pressure: 368.185

LIQUID	VAPOR
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0008950
Internal Energy in kJ/kg:	26.2
Specific Enthalpy in kJ/kg:	45.0
Specific Entropy in kJ/(kgK):	.0933
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	4.1484
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	4.1477
Viscosity in kg/(ms):	.0016453
Thermal Conductivity in W/(mK):	.5863
Prandtl number:	11.641
Surface tension in N/m:	.000000

Do you want another go? (Y/N) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 220

Please enter desired temperature in C: 0

Calculations near the critical point may not be accurate!

Pressure in bars: 216.000

Temperature in C: 370.511

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0024584

.003135

Internal Energy in kJ/kg: 1850.1

1953.6

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1903.2

2021.3

Specific Entropy in kJ/(kgK): 4.0847

4.2682

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 120.8765

2514.0495

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.6440

3.8839

Viscosity in kg/(ms): .0000435

.0000354

Thermal Conductivity in W/(mK): .5934

.5688

Prandtl number:

52.834

52.834

Surface tension in N/m: .000065

.000065

Do you want another go? (y/n): n



HEAVY W.A.S.P. (R)  
 HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)  
 Version 3 - DECEMBER 1999  
 Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
 as input only pressure and temperature.  
 (range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)  
 To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 300  
 Please enter desired temperature in C: 300

Pressure in bars: 300.000  
 Temperature in C: 300.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.0012060	.0000000
Internal Energy in kJ/kg:	1243.1	.0
Specific Enthalpy in kJ/kg:	1279.3	.0
Specific Entropy in kJ/(kgK):	3.0581	.0000
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	4.8327	.0000
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	2.9228	.0000
Viscosity in kg/(ms):	.0001023	.0000000
Thermal Conductivity in W/(mK):	.5047	.0000
Prandtl number:	.980	.000
Surface tension in N/m:	.000000	.000000

Do you want another go?(Y/N) :

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either  
 pressure or temperature to zero (for the  
 desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 400  
 Please enter desired temperature in C: 400

Pressure in bars: 400.000

Temperature in C: 400.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

LIQUID	VAPOR
Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.00000000
Internal Energy in kJ/kg:	.0
Specific Enthalpy in kJ/kg:	.0
Specific Entropy in kJ/(kgK):	.0000
constant pressure in kJ/(kgK):	.0000
Specific Heat at	
constant pressure in kJ/(kgK):	8.2905
Specific Heat at	
constant volume in kJ/(kgK):	.0000
Viscosity in kg/(ms):	.00000000
Thermal Conductivity in W/(mK):	.0000
Prandtl number:	.000
Surface tension in N/m:	.0000000

Do you want another go?(Y/N) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Heavy Water Substance; an  
 interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 500  
 Please enter desired temperature in C: 500

Pressure in bars: 500.000

Temperature in C: 500.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

LIQUID VAPOR

Specific Volume in m <sup>3</sup> /kg:	.00000000	.003544
Internal Energy in kJ/kg:	.0	2399.3
Specific Enthalpy in kJ/kg:	.0	2576.5
Specific Entropy in kJ/(kgK):	.0000	4.9239
Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK):	.0000	6.4738
Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK):	.0000	2.4635
Viscosity in kg/(ms):	.00000000	.0000420
Thermal Conductivity in W/(mK):	.0000	.1904
Prandtl number:	.000	1.428
Surface tension in N/m:	.000000	.000000

Do you want another go? (y/n) n

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Heavy Water Substance; an  
interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts  
as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either  
pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 800  
Please enter desired temperature in C: 10

Pressure in bars: 800.000

Temperature in C: 10.000

There is no saturation state for this pressure and temperature

VAPOR LIQUID

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0008722

Internal Energy in kJ/kg: 25.6

Specific Enthalpy in kJ/kg: 95.4

Specific Entropy in kJ/(kgK): .0873

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 3.9886

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 3.9673

Viscosity in kg/(ms): .0015930

Thermal Conductivity in W/(mK): .6170

Prandtl number: 10.297

Surface tension in N/m: .000000

Do you want another go?(y/n): n

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

HEAVY W.A.S.P. (R)

HEAVY WATER AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Heavy Water Substance; an  
interactive approach)

Version 3 - DECEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 0.006601-1000 bar, 3.8-600 C)

To obtain a saturation state, equal either

pressure or temperature to zero (for the

desired temperature or pressure, respectively).

Please enter desired pressure in bars: 1200  
Please enter desired temperature in C: 10

Desired pressure out of range!

## II.4 Λεπτομερής παρουσίαση του κώδικα.

Παρουσιάζονται στη συνέχεια όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εξέταση των υπορουτινών HEAVY\_WASP, CHECKRPT, QMUST και TOTAL, οι οποίες είναι τα μεγαλύτερα υποπρογράμματα. Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα (υπορουτίνες -subroutines και συναρτήσεις -functions) παρουσιάζονται συνοπτικότερα. Το σύνολο των υποπρογραμμάτων παρουσιάζεται κατά το δυνατόν με τη σειρά που χρησιμοποιούνται στον κώδικα. Οι κυριότερες συνιστώσες της παρουσίασης κάθε υποπρογράμματος είναι:

- α. Μεταβλητές εισόδου
  - β. Μεταβλητές εξόδου
  - γ. Τοπικές μεταβλητές
  - δ. Μορφολογικά χαρακτηριστικά υποπρογράμματος (εξαρτημένο, ανεξάρτητο ή άλλο, προαιρετικό ή απαραίτητο)
  - ε. Υποπρογράμματα που καλούν το παρουσιαζόμενο υποπρόγραμμα και
- στ. Υποπρογράμματα που καλεί το παρουσιαζόμενο υποπρόγραμμα

Σημειώνεται ότι δεν είναι σκόπιμη -και ως εκ τούτου δε γίνεται- η εξέταση του υποδείγματος κυρίως προγράμματος εφαρμογής EXAMPLE (FORTRAN main program). Ο χρήστης του κώδικα που θα θελήσει να περαματισθεί με αυτό μπορεί πολύ εύκολα να το χρησιμοποιήσει, έχοντας βέβαια πάντοτε υπόψη τις οδηγίες που δίνονται στο Κεφάλαιο 5, σχετικά με τη σύνδεση ενός κυρίου προγράμματος με τον κώδικα HEAVY\_WASP. Επιπλέον δεν παρουσιάζεται το blockdata CONSTANTS. Απλά κατά την εξέταση κάθε υποπρογράμματος, αν τύχει να υπάρξει μεταβλητή εισόδου (σταθερή), η οποία να προέρχεται από το εν λόγω blockdata αυτό σημειώνεται με κατάλληλο τρόπο. Υπενθυμίζεται ότι το blockdata CONSTANTS επικοινωνεί με τον υπόλοιπο κώδικα με τη βοήθεια COMMON εντολών.

Επισημαίνεται πάντως ότι για τη σύνδεση ενός κυρίου προγράμματος όπως το EXAMPLE, με τον κώδικα HEAVY\_WASP -όταν ο κώδικας εργάζεται κάτω από λειτουργικό σύστημα UNIX, πρέπει να χρησιμοποιείται ένα αρχείο κατασκευής εκτελέσιμου προγράμματος εφαρμογής, το ονομαζόμενο **makefile**. Το makefile αυτό αναλαμβάνει σε γενικές γραμμές τη σύνδεση (**linking**) των επιτυχώς μεταφρασμένων

υποπρογραμμάτων του κώδικα HEAVY\_WASP (των **object files**) μεταξύ τους καθώς και με τις εσωτερικές συναρτήσεις της γλώσσας FORTRAN ή ακόμα -αν είναι επιθυμητό- με το object file που περιέχει το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη σε ένα εννιαίο εκτελέσιμο πρόγραμμα εφαρμογής (executable application program). Υπόδειγμα τέτοιου makefile περιλαμβάνεται στο αρχείο **makefile1**<sup>1</sup>. Στο υπόδειγμα αυτό το εκτελέσιμο πρόγραμμα φέρει τη συμβολική ονομασία "ert", η οποία φυσικά μπορεί να αλλάξει σύμφωνα με τις κατά καιρούς απαιτήσεις του χρήστη. Δεύτερο υπόδειγμα τέτοιου makefile περιλαμβάνεται στο αρχείο **makefile2**<sup>2</sup>. Η ιδιαιτερότητα διαφορά αυτού του makefile από το προαναφερθέν makefile1 εντοπίζεται στο ότι το makefile2 διεκπεραιώνει πρώτα τη μετάφραση (**compilation**) των **source files**, στα οποία εμπριέχονται τα υποπρογράμματα του κώδικα σε γλώσσα FORTRAN. Στη συνέχεια προχωράει στο linking των δημιουργούμενων **object files** και συγκροτεί τέλος το ζητούμενο εκτελέσιμο πρόγραμμα με το όνομα "ert". Φυσικά κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα, βασισμένος πάντα στα υποδείγματα makefile1-2, να δημιουργήσει εκείνα τα makefiles που τον εξυπηρετούν καλύτερα.

#### 11.4.1 Η υπορουτίνα HEAVY\_WASP.

**Μεταβλητές εισόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στη λίστα παραμέτρων

JS	(πρέπει να έχει πάντα την τιμή 1)
JP	(πρέπει να έχει πάντα ακέραια τιμή από 0 έως 63)
P	(πίεση σε bar μέσα στην περιοχή ισχύος του κώδικα ή 0)
T	(θερμοκρασία σε K μέσα στην περιοχή ισχύος του κώδικα ή 0)

στις COMMON εντολές

PC	(κρίσιμη πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K -από το blockdata CONSTANTS)
VC	(κρίσιμος ειδικός όγκος σε cm <sup>3</sup> /g -δεν χρησιμοποιείται)

---

<sup>1</sup> Βλέπε την επόμενη παράγραφο.

<sup>2</sup> Βλέπε την επόμενη παράγραφο.

PP (πίεση σε bar)  
TT (θερμοκρασία σε K)  
PSEUDODC (ψευδοκρίσιμη πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)

στις λίστες παραμέτρων καλούμενων υποπρογραμμάτων

DF (πυκνότητα του υγρού σε g/cm<sup>3</sup>)  
DG (πυκνότητα του ατμού σε g/cm<sup>3</sup>)

**Μεταβλητές εξόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

σημεία παραμέτρων

P (πίεση σε bar, αν η P εισόδου ήταν 0 και υπάρχει κατάσταση κορεσμού)  
T (θερμοκρασία σε °C, αν η T εισόδου ήταν 0 και υπάρχει κατάσταση κορεσμού)  
TS (θερμοκρασία κορεσμού σε °C, αν υπάρχει κατάσταση κορεσμού)  
SVF (ειδικός όγκος του υγρού σε m<sup>3</sup>/kg)  
SVG (ειδικός όγκος του ατμού σε m<sup>3</sup>/kg)  
JR (υποπεριοχή του διαγράμματος PT, ακέραιες τιμές από 1 έως 6)  
IS (ακέραιες τιμές από 0 έως 2)

στις COMMON εντολές επικοινωνίας

PP (πίεση σε bar)  
PR (ανηγμένη πίεση)  
TT (θερμοκρασία σε K)  
TR (ανηγμένη θερμοκρασία)  
J (=JR, υποπεριοχή του PT)

στην COMMON/PROPERTY/



UF, PSIF, HF, SF, CPF, CVF, IBMF, JTCF, GAMMAF, AF, MUF, KF, PRANDTLF

στην COMMON/PROPERTY2/

UG, PSIG, HG, SG, CPG, CVG, IBMG, JTGG, GAMMAG, AG, MUG, KG,  
PRANDTLG

στην COMMON/PROPERTY3/

HFG, SIGMAFG, LACFG

Δεν υπάρχουν τοπικές μεταβλητές.

**Η HEAVY\_WASP καλείται από:**

Το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη.

**Η HEAVY\_WASP καλεί τα υποπρογράμματα του κώδικα:**

CHECKPT, DENSE, DENS, TOTAL

Η HEAVY\_WASP χαρακτηρίζεται ως μετρίως εξαρτημένο υποπρόγραμμα.

Η HEAVY\_WASP είναι απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.

(βλέπε το αρχείο **heavy\_wasp.f**)

#### **II.4.2 Η υπορουτίνα CHECKPT.**

**Μεταβλητές εισόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στης COMMON εντολές "/Z1/" -από το blockdata CONSTANTS

PMIN (ελάχιστη πίεση σε bar για την οποία ισχύει ο κώδικας)

P <sub>MAX</sub>	(μέγιστη πίεση σε bar για την οποία ισχύει ο κώδικας)
T <sub>MIN</sub>	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
T <sub>MAX</sub>	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
P <sub>C</sub>	(κρίσιμη πίεση σε bar)
T <sub>C</sub>	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
V <sub>C</sub>	(κρίσιμος ειδικός όγκος σε cm <sup>3</sup> /g -δεν χρησιμοποιείται)
T <sub>RT</sub>	(ανηγμένη θερμοκρασία στο κρίσιμο σημείο)

TR1, TR2, TR3, PR1, PR2

(όρια για τις θερμοκρασίες και τις πιέσεις που καθορίζουν τις υποπεριοχές -από το blockdata CONSTANTS)

στις COMMON εντολές "/Kj/"

PP	(πίεση σε bar)
TT	(θερμοκρασία σε K)

στις λίστες παραμέτρων καλούμενων υποπρογραμμαμάτων

IER (δείκτης λάθους που συνέβη στην υπορουτίνα SOLVE)

**Μεταβλητές εξόδου** (κατά σειρά εμφάνισέως)

στη λίστα παραμέτρων

TS	(θερμοκρασία κορεσμού σε K, αν υπάρχει κατάσταση κορεσμού)
JR	(υποπεριοχή του διαγράμματος PT, JR = 1 έως 6)
IS	(δείκτης του πόσο κοντά είναι η είσοδος σε μία κατάσταση κορεσμού IS = 0 υπερκρίσιμη πίεση και θερμοκρασία εισόδου IS = 1 υποκρίσιμη πίεση και θερμοκρασία εισόδου IS = 2 η κατάσταση κορεσμού απέχει μόλις 1 K)

στις COMMON εντολές επικοινωνίας

PP (πίεση σε bar)  
PR (ανηγμένη πίεση)  
TT (θερμοκρασία σε K)  
TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

### Τοπικές Μεταβλητές

EPS, NDEC, ITMAX  
(χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

### Η CHECKPT καλείται από:

Την υπορουτίνα HEAVY\_WASP

### Η CHECKPT καλεί τα υποπρογράμματα του κώδικα:

FPS, FTS, DFPS, SOLVE και PRL

Η CHECKPT χαρακτηρίζεται ως μετρίως εξηρημένο υποπρόγραμμα.

Η CHECKPT είναι απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.

(βλέπε το αρχείο **checkpt.f**)

### II.4.3 Η υπορουτίνα QMUST.

Μεταβλητές εισόδου (κατά σειρά εμφανίσεως)

στις COMMON εντολές

R (σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)  
TT (θερμοκρασία σε K)  
DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)

Μεταβλητές εξόδου (κατά σειρά εμφανίσεως)

στις COMMON εντολές επικοινωνίας

Q, QDT, Q2D2T, QTD, Q2T2D, Q2DT, PSI0, PSI0T, PSI02T2

[πρόκειται για ποσότητες που δίνονται από την εξίσωση (3-4) και τις εξισώσεις (4-7) έως και (4-17)]

### Τοπικές Μεταβλητές

A (πίνακας σταθερών  $A_{ij}$  για τις εξισώσεις)

C (πίνακας σταθερών  $C_i$  για τις εξισώσεις)

TAJ1, TAJ2, E, RAJ1, RAJ2

(άλλες σταθερές των εξισώσεων -βλέπε και Keyes F.G. et al., 1968)

I, J (δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)

SUMIm (m-οστό άθροισμα **SUM** ως προς το δείκτη **I**, m = 1 έως 9)

SUMJn (n-οστό άθροισμα **SUM** ως προς το δείκτη **J**, n = 1 έως 6)

Αναλυτικότερα έχουμε:

$$\mathbf{SUMI1} = \sum_{i=1}^8 \mathbf{A}_{i1}(\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \exp(-E\rho) (\mathbf{A}_{9,1} + \mathbf{A}_{10,1}\rho) \quad (\text{II-1})$$

$$\mathbf{SUMI2} = \sum_{i=1}^8 \mathbf{A}_{ij}(\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \exp(-E\rho) (\mathbf{A}_{9j} + \mathbf{A}_{10j}\rho) \quad (\text{II-2})$$

$$\mathbf{SUMI3} = \sum_{i=2}^8 (i-1)\mathbf{A}_{i1}(\rho - \rho_{aj})^{i-2} + \exp(-E\rho) [-E(\mathbf{A}_{9,1} + \mathbf{A}_{10,1}\rho) + \mathbf{A}_{10,1}] \quad (\text{II-3})$$

$$\text{SUMI4} = \sum_{i=2}^8 (i-1)A_{ij}(\rho - \rho_{aj})^{i-2} + \exp(-E\rho) \left[ -E(A_{9j} + A_{10j}\rho) + A_{10j} \right] \quad (\text{II-4})$$

$$\text{SUMI5} = \sum_{i=3}^8 (i-1)(i-2)(\rho - \rho_{aj})^{i-3} + \exp(-E\rho) \left\{ -E \left[ -EA_{9j} + A_{10j}(2 - E\rho) \right] \right\} \quad (\text{II-5})$$

$$\text{SUMI6} = \sum_{i=3}^8 A_{ij}(i-1)(i-2)(\rho - \rho_{aj})^{i-3} + \exp(-E\rho) \left\{ -E \left[ -EA_{9j} + A_{10j}(2 - E\rho) \right] \right\} \quad (\text{II-6})$$

$$\text{SUMI7} = \sum_{i=1}^6 C_i(T/1000)^{i-1} \quad (\text{II-7})$$

$$\text{SUMI8} = \sum_{i=2}^6 C_i(i-1)(T/1000)^{i-2} \quad (\text{II-8})$$

$$\text{SUMI9} = \sum_{i=2}^6 C_i(i-1)(i-2)(T/1000)^{i-3} \quad (\text{II-9})$$

Ακόμα:

$$\text{SUMJ1} = \sum_{j=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \times \text{SUMI2} \quad (\text{II-10})$$

$$\text{SUMJ2} = \sum_{j=3}^7 (j-2)(\tau - \tau_{aj})^{j-3} \times \text{SUMI2} \quad (\text{II-11})$$

$$\text{SUMJ3} = \sum_{j=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \times \text{SUMI4} \quad (\text{II-12})$$

$$\text{SUMJ4} = \sum_{j=3}^7 (j - 2)(\tau - \tau_{aj})^{j-3} \times \text{SUMI4} \quad (\text{II-13})$$

$$\text{SUMJ5} = \sum_{j=2}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \times \text{SUMI6} \quad (\text{II-14})$$

$$\text{SUMJ6} = \sum_{j=3}^7 (j - 2)(j - 3)(\tau - \tau_{aj})^{j-4} * \text{SUMI2} \quad (\text{II-15})$$

**H QMUST καλείται από:**

Τα υποπρογράμματα function FP και function DFP

**H QMUST δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα.**

**H QMUST χαρακτηρίζεται ως πλήρως εξηρημένο υποπρόγραμμα.**

**H QMUST είναι απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.**

(βλέπε το αρχείο **qmust.f**)

#### **II.4.4 Η υπορουτίνα TOTAL.**

**Μεταβλητές εισόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στη λίστα παραμέτρων

JP (διακόπτης που καθορίζει ποιές από τις θερμοφυσικές ιδιότητες θα υπολογισθούν, JP = 1 έως 63)

U, PSI, H, S, CP, CV, IBM, JTC, GAMMA.A, MU, K, PRANDTL, SIGMA

(στην είσοδο όλες οι παραπάνω μεταβλητές έχουν μηδενική τιμή)

### στις COMMON εντολές

J (υποπεριοχή του διαγράμματος PT, J = 1 έως 6)

JPC1, JPC2, JPC3, JPC4

(πίνακες από το blockdata CONSTANTS που περιέχουν σταθερές, οι οποίες διευκολύνουν τους χειρισμούς που πρέπει να γίνουν από την TOTAL για να ικανοποιηθεί το αίτημα του χρήστη που υποβλήθηκε με τον διακόπτη JP)

**Μεταβλητές εξόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

### στη λίστα παραμέτρων

U, PSI, H, S, CP, CV, IBM, JTC, GAMMA, A, MU, K, PRANDTL, SIGMA

**Τοπικές Μεταβλητές**

I (δείκτης για επαναληπτικές διαδικασίες)

**H TOTAL καλείται από:**

Την υπορουτίνα HEAVY\_WASP

**H TOTAL καλεί τα υποπρογράμματα του κώδικα:**

ENERGY, ENTHALPY, ENTROPY, SHP, SHV, SHR\_SOVE, IBM\_JTC,  
VISCOSITY, CONDUCTIVE, TENSION

(Το πόσα από αυτά τα υποπρογράμματα θα κληθούν ή όχι εξαρτάται από την τιμή του δείκτη JP).

H TOTAL χαρακτηρίζεται ως **μετρίως εξηρητημένο υποπρόγραμμα**.

H TOTAL είναι **προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα**.

(βλέπε το αρχείο **total.f** )

#### **II.4.5 Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα.**

##### **II.4.5.1 Η function FTS.**

[στο αρχείο **fts.f** -υλοποίηση της εξίσωσης (5-2), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

PP (πίεση σε bar)  
A [πίνακας σταθερών της εξίσωσης (5-2)]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η function καλείται από την υπορουτίνα CHECKPT και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

##### **II.4.5.2 Η function FPS.**

[στο αρχείο **fps.f** -υλοποίηση της εξίσωσης (3-43), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TS (θερμοκρασία κορεσμού σε K)  
PC (κρίσιμη πίεση σε bar -από το **blockdata CONSTANTS**)  
TC (κρίσιμη θερμοκρασία σε K -από το **blockdata CONSTANTS**)



VC (κρίσιμος ειδικός όγκος -δεν χρησιμοποιείται)

A1, A2, A4, A11, A20

[σταθερές για την εξίσωση (3-43) από το blockdata CONSTANTS]

PP (πίεση σε bar)

PR (ανηγμένη πίεση -δεν χρησιμοποιείται)

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: PPC (κρίσιμη πίεση σε MPa), PPP (πίεση σε MPa), TAUS (ειδική μορφή της ανηγμένης θερμοκρασίας κορεσμού)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα CHECKPT- και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα.)

#### II.4.5.3 Η function DFPS.

[στο αρχείο dfps.f -υλοποίηση της εξίσωσης (5-1), (μετρώς εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

Μεταβλητές εισόδου:

TS (θερμοκρασία κορεσμού σε K)

PC (κρίσιμη πίεση σε bar -από το blockdata CONSTANTS)

TC (κρίσιμη θερμοκρασία σε K -από το blockdata CONSTANTS)

VC (κρίσιμος ειδικός όγκος -δεν χρησιμοποιείται)

A1, A2, A4, A11, A20

[σταθερές για την εξίσωση (5-1) από το blockdata CONSTANTS]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: TAUS (ειδική μορφή της ανηγμένης θερμοκρασίας κορεσμού), FPSS [πίεση κορεσμού σε MPa -σχέση (3-43)]

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα CHECKPT- και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **11.4.5.4 Η υπορουτίνα DENSF.**

[στο αρχείο densf.f (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: DL (πυκνότητα του ελαφρού ύδατος σε g/cm<sup>3</sup> από την υπορουτίνα SVLWL), IER (δείκτης λάθους που μπορεί να συμβεί στην υπορουτίνα SOLVE)

Μεταβλητές εξόδου: DF, DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)

Τοπικές μεταβλητές: EPS, NDEC, ITMAX (χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

(η υπορουτίνα καλείται από την HEAVY\_WASP και καλεί τα υποπρόγραμμα SVLWL, FP, DFPD και SOLVE)

#### **11.4.5.5 Η υπορουτίνα DENSF.**

[στο αρχείο densf.f (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: DV (πυκνότητα του ελαφρού ύδατος σε g/cm<sup>3</sup> από την υπορουτίνα SVLWV), IER (δείκτης λάθους που μπορεί να συμβεί στην υπορουτίνα SOLVE)

Μεταβλητές εξόδου: DG, DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)

Τοπικές μεταβλητές: EPS, NDEC, ITMAX (χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

(η υπορουτίνα καλείται από την HEAVY\_WASP και καλεί τα υποπρογράμματα SVLWV, FP, DFPD και SOLVE)

#### II.4.5.6 Η υπορουτίνα SVLWL.

[στο αρχείο svlwl.f -υλοποίηση των εξισώσεων (4-18) και (4-26), (μετρίως εξηγημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

PC, VC (κρίσιμη πίεση και κρίσιμος ειδικός όγκος -από το blockdata  
CONSTANTS)  
TC (κρίσιμη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)  
R (σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)  
PP (πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)  
PR (ανηγμένη πίεση)  
TT (θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)  
TR (ανηγμένη θερμοκρασία)  
J (=JR, υποπεριοχή)  
IER (δείκτης λάθους που συνέβη στην υπορουτίνα SOLVE)

Μεταβλητές εξόδου: PR (ανηγμένη πίεση), DL (αρχική προσέγγιση για την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος σε g/cm<sup>3</sup>)

Τοπικές μεταβλητές:

AM [πίνακας σταθερών  $a_i$ ,  $i = 1$  έως 12 -εξίσωση (4-18)]  
A [πίνακας σταθερών  $A_i$ ,  $i = 11$  έως 22 -εξίσωση (4-18)]

EPS, NDEC, ITMAX

(χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

Y	[ποσότητα που δίνεται από την εξίσωση (4-20)]
Z	[ποσότητα που δίνεται από την εξίσωση (4-19)]
X1	[ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 1 και 6 -εξίσωση (4-18)]
X4	[ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 4 και 5 -εξίσωση 4-26)]
VL	(ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος σε cm <sup>3</sup> /g)

(η υπορουτίνα καλείται από την DENSF και καλεί την function PRS καθώς και την υπορουτίνα SOLVE)

#### II.4.5.7 Η υπορουτίνα SVLWV.

[στο αρχείο svlwn.f -υλοποίηση των εξισώσεων (4-21) και (4-25), (μετρίως εξηρημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

#### Μεταβλητές εισόδου:

PC, VC	(κρίσιμη πίεση και κρίσιμος ειδικός όγκος -από το blockdata CONSTANTS)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
R	(σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
PP	(πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)
PR	(ανηγμένη πίεση)
TT	(θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία)
J	(=JR, υποπεριοχή)
IER	(δείκτης λάθους που συνέβη στην υπορουτίνα SOLVE)

Μεταβλητές εξόδου: PR (ανηγμένη πίεση), DV (αρχική προσέγγιση για την πυκνότητα του ελαφρού ύδατος σε g/cm<sup>3</sup>)

#### Τοπικές μεταβλητές:

B0, B90 [σταθερές για την εξίσωση (4-21)]  
 B [πίνακας σταθερών  $B_{ij}$ ,  $i = 1$  έως 9,  $j = 1$  έως 6 -εξίσωση (4-21)]  
 NM [πίνακας σταθερών  $n(\mu)$ ]  
 ZM [πίνακας σταθερών  $z(\mu, \nu)$ ]  
 LM [πίνακας σταθερών  $l(\mu)$ ]  
 XM [πίνακας σταθερών  $x(\mu, \lambda)$ ]

EPS, NDEC, ITMAX

(χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

I1 [παράμετρος της εξίσωσης (4-21)-σχέση (4-22)]

X [παράμετρος της εξίσωσης (4-21) -σχέση (4-23)]

VSM1, VSM2, VSN, VSN1, VSN2, VSL

(μερικά αθροίσματα ως προς  $\mu$ ,  $\nu$  και  $\lambda$ )

X2 [ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 2 και 6 -εξίσωση (4-21)]

X3 [ανηγμένος ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 3 και 5 -εξίσωση (4-25)]

VV (ειδικός όγκος του ελαφρού ύδατος σε  $\text{cm}^3/\text{g}$ )

(η υπορουτίνα καλείται από την DENSG και καλεί τις function FPS και PRL καθώς και την υπορουτίνα SOLVE )

#### II.4.5.8 H function PRL.

[στο αρχείο prl.f -ολοποίηση της εξίσωσης (4-24) (μετρίως εξηγημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

TRT	(ανηγμένη θερμοκρασία τριπλού σημείου -δεν χρησιμοποιείται)
TR1, TR2	[ανηγμένες θερμοκρασίες από το blockdata CONSTANTS -σταθερές για την εξίσωση (4-24)]
TR3	(μέγιστη ανηγμένη θερμοκρασία για την οποία ισχύει η τυποποίηση IFC-1967 -δεν χρησιμοποιείται)
PR1, PR2	[ανηγμένες πιέσεις από το blockdata CONSTANTS -σταθερές για την εξίσωση (4-24)]

#### Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

#### Τοπικές μεταβλητές: L [σταθερή για την εξίσωση (4-24)]

(η function καλείται από τις υπορουτίνες CHECKPT, SVLWL και SVLWV και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **II.4.5.9 H function FPR3.**

[στο αρχείο fpr3.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-25), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

#### Μεταβλητές εισόδου:

X3

[κακή προσέγγιση του ανηγμένου ειδικού όγκου του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 3 και 5 με βάση την εξίσωση (4-21). Χρησιμοποιείται για την εύρεση καλύτερης προσέγγισης από την εξίσωση (4-25). Η καλύτερη αυτή προσέγγιση του ανηγμένου ειδικού όγκου είναι απαραίτητη για τη λύση της εξίσωσης (3-7)<sup>3</sup> ως προς την ακριβή τιμή της πυκνότητας για τις υποπεριοχές 3 και 5 αν είναι βεβαίως

---

<sup>3</sup> Κατ' αναλογία με όσα αναφέρονται στην § 3.3.2, στην § 3.3.3 και στην § 3.4.3 και δεδομένης της κοινής μαθηματικής μορφής των καταστατικών εξισώσεων του ελαφρού και του βαρέος ύδατος, είναι φανερό ότι η σχέση (3-3) και οι σχέσεις (3-6) έως και (3-23) που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ελαφρού ύδατος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του βαρέος ύδατος αντίστοιχα.

δεδομένες η πίεση και η θερμοκρασία (βλέπε και τις υπορουτίνες DENSQ, SVLWV και SOLVE)].

C(64) [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (4-25) από το blockdata  
CONSTANTS -δεν χρησιμοποιούνται όλες]

C010, C011, C012, C310

[άλλες σταθερές για την εξίσωση (4-25) από το blockdata CONSTANTS]

PP (πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)

PR (ανηγμένη πίεση)

TT (θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές:

XSC0N, XSC1N, XSC2N, XSC3N, XSC4N, XSC6N

[δηλαδή γενικά μεταβλητές της μορφής XSC<sub>i,n</sub> με  $i = 0, 1, 2, 3, 4$  και  $n$  από 0 έως και 9, οι οποίες συμβολίζουν απαραίτητα μερικά αθροίσματα ( $S \equiv \text{SUM}$ ) της εξίσωσης (4-25) για τον υπολογισμό του ανηγμένου ειδικού όγκου  $\mathbf{X}$ , που σχηματίζονται κυρίως χρησιμοποιώντας τις σταθερές  $\mathbf{C}(\mathbf{in})$ , όπου  $i$  είναι δεκάδες και  $n$  είναι μονάδες]

N (δείκτης για επαναληπτικές διαδικασίες)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα SVLWV- καθώς και από την function FPR4 και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα )

#### **II.4.5.10 Η function DFPR3.**

[στο αρχείο dfpr3.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-29), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

X3 (βλέπε σχετικά στην περιγραφή της function FPR3)  
C(64) [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (4-29) από το blockdata  
CONSTANTS -δεν χρησιμοποιούνται όλες]

C010, C011, C012, C310

[άλλες σταθερές για την εξίσωση (4-29) από το blockdata CONSTANTS]

TT (θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές:

DXSC0N, DXSC1N, DXSC2N, DXSC3N, DXSC4N, DXSC6N

[δηλαδή γενικά μεταβλητές της μορφής DXSC<sub>i,n</sub> με  $i = 0, 1, 2, 3, 4$  και  $n$  από 0 έως και 9, οι οποίες συμβολίζουν απαραίτητα μερικά αθροίσματα ( $S \equiv \text{SUM}$ ) της εξίσωσης (4-29) για τον υπολογισμό της παραγώγου ( $D \equiv \text{Derivative}$ ) της σχέσεως (4-25) ως προς τον ανηγμένο ειδικό όγκο  $X$ , που σχηματίζονται κυρίως χρησιμοποιώντας τις σταθερές  $C(\mathbf{in})$ , όπου  $i$  είναι δεκάδες και  $n$  είναι μονάδες]

N (δείκτης για επαναληπτικές διαδικασίες)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα SVLWV- καθώς και από την function DFPR4 και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### II.4.5.11 H function FPR4.

[στο αρχείο fpr4.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-26), (μετρώς εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]



Μεταβλητές εισόδου:

X4

[κακή προσέγγιση του ανηγμένου ειδικού όγκου του ελαφρού ύδατος στις υποπεριοχές 4 και 5 με βάση την εξίσωση (4-18). Χρησιμοποιείται για την εύρεση καλύτερης προσέγγισης από την εξίσωση (4-26). Η καλύτερη αυτή προσέγγιση του ανηγμένου ειδικού όγκου είναι απαραίτητη για τη λύση της εξίσωσης (3-7) ως προς την ακριβή τιμή της πυκνότητας για τις υποπεριοχές 4 και 5 αν είναι βεβαίως δεδομένες η πίεση και η θερμοκρασία (βλέπε και τις υπορουτίνες DENSF, SVLWL και SOLVE)].

TRT (ανηγμένη θερμοκρασία τριπλού σημείου -δεν χρησιμοποιείται)  
TR1 [ανηγμένη θερμοκρασία από το blockdata CONSTANTS -σταθερή για την εξίσωση (4-26)]  
TR2, TR3 (άλλες ανηγμένες θερμοκρασίες -δεν χρησιμοποιούνται)  
D(5,4) [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (4-26) από το blockdata CONSTANTS -δεν χρησιμοποιούνται όλες]

D30, D40, D50

[άλλες σταθερές για την εξίσωση (4-26) από το blockdata CONSTANTS]

TT (θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Γοπικές μεταβλητές:

Y [σχέση (4-27)]

XSDN1, XSDN2

[μερικά αθροίσματα απαραίτητα για τον προσδιορισμό του ανηγμένου ειδικού όγκου στις υποπεριοχές 4 και 5 με βάση την εξίσωση (4-26)]

## XSDMN

[μεταβλητή της μορφής XSDm,n με m = 3 ή 4 και n από 1 έως και 4. Είναι και αυτή απαραίτητο μερικό άθροισμα της εξίσωσης (4-27) για τον υπολογισμό του ανηγμένου ειδικού όγκου, το οποίο σχηματίζεται κυρίως χρησιμοποιώντας τις σταθερές D(m,n)]

M, N (δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα SVLWL και καλεί την function FPR3)

### II.4.5.12 Η function DFPR4.

[στο αρχείο dfpr4.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-30), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

#### Μεταβλητές εισόδου:

X4 (βλέπε σχετικά στην περιγραφή της function FPR4)  
TRT (ανηγμένη θερμοκρασία τριπλού σημείου -δεν χρησιμοποιείται)  
TR1 [ανηγμένη θερμοκρασία από το blockdata CONSTANTS -σταθερή για την εξίσωση (4-27)]  
TR2, TR3 (άλλες ανηγμένες θερμοκρασίες -δεν χρησιμοποιούνται)  
D(5,4) [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (4-30) από το blockdata CONSTANTS -δεν χρησιμοποιούνται όλες]

D30, D40, D50

[άλλες σταθερές για την εξίσωση (4-30) από το blockdata CONSTANTS]

TT (θερμοκρασία σε K -δεν χρησιμοποιείται)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

#### Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

#### Τοπικές μεταβλητές:

Y [σχέση (4-29)]

DXSDN1, DXSDN2

[μερικά αθροίσματα απαραίτητα για τον προσδιορισμό της παραγώγου της εξίσωσης (4-28) ως προς τον ανηγμένο ειδικό όγκο στις υποπεριοχές 4 και 5]

DXSDMN

[μεταβλητή της μορφής DXSDm,n με m = 3 ή 4 και n από 1 έως και 4. Είναι και αυτή απαραίτητο μερικό άθροισμα για τον υπολογισμό της παραγώγου της εξίσωσης (4-28) ως προς τον ανηγμένο ειδικό όγκο, το οποίο σχηματίζεται κυρίως χρησιμοποιώντας τις σταθερές D(m,n)]

M, N (δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα SVLWL, και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### II.4.5.13 Η function FP.

[στο αρχείο fp.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-7), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

DD	(πυκνότητα σε g/cm <sup>3</sup> )
R	(σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
PP	(πίεση σε bar)
PR	(ανηγμένη πίεση -δεν χρησιμοποιείται)
T	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8) -υπορουτίνα

QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: PPP (πίεση σε MPa)

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στις υπορουτίνες DENSF και DENSF- και καλεί την υπορουτίνα QMUST)

#### II.4.5.14 Η function DFPD.

[στο αρχείο dfrpd.f -υλοποίηση της εξίσωσης (4-1), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

Μεταβλητές εισόδου:

DD	(πυκνότητα σε g/cm <sup>3</sup> )
R	(σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS))
T	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-4) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4--8)
Q2D2T	-υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/] [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-10) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στις υπορουτίνες DENSF και DENSF- και καλεί την υπορουτίνα QMUST)

#### II.4.5.15 Η υπορουτίνα SOLVE.

[στο αρχείο solve.f -υλοποίηση της αριθμητικής μεθόδου Newton - Raphson (ανεξάρτητο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

##### Μεταβλητές εισόδου:

F	[συνάρτηση $F \equiv f(x) = 0$ , πεπλεγμένη ως προς x, για την οποία ζητείται ρίζα(-ες) x]
DF	[παράγωγος $df(x)/dx$ ]
EPS	[κριτήριο σύγκλισης, μία ρίζα x γίνεται αποδεκτή αν είναι $ f(x)  \leq EPS$ ]
NDEC	(κριτήριο σύγκλισης, μία ρίζα x γίνεται αποδεκτή αν δύο διαδοχικές προσεγγίσεις της συμφωνούν στα NDEC πρώτα δεκαδικά τους ψηφία)
X	(αρχική προσέγγιση της ζητούμενης ρίζας)
ITMAX	(μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων)

*(Σημείωση: Στις περισσότερες από τις περιπτώσεις υπολογισμών που έγιναν με τον κώδικα HEAVY\_WASP η ζητούμενη ρίζα x βρέθηκε σε λιγότερες από 40 επαναλήψεις. Εξαιρείται συνήθως η γειτονιά του κρίσιμου σημείου και ορισμένες περιοχές στην νηρή φάση. Όπως όμως και να έχει το πράγμα η υπορουτίνα SOLVE περιορίζει εσωτερικά τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό επαναλήψεων στις 100. Αν δηλαδή ο χρήστης έχει ζητήσει κατά την κλήση της υπορουτίνας να είναι ITMAX > 100, το αίτημά του αυτό αγνοείται. Συνήθεις τιμές για τις μεταβλητές εισόδου EPS, NDEC και ITMAX είναι οι  $10^{-5}$ , 5 και 100 αντίστοιχα.)*

##### Μεταβλητές εξόδου:

X	(ζητούμενη ρίζα x)
IER	(προειδοποιητική παράμετρος λάθους)

*(Σημείωση: Αν επιτευχθεί η εύρεση της ζητούμενης ρίζας  $x$  τότε επιστρέφεται  $IER = 0$ . Αν η ζητούμενη ρίζα  $x$  δεν είναι δυνατόν να βρεθεί επειδή η παράγωγος  $DF$  παίρνει κάποια στιγμιαία τιμή που είναι "πολύ κοντά" στο 0, τότε επιστρέφεται  $IER = 1$  και  $X = 11111$ . Αν η ζητούμενη ρίζα  $x$  δεν είναι δυνατόν να βρεθεί επειδή χρειάζονται για αυτό περισσότερες από  $ITMAX$  επαναλήψεις, τότε επιστρέφεται  $IER = 2$  και  $X = 22222$ . Αν η ζητούμενη ρίζα  $x$  δεν είναι δυνατόν να βρεθεί επειδή συμβαίνουν και τα δύο αυτά ατυχή γεγονότα, τότε επιστρέφεται  $IER = 3$  και  $X = 11111$  ή  $X = 22222$ .)*

#### Τοπικές μεταβλητές:

**K** (δείκτης για την επαναληπτική διαδικασία)  
**TOL** (κριτήριο σύγκλισης)

*(Σημείωση: Σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν  $|x_k - x_{k-1}| \leq TOL$ . Η τιμή της  $TOL$  είναι  $10^{-NDEC}$  για τις επαναλήψεις από 1 έως 40,  $10^{-(NDEC-1)}$  για τις επαναλήψεις από 41 έως 60,  $10^{-(NDEC-2)}$  για τις επαναλήψεις από 61 έως 80 και  $10^{-(NDEC-3)}$  για τις επαναλήψεις από 81 έως 100. Στις λίγες περιπτώσεις όπου οι επαναλήψεις ξεπερνούν τις 40 - γειτονιά του κρίσιμου σημείου κτλ- η ζητούμενη ρίζα  $x$  που τελικά υπολογίζεται με την αυξημένη ανοχή  $TOL$  είναι η καλύτερη που μπορεί να ληφθεί από τις κάθε φορά συναρτήσεις προς επίλυση.)*

Η υπορουτίνα **SOLVE** καλείται από τις υπορουτίνες **CHECKPT**, **DENSF**, **DENSQ**, **SVLWL**, **SVLWV** και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα. Αναλυτικότερα:

- καλείται από την υπορουτίνα **CHECKPT** με σκοπό την επίλυση της εξισώσεως κορεσμού [function **FPS** -σχέση (3-43)] ως προς τη θερμοκρασία κορεσμού αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού. Η προσέγγιση της λύσης δίνεται από την function **FTS** -σχέση (5-2)- ενώ η παράγωγος της συνάρτησης **FPS** υπολογίζεται στην function **DFPS** -σχέση (5-1).
- καλείται από την υπορουτίνα **DENSF** με σκοπό την επίλυση της εξισώσεως (3-3), function **FP**, ως προς την πυκνότητα για τις υποπεριοχές 1, 4, 5 και 6, αν τα δεδομένα είναι η πίεση και η θερμοκρασία. Η προσέγγιση της λύσης δίνεται από την υπορουτίνα **SVLWL** -σχέσεις (4-18) και (4-26)- ενώ η παράγωγος της

συνάρτησης FP ως προς την πυκνότητα υπολογίζεται στην function DFPD -σχέση (4-1).

- καλείται από την υπορουτίνα DENSG με σκοπό την επίλυση της εξίσωσης (3-3), function FP, ως προς την πυκνότητα για τις υποπεριοχές 1, 3, 5 και 6, αν τα δεδομένα είναι η πίεση και η θερμοκρασία. Η προσέγγιση της λύσης δίνεται από την υπορουτίνα SVLWV -σχέσεις (4-21) και (4-25)- ενώ η παράγωγος της συνάρτησης FP ως προς την πυκνότητα υπολογίζεται στην function DFPD -σχέση (4-1).
- καλείται από την υπορουτίνα SVLWL με σκοπό την επίλυση της εξίσωσης (4-26), function FPR4, ως προς την προσέγγιση της λύσης για την πυκνότητα στις υποπεριοχές 4 και 5, αν τα δεδομένα είναι η πίεση και η θερμοκρασία. Και εδώ χρειάζεται μία προσέγγιση για την προσέγγιση της λύσης, η οποία δίνεται από την εξίσωση (4-18) -αν αυτή υποτεθεί ότι ισχύει και για τις υποπεριοχές 4 και 5 (κανονικά ισχύει μόνο για τις υποπεριοχές 1 και 6). Η παράγωγος της συνάρτησης FPR4 ως προς την πυκνότητα υπολογίζεται στην function DFPR4 -σχέση (4-30).
- τέλος καλείται από την υπορουτίνα SVLWV με σκοπό την επίλυση της εξίσωσης (4-25), function FPR3, ως προς την προσέγγιση της λύσης για την πυκνότητα στις υποπεριοχές 3 και 5, αν τα δεδομένα είναι πίεση και η θερμοκρασία. Και εδώ χρειάζεται μία προσέγγιση για την προσέγγιση της λύσης, η οποία δίνεται είτε από την εξίσωση (4-21) -αν αυτή υποτεθεί ότι ισχύει και για τις υποπεριοχές 3 και 5 (κανονικά ισχύει μόνο για τις υποπεριοχές 2 και 6), είτε από την καταστατική εξίσωση τελείου αερίου. Η παράγωγος της συνάρτησης FPR3 ως προς την πυκνότητα υπολογίζεται στην function DFPR3 -σχέση (4-29).

#### II.4.5.16 Η υπορουτίνα ENERGY.

[στο αρχείο energy.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-40) και (3-9) (μετρίως εξηγημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

#### Μεταβλητές εισόδου:

R (σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)  
TT (θερμοκρασία σε K)

TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
DD	(πυκνότητα σε g/cm <sup>3</sup> )
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-41) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI0	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-42) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI0T	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-12) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: U (ειδική εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg), PSI (ειδική ελεύθερη εσωτερική ενέργεια σε kJ/kg)

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### II.4.5.17 Η υπορουτίνα ENTHALPY.

[στο αρχείο enthalpy.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-13), (μερίως εξηρημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
DD	(πυκνότητα σε g/cm <sup>3</sup> )
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-41) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7)



PSI0	-υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/ [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-42)]
PSI0T	-υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/ [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-12)]

Μεταβλητές εξόδου: H (ειδική ενθαλπία σε kJ/kg)

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### II.4.5.18 Η υπορουτίνα ENTROPY.

[στο αρχείο entropy.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-11), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του βερέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
DD	(πυκνότητα σε g/cm <sup>3</sup> )
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-41)]
QTD	-υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/ [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7)]
PSI0T	-υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/ [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-12)]
	-υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: S [ειδική εντροπία σε kJ/(kgK)]

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα.)

#### II.4.5.19 Η υπορουτίνα SHP.

[στο αρχείο shp.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-15), χρησιμοποιούνται επιπλέον και οι εξισώσεις (4-1) έως και (4-5), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

##### Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
T	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-41) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2D2T	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-10) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2T2D	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-11) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2DT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-9) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI02T2	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-17) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: CP [ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση σε kJ/(kgK)]

##### Τοπικές μεταβλητές:

HTD [παράγωγος  $(\partial h/\partial T)_p$  -σχέση (4-4)]

HDT [παράγωγος  $(\partial h/\partial p)_T$  -σχέση (4-5)]  
PTD [παράγωγος  $(\partial P/\partial T)_p$  -σχέση (4-3)]  
PDT [παράγωγος  $(\partial P/\partial p)_T$  -σχέση (4-1)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα.)

#### II.4.5.20 Η υπορουτίνα SHV.

[στο αρχείο shv.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-17), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

Μεταβλητές εισόδου:

R (σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)  
TT (θερμοκρασία σε K)  
TR (ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)  
DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)  
Q2T2D [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-11)  
-υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]  
PSI02T2 [ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-17)  
-υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: CV [ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο σε kJ/(kgK)]

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα.)

#### II.4.5.21 Η υπορουτίνα SHR\_SOVE.

[στο αρχείο shr\_rove.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-18) και (3-22), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του βάρους ύδατος -από το blockdata CONSTANTS) (θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-41) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2D2T	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-10) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QTD	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2T2D	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-11) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2DT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-9) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI02T2	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-17) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: GAMMA (λόγος των ειδικών θερμοχωρητικότητων -εκθέτης ισεντροπικής μεταβολής), A (ταχύτητα του ήχου σε m/sec)

Τοπικές μεταβλητές:

HTD	[παράγωγος $(\partial h/\partial T)_p$ -σχέση (4-4)]
HDT	[παράγωγος $(\partial h/\partial p)_T$ -σχέση (4-5)]
PTD	[παράγωγος $(\partial P/\partial T)_p$ -σχέση (4-3)]
PDT	[παράγωγος $(\partial P/\partial p)_T$ -σχέση (4-1)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### II.4.5.22 Η υπορουτίνα IBM\_JTC.

[στο αρχείο `ibm_jtc.f` -υλοποίηση των εξισώσεων (3-20) και (3-21), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

##### Μεταβλητές εισόδου:

R	(σταθερή του βαρέος ύδατος -από το blockdata CONSTANTS)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)
Q	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (3-41) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
QDT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-8) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2D2T	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-10) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q1D	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-7) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2T2D	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-11) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
Q2DT	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-9) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]
PSI02T2	[ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4-17) -υπορουτίνα QMUST, COMMON εντολή /QAUX/]

Μεταβλητές εξόδου: IBM (ισοθερμοκρασιακή συμπίεσιότητα σε  $\text{MPa}^{-1}$ ), JTC (συντελεστής Joule - Thomson σε  $\text{K/MPa}$ )

##### Τοπικές μεταβλητές:

HTD	[παράγωγος $(\partial h/\partial T)_p$ -σχέση (4-4)]
HDT	[παράγωγος $(\partial h/\partial p)_T$ -σχέση (4-5)]
PTD	[παράγωγος $(\partial P/\partial T)_p$ -σχέση (4-3)]
PDT	[παράγωγος $(\partial P/\partial p)_T$ -σχέση (4-1)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### II.4.5.23 Η υπορουτίνα VISCOSITY.

[στο αρχείο viscosity.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-50), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: PSEUDODC (ψευδοκρίσιμη πυκνότητα -από το blockdata CONSTANTS), TT (θερμοκρασία σε K), TR (ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται), DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)

Μεταβλητές εξόδου: MU [δυναμική συνεκτικότητα σε kg/(ms)]

Τοπικές μεταβλητές:

A (πίνακας με τις σταθερές A<sub>ij</sub>, i = 1 έως 6, j = 1 έως 7)  
B (πίνακας με τις σταθερές B<sub>k</sub>, k = 1 έως 4)  
HETA [παράγων της εξίσωσης (3-51)]  
PSEUDODR (ψευδοανηγμένη πυκνότητα)  
I,J,K (δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)  
N0 [υλοποίηση σχέσης (3-51)]  
N (=MU η δυναμική συνεκτικότητα)

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### II.4.5.24 Η υπορουτίνα CONDUCTIVE.

[στο αρχείο conductive.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-52), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: PSEUDODC (ψευδοκρίσιμη πυκνότητα), PSEUDOTC (ψευδοκρίσιμη θερμοκρασία -από το blockdata CONSTANTS), TT (θερμοκρασία σε

K), TR (ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται), DD (πυκνότητα σε g/cm<sup>3</sup>)  
PRTRDR και XTR (από την υπορουτίνα QMUST)

Μεταβλητές εξόδου: K [θερμική αγωγιμότητα σε W/(mK)]

Τοπικές μεταβλητές:

A (πίνακας με τις σταθερές A<sub>i</sub>, i = 1 έως 5)  
B (πίνακας με τις σταθερές B<sub>j</sub>, j = 1 έως 4)  
A0, B0, BE, CT1, CT2, CR1, CR2, CR3, PSEUDODR1, C1, C2, D1, LAMDA  
[άλλες σταθερές για την εξίσωση (3-52)]

PSEUDODR (ψευδοανηγμένη πυκνότητα)

I, J (δείκτες για επαναληπτικές διαδικασίες)

EL0 [μερικό άθροισμα για την εξίσωση (3-52) –σχέση (3-53)]

DELTA [ομοίως –σχέση (3-54)]

F1 [συνάρτηση που χρησιμοποιείται στην εξίσωση (3-52) –σχέση (3-57)]

F2 [ομοίως –σχέση (3-58)]

F3 [ομοίως –σχέση (3-59)]

F4 [ομοίως –σχέση (3-60)]

TAUR (μία ειδική μορφή της ανηγμένης θερμοκρασίας)

DELTAELC [μερικό άθροισμα για την εξίσωση (3-52) –σχέση (3-55)]

DELTAELL [μερικό άθροισμα για την εξίσωση (3-52) –σχέση (3-56)]

EL (=K, η θερμική αγωγιμότητα)

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### II.4.5.25 Η υπορουτίνα TENSION.

[στο αρχείο tension.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-61), (μετρώς εξηρημένο,  
πρωταρτικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: TT (θερμοκρασία σε K), TR (ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται), J (=JR, υλοπεριοχή)

Μεταβλητές εξόδου: SIGMA (επιφανειακή τάση σε N/m)

Τοπικές μεταβλητές:

SIGMA0	[σταθερή για την εξίσωση (3-61)]
M	(ομοίως)
B	(ομοίως)
TCSTR	(κρίσιμη θερμοκρασία του βαρέος ύδατος σύμφωνα με τους Staub J. et al., 1980)
TAUT	(ειδική μορφή της ανηγμένης θερμοκρασίας)

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

### ΤΑ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ SODIUM\_LISP

#### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

III.1	Τα κείμενα των υποπρογραμμάτων.....	1
III.1.1	Function CF.....	1
III.1.2	Υπορουτίνα CHECKPT.....	1
III.1.3	Υπορουτίνα CONDUCTIVEF.....	3
III.1.4	Blockdata CONSTANTS.....	3
III.1.5	Function DFPS.....	5
III.1.6	Function DFPS1000.....	5
III.1.7	Function DFRIDR.....	5
III.1.8	Υπορουτίνα ENTHALPYF.....	7
III.1.9	Υπορουτίνα ENTHALPYG.....	7
III.1.10	Υπορουτίνα ENTROPYF.....	8
III.1.11	Υπορουτίνα ENTROPYG.....	8
III.1.12	Κερίως Πρόγραμμα EXAMPLE.....	8
III.1.13	Function FDENSEF.....	10
III.1.14	Function FDENSG.....	11
III.1.15	Function FFPS.....	11
III.1.16	Function FPS.....	11
III.1.17	Function FTS.....	12
III.1.18	Υπορουτίνα INTEGRAL.....	12
III.1.19	Υπορουτίνα SHF.....	13
III.1.20	Υπορουτίνα SHG.....	13
III.1.21	Υπορουτίνα SIBMF.....	14
III.1.22	Υπορουτίνα SIBMG.....	15
III.1.23	Υπορουτίνα SODIUM_LISP.....	16
III.1.24	Υπορουτίνα SOLVE.....	18
III.1.25	Υπορουτίνα SOVEF.....	19

III.1.26 Υπορουτίνα TENSION.....	20
III.1.27 Υπορουτίνα TOTAL.....	20
III.1.28 Υπορουτίνα VISCOSITYF.....	22
III.2 Τα αρχεία κατασκευής εκτελέσιμου προγράμματος.....	22
III.2.1 makefile1.....	22
III.2.2 makefile2.....	22
III.3 Ενδεικτικά αποτελέσματα του κώδικα.....	25
III.4 Λεπτομερής παρουσίαση του κώδικα.....	39
III.4.1 Η υπορουτίνα SODIUM_LISP.....	40
III.4.2 Η υπορουτίνα CHECKPT.....	42
III.4.3 Η υπορουτίνα TOTAL.....	44
III.4.4 Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα.....	46
III.4.4.1 Η function FTS.....	46
III.4.4.2 Η function FPS.....	46
III.4.4.3 Η function FPS.....	47
III.4.4.4 Η function DFPS.....	48
III.4.4.5 Η function DFPS1000.....	48
III.4.4.6 Η function FDENSF.....	49
III.4.4.7 Η function FDENSG.....	49
III.4.4.8 Η υπορουτίνα SOLVE.....	50
III.4.4.9 Η υπορουτίνα ENTHALPYF.....	52
III.4.4.10 Η υπορουτίνα ENTHALPYG.....	52
III.4.4.11 Η υπορουτίνα ENTROPYF.....	53
III.4.4.12 Η υπορουτίνα ENTROPYG.....	54
III.4.4.13 Η υπορουτίνα SHF.....	54
III.4.4.14 Η υπορουτίνα SHV.....	55
III.4.4.15 Η υπορουτίνα SIBMF.....	57
III.4.4.16 Η function CF.....	58
III.4.4.17 Η υπορουτίνα SIBMG.....	58
III.4.4.18 Η υπορουτίνα SOVEF.....	59
III.4.4.19 Η υπορουτίνα VISCOSITYF.....	60
III.4.4.20 Η υπορουτίνα CONDUCTIVEF.....	60
III.4.4.21 Η υπορουτίνα TENSION.....	61



```

* /Z1/PMIN, PMAX
* /Z2/TMIN, TMAX
* /Z3/PC, TC, DC
* /K1/PP, PR
* /K2/TT, TR
EXTERNAL FFPS, DFPS, FPS
DATA ZERO/0.D+0/
DATA EPS, NDEC, ITMAX/1.D-10, 5, 100/

C
C CHECK PRESSURE FOR OUT OF RANGE
C
IF (((PP.LT.PMIN).OR.(PP.GT.PMAX)).AND.(PP.NE.ZERO)) THEN
PRINT *
PRINT *, 'Desired pressure out of range!'
PRINT *
STOP
END IF

C
C CHECK TEMPERATURE FOR OUT OF RANGE
C
IF (((TT.LT.TMIN).OR.(TT.GT.TMAX)).AND.(TT.NE.ZERO)) THEN
PRINT *
PRINT *, 'Desired temperature out of range!'
PRINT *
STOP
END IF

C
C IF ((PP.NE.ZERO).AND.(TT.NE.ZERO)) THEN
PRINT *
PRINT *, 'Set saturation temperature to zero!'
PRINT *
STOP
END IF

C
C IF PRESSURE AND TEMPERATURE ARE EQUAL TO 0 CHECK FOR CORRECT CALL
C OF SATURATION PROPERTIES
C
IF ((PP.EQ.ZERO).AND.(TT.EQ.ZERO)) THEN
PRINT *
PRINT *, 'Both pressure and temperature cannot be 0.!'
PRINT *
STOP
END IF

C
C IF PRESSURE OR TEMPERATURE IS EQUAL TO 0 CHECK FOR OUT OF
C SATURATION RANGE
C
IF (((PP.GT.PC).AND.(TT.EQ.ZERO)).OR.
+ ((TT.GT.TC).AND.(PP.EQ.ZERO))) THEN
PRINT *
PRINT *, 'Such a saturation state does not exist!'
PRINT *
STOP
END IF
IS=0
TS=ZERO
IF (TT.EQ.ZERO) TT=TT+273.15D+C
IF (PP.EQ.ZERO) THEN
PP=FPS*(TT)*10
TS=TT
IS=1
ELSE

```

```

C      IF ((PP.LE.PC).AND.(TT.LE.TC)) THEN
C      TS=FTS(PP)
C      IF (ABS(FFPS(TS)).GT.EPS)
C      CALL SOLVE(FFPS,DFPS,EPS,NDEC,TS,ITMAX,IER)
C      IS=1
C      IF (TT.EQ.273.15D+0) TT=TS
C      END IF
C      END IF
C      IF (ABS(TT-TS).LE.1.D+0) IS=2
C      REDUCED PRESSURE AND TEMPERATURE
C      PR=PP/PC
C      TR=TT/TC
C      DETERMINE THERMODYNAMIC SUB-REGION SPECIFICATION, JR
C      VALUES OTHER THAN JR=6 ARE RESERVED FOR FUTURE USE
C      JR=6
C      RETURN
C      END

```

### III.1.3 Υπορουτίνα CONDUCTIVEF.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/conductive.f)

```

C      SUBROUTINE CONDUCTIVEF(KF)
C      COMPUTE THERMAL CONDUCTIVITY OF LIQUID SODIUM IN W/(MK)
C      GIVEN TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING TO RELATION PROVIDED
C      BY COOK J.G AND FRITSCH G., 1985
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C      DOUBLE PRECISION KF,K(4)
C      COMMON /K2/TT,TR
C      DATA K/124.67D+0,-0.11381D+0,5.5226D-5,-1.1842D-8/
C      KF=K(1)+K(2)*TT+K(3)*TT**2+K(4)*TT**3
C      RETURN
C      END

```

### III.1.4 Blockdata CONSTANTS.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/constants.f)

```

C      BLOCKDATA CONSTANTS
C      BLOCKDATA SUBPROGRAM CONTAINING ALL CONSTANTS OF SODIUM_LISP
C      BEING USED AT LEAST TWICE. ALL OTHER ONCE USED CONSTANTS ARE
C      PART OF CORRESPONDING DATA COMMANDS IN INDIVIDUAL SUBPROGRAMS.
C      COMMUNICATE WITH REST OF PACKAGE USING ONLY Z LABELLED COMMON
C      COMMANDS
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C      DOUBLE PRECISION KAM
C      DIMENSION
C      * F(3),G(3),H(10),TP(8),JPC1(32),JPC2(32),JPC3(32),JPC4(32)
C      COMMON

```

```

* /Z1/PMIN, PMAX
* /Z2/TMIN, TMAX
* /Z3/PC, TC, DC
* /Z8/AA, BB, CC
* /Z9/BETA, KAM
* /Z10/TP
* /Z11/F
* /Z12/JPC1, JPC2, JPC3, JPC4
* /Z13/A1, B1, C1, D1, A2, B2, C2, D2
* /Z14/G
* /Z15/H
  DATA
C
C PRESSURE RANGE (BAR) OF EQUATIONS FOR THERMODYNAMIC AND
C TRANSPORT PROPERTIES OF SODIUM
* PMIN, PMAX/1.58017955D-10, 256.40E+0/,
C
C TEMPERATURE RANGE (K) OF EQUATIONS FOR THERMODYNAMIC AND
C TRANSPORT PROPERTIES OF SODIUM, TMIN=MELTING POINT
* TMIN, TMAX/371.D+0, 2503.7D+0/,
C
C CRITICAL PRESSURE(BAR), TEMPERATURE(K) AND DENSITY (KGM-3) OF SODIUM
* PC, TC, DC/256.4D+0, 2503.7D+0, 219.D+0/,
C
C SATURATION LINE
* AA, BB, CC/11.9463D+0, -12633.7D+0, -0.4672D+0/,
C
C ADIABATIC COMPRESSIBILITY
* BETA, KAM/3.2628D+0, 1.717D-4/,
C
C SATURATED LIQUID DENSITY
* F/275.32D+0, 511.58D+0, 0.5D+0/,
C
C THERMAL PRESSURE COEFFICIENT
* TP
  1 /8.35307D+0, -12905.6D+0, -0.45824D+0, 2.0949D-3, -5.0786D-7,
  2 4.6893D-2, -2.5696D-3, 3.5628D-5/
  DATA
* JPC1
  1 /2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 22, 23, 26, 27, 30, 31, 34,
  2 35, 38, 39, 42, 43, 46, 47, 50, 51, 54, 55, 58, 59, 62, 63/,
* JPC2
  1 /4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 23, 28, 29, 30, 31, 36,
  2 37, 38, 39, 44, 45, 46, 47, 52, 53, 54, 55, 60, 61, 62, 63/,
* JPC3
  1 /8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 40,
  2 41, 42, 43, 44, 45, 46, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63/,
* JPC4
  1 /16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31,
  2 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63/
  DATA
C
C SATURATED VAPOUR DENSITY

```

```

C      * G/393.37D+0,4398.6D+0,0.29302D+0/,
C      HEAT CAPACITY OF SATURATED LIQUID
C
1     A1,B1,C1,D1/1.6582D+0,-8.475D-4,4.4541D-7,-2992.6D+0/,
2     A2,B2,C2,D2/0.86496D+0,196.685D+0,644.43886D+0,-0.70698D+0/,
*     H
1     /-365.77D+0,1.6582D+0,-4.2375D-4,1.4847D-7,2992.6D+0,
2     2128.4D+0,0.86496D+0,393.37D+0,4398.6D+0,0.29302D+0/
END

```

### III.1.5 Function DFPS.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/dfps.f)

```

C      FUNCTION DFPS(TS)
C      COMPUTE 1st DERIVATIVE OF SODIUM SATURATION PRESSURE BY
C      TEMPERATURE
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C      COMMON/Z8/AA,BB,CC
C      DFPS=(-BB*TS**(-2.)+CC/TS)*DEXP(AA+BB/TS+CC*DLOG(TS))
C      RETURN
C      END

```

### III.1.6 Function DFPS1000.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/dfps1000.f)

```

C      FUNCTION DFPS1000(TS)
C      COMPUTE 1st DERIVATIVE OF SODIUM SATURATION PRESSURE BY
C      TEMPERATURE
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C      COMMON/Z8/AA,BB,CC
C      DFPS1000=1000.*(-BB*TS**(-2.)+CC/TS)*DEXP(AA+BB*(1./TS))
*     +CC*DLOG(TS))
C      RETURN
C      END

```

### III.1.7 Function DFRIDR.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/dfridr.f)

```

C      FUNCTION DFRIDR(FUNC,X,H,ERR)
C      COMPUTE DERIVATIVE OF FUNCTION FUNC AT POINT X BY RIDDERS'
C      METHOD USING FORTRAN SOFTWARE PROVIDED BY PRESS W.H. ET
C      AL., 1992 IN "NUMERICAL RECIPES IN FORTRAN"
C
C      H IS INPUT AS ESTIMATED INITIAL STEPSIZE. H NEEDS NOT TO BE
C      SMALL BUT RATHER SHOULD BE AN INCREMENT IN X OVER WHICH FUNC
C      CHANGES SUBSTANTIALLY
C

```

```

C ESTIMATE OF ERROR IN DERIVATIVE IS RETURNED AS ERR
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C INTEGER NTAB,I,J
C DOUBLE PRECISION DFRIDR,ERR,FUNC,CON,CON2,BIG,SAFE
C PARAMETER (CON=1.4D+0,CON2=CON*CON,BIG=1.D30,NTAB=10,SAFE=2.)
C
C PARAMETERS
C STEPSIZE IS DECREASED BY CON AT EACH ITERATION
C MAXSIZE OF TABLEAU IS SET BY NTAB
C RETURN WHEN ERROR IS SAFE WORSE THAN BEST SO FAR
C
C EXTERNAL FUNC
C DOUBLE PRECISION ERRT,FAC,HH,A(NTAB,NTAB)
C IF (H.EQ.0.) PAUSE 'h must be non-zero in dfridr'
C HH=H
C A(1,1)=(FUNC(X+HH)-FUNC(X-HH))/(2.*HH)
C ERR=BIG
C
C SUCCESSIVE COLUMNS IN NEVILLE TABLEAU WILL GO TO SMALLER
C STEPSIZES AND HIGHER ORDERS OF EXTRAPOLATION
C
C DO 12 I=2,NTAB
C
C TRY NEW SMALLER STEPSIZE
C
C HH=HH/CON
C A(1,I)=(FUNC(X+HH)-FUNC(X-HH))/(2.*HH)
C FAC=CON2
C
C COMPUTE EXTRAPOLATIONS OF VARIOUS ORDERS, REQUIRING NO NEW
C FUNCTION EVALUATIONS
C
C DO 11 J=2,I
C A(J,I)=(A(J-1,I)*FAC-A(J-1,I-1))/(FAC-1.)
C FAC=CON2*FAC
C
C ERROR STRATEGY IS TO COMPARE EACH NEW EXTRAPOLATION TO
C ONE ORDER LOWER BOTH AT PRESENT STEPSIZE AND AT
C PREVIOUS ONE.
C
C ERRT=DMAX1(DABS(A(J,I)-A(J-1,I)),DABS(A(J,I)-A(J-1,I-1)))
C
C IF ERROR IS DECREASED SAVE IMPROVED ANSWER
C
C IF (ERRT.LE.ERR) THEN
C ERR=ERRT
C DFRIDR=A(J,I)
C ENDIF
C CONTINUE
C
C IF HIGHER ORDER IS WORSE BY A SIGNIFICANT FACTOR SAFE THEN
C QUIT EARLY
C
C IF (DABS(A(I,I)-A(I-1,I-1)).GE.SAFE*ERR) RETURN
C CONTINUE
C RETURN
C END

```

11

12



### III.1.8 Υπορουτίνα ENTHALPYF.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/enthalpyf.f)

```
C
C SUBROUTINE ENTHALPYF (HF, UF)
C
C COMPUTE ENTHALPY AND INTERNAL ENERGY OF SATURATED LIQUID
C SODIUM IN kJ/kg GIVEN TEMPERATURE IN K UNITS AND PRESSURE
C IN MPA ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY FINK J.K. AND
C LEIBOWITZ L., 1995
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DIMENSION H(10)
C COMMON
C /Z2/TMIN, TMAX
C /Z15/H
C /K1/PP, PR
C /K2/TT, TR
C IF ( (TT.GE.TMIN).AND.(TT.LE.2000.))
C HF=H(1)+H(2)*TT+H(3)*TT**2+H(4)*TT**3+H(5)/TT
C IF ( (TT.GT.2000. ).AND.(TT.LE.TMAX) )
C HF=H(6)+H(7)*TT-(H(8)/2)*(1-TR)-(H(9)/2)*(1-TR)**H(10)
C UF=HF-1000.*PP/FDENSF(TT)
C RETURN
C END
```

### III.1.9 Υπορουτίνα ENTHALPYG.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/enthalpyg.f)

```
C
C SUBROUTINE ENTHALPYG (HG, UG)
C
C COMPUTE ENTHALPY AND INTERNAL ENERGY OF SATURATED SODIUM
C VAPOUR IN kJ/kg GIVEN TEMPERATURE IN K UNITS AND PRESSURE.
C IN MPA ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY
C FINK J.K. AND LEIBOWITZ L., 1995
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DIMENSION H(10)
C COMMON
C /Z2/TMIN, TMAX
C /Z15/H
C /K1/PP, PR
C /K2/TT, TR
C IF ( (TT.GE.TMIN).AND.(TT.LE.2000.))
C HG=H(1)+H(2)*TT+H(3)*TT**2+H(4)*TT**3+H(5)/TT+H(8)*(1-TR)+
C H(9)*(1-TR)**H(10)
C IF ( (TT.GT.2000. ).AND.(TT.LE.TMAX) )
C HG=H(6)+H(7)*TT+(H(8)/2)*(1-TR)+(H(9)/2)*(1-TR)**H(10)
C UG=HG-1000*PP/FDENSF(TT)
C RETURN
C END
```

### III.1.10 Υπορουτίνα ENTROPYF.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/entropy.f)

```
C
SUBROUTINE ENTROPYF(SF)
C
C COMPUTE ENTROPY OF SATURATED LIQUID SODIUM IN kJ/(kgK) GIVEN
C TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY
C FINK J.K. AND LEIBOWITZ L., 1981
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION E(5)
C COMMON
C   /K2/TT,TR
C   /Z2/TMIN,TMAX
C DATA E/-5.90356,1.51103,-5.73462D-4,1.57165D-7,-3425.81/
C EXTERNAL CF
C IF (TT.LE.1644.26) THEN
C   SF=E(1)+E(2)*DLOG(TT)+E(3)*TT+E(4)*TT**2+E(5)*TT**(-2)
C   RETURN
C END IF
C SF=E(1)+E(2)*DLOG(TMIN)+E(3)*TMIN+E(4)*TMIN**2+E(5)*TMIN**(-2)
C CALL INTEGRAL(CF,TMIN,TT,S)
C SF=SF+S
C RETURN
C END
```

### III.1.11 Υπορουτίνα ENTROPYG.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/entropy.g)

```
C
SUBROUTINE ENTROPYG(SG)
C
C COMPUTE ENTROPY OF SATURATED SODIUM VAPOUR IN kJ/(kgK) GIVEN
C TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY
C FINK J.K. AND LEIBOWITZ L., 1981
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION G(3)
C COMMON
C   /Z14/G
C   /K2/TT,TR
C CALL ENTROPYF(SF)
C SG=SF+(G(1)*(1.-TR)+G(2)*(1.-TR)**G(3))/TT
C RETURN
C END
```

### III.1.12 Κυρίως Πρόγραμμα EXAMPLE.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/example.f)

```
C
PROGRAM EXAMPLE
C
C MASTER TEST PROGRAM FOR SODIUM SATURATION PROPERTIES PACKAGE
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
```

```

BYTE BEL,CLRS(4)
CHARACTER*1 CHAR
CHARACTER*3 AG,KG,MG
DOUBLE PRECISION IBMF,IBMG,KF,LACFG,MF
COMMON
* /PROPERTY1/
* SVF,HF,UF,CPF,CVF,SF,IBMF,AF,KF,MF
* /PROPERTY2/
* SVG,HG,UG,CPG,CVG,SG,IBMG,AG,KG,MG
* /PROPERTY3/HFG,SIGMAFG,LACFG
DATA CLRS/27,'H',27,'J',BEL/07/
PRINT 100,CLRS,BEL
100 FORMAT(1X,5A1,'National Technical University of Athens')
PRINT *, ' Department of Mechanical Engineering'
PRINT *, ' Nuclear Engineering Section'
PRINT *
PRINT *, ' SODIUM LI.S.P. (R) '
PRINT *, 'SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE'
PRINT *, '(Thermodynamic and Transport Properties '
PRINT *, ' of the Sodium Substance at Saturation; '
PRINT *, ' An interactive approach)'
PRINT *, ' Version 1 - SEPTEMBER 1999'
PRINT *, ' Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>'
PRINT *
PRINT *, ' This version of the code accepts'
PRINT *, ' as input only pressure and temperature. '
PRINT *, '(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C) '
PRINT *, ' To obtain the saturation properties'
PRINT *, 'equal either pressure or temperature to zero'
PRINT *, ' for the desired temperature or pressure,'
PRINT *, ' respectively).'
PRINT *
PRINT *
10 WRITE (*,200)
200 FORMAT($,'Please enter desired pressure in bars: ')
READ *, P
WRITE (*,300)
300 FORMAT($,'Please enter desired temperature in C: ')
READ *, T
IF (T.NE.0.D+0) T=T+273.15
JS=1
JP=63
CALL SODIUM_LISP(JS,JP,P,T,TS,JR,IS)
PRINT *
WRITE (*,400) P
400 FORMAT (1X,'Pressure in bars: ',F8.3)
WRITE (*,500) T-273.15D+0
500 FORMAT (1X,'Temperature in C: ',F8.3)
PRINT *
IF (IS.EQ.0) THEN
WRITE (*,600)
600 FORMAT (1X,'There is no saturation state for ',
+ 'this pressure and temperature')
PRINT *
END IF
IF (IS.EQ.1) THEN
WRITE (*,700)
700 FORMAT ($,'Exact saturation temperature for this '
+ 'pressure: ')
WRITE (*,800) TS-273.15D+0
800 FORMAT (F7.3)

```

```

          PRINT *
END IF
IF (IS.EQ.2) PRINT *, 'This is a saturation state, ',
+ 'or almost a saturation state'
PRINT *
PRINT *, 'If heat capacities are equal to -1, you are nearly'
PRINT *, 'at the critical point, where such calculations are'
WRITE (*,900)
900  FORMAT(1X,40X, 'LIQUID          VAPOR')
PRINT *
WRITE (*,1000) SVF,SVG
1000 FORMAT (1X,'Specific Volume in m3/kg:',14X,F8.7,12X,E13.7)
WRITE (*,1100) UF,UG
1100 FORMAT (1X,'Internal Energy in kJ/kg:',10X,F6.1,15X,F6.1)
WRITE (*,1200) HF,HG
1200 FORMAT (1X,'Specific Enthalpy in kJ/kg:', 8X,F6.1,15X,F6.1)
WRITE (*,1300) SF,SG
1300 FORMAT (1X,'Specific Entropy in kJ/(kgK):', 9X,F6.4,14X,F7.4)
PRINT *, 'Specific Heat at'
WRITE (*,1400) CPF,CPG
1400 FORMAT (1X,'constant pressure in kJ/(kgK):',4X,F10.4,11X,F10.4)
PRINT *, 'Specific Heat at'
WRITE (*,1500) CVF,CVG
1500 FORMAT (1X,'constant volume in kJ/(kgK):', 8X,F8.4,14X,F7.4)
WRITE (*,1600) MF,MG
1600 FORMAT (1X,'Viscosity in kg/(ms):',18X,F8.7,8X,A8)
WRITE (*,1700) KF,KG
1700 FORMAT (1X,'Thermal Conductivity in W/(mK):', 6X,F7.4,14X,A5)
WRITE (*,1900) SIGMAFG,SIGMAFG
1900 FORMAT (1X,'Surface tension in N/m: ',15X,F7.6,14X,F7.6)
PRINT *
WRITE (*,2000)
FORMAT($,'Do you want another go?(y/n) ')
READ (*,2100) CHAR
FORMAT(A1)
IF (CHAR.EQ.'y') GO TO 10
C
C
C
END MASTER TEST PROGRAM
STOP
END

```

### III.1.13 Function FDENSF.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/fdensf.f)

```

FUNCTION FDENSF(TT)
C
C  COMPUTE DENSITY OF SATURATED LIQUID SODIUM IN KGM-3 GIVEN
C  TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY
C  FINK J.K. AND LEIBOWITZ L., 1995.
C
C  IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C  DIMENSION F(3)
COMMON
* /Z3/PC,TC,DC
* /Z11/F
TR=TT/TC
FDENSF=DC+F(1)*(1-TR)+F(2)*(1-TR)**F(3)

```

```
RETURN
END
```

### III.1.14 Function *FDENSG*.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/fdensg.f)

```
C
FUNCTION FDENSG(TT)
C
C COMPUTE DENSITY OF SATURATED SODIUM VAPOUR IN KGM-3 GIVEN
C TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY
C FINK J.K.AND LEIBOWITZ L., 1995.
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DIMENSION G(3)
C COMMON
C   /Z3/PC,TC,DC
C   /Z14/G
C TR=TT/TC
C FDENSG=1./((G(1)*(1-TR)+G(2)*(1-TR)**G(3)))/(TT*DFPS1000(TT))
C +1./FDENSF(TT)
C RETURN
C END
```

### III.1.15 Function *FFPS*.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/ffps.f)

```
C
FUNCTION FFPS(TS)
C
C COMPUTE SATURATION VAPOUR PRESSURE OF SODIUM IN MPa AS
C FUNCTION OF SATURATION TEMPERATURE ACCORDING TO THE VAPOUR
C PRESSURE EQUATION PROPOSED BY BROWNING P. AND POTTER P.E., 1985
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C COMMON
C   /Z8/AA,BB,CC
C   /K1/PP,PR
C FPS=DEXP(AA+BB*(1./TS)+CC*DLOG(TS))
C FFPS=FPS-PP/10.
C RETURN
C END
```

### III.1.16 Function *FPS*.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/fps.f)

```
C
FUNCTION FPS(TS)
C
C COMPUTE SATURATION VAPOUR PRESSURE OF SODIUM IN MPa AS
C FUNCTION OF SATURATION TEMPERATURE ACCORDING TO THE VAPOUR
C PRESSURE EQUATION PROPOSED BY BROWNING P. AND POTTER P.E., 1985
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
```

```

COMMON/28/AA, BB, CC
FPS=DEXP(AA+3B*(1./TS)-CC*DLOG(TS))
RETURN
END

```

### III.1.17 Function FTS.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/fts.f)

```

C
C FUNCTION FTS(PP)
C
C COMPUTE FIRST APPROXIMATION OF SODIUM SATURATION
C TEMPERATURE IN K UNITS AS FUNCTION OF PRESSURE IN MPA
C ACCORDING TO THE FIT OF DUNN F.E. ET AL, 1987. THIS
C APPROXIMATION IS TO BE USED AS INITIAL GUESS FOR
C NUMERICAL CALCULATION OF ACTUAL SATURATION TEMPERATURE
C OF SODIUM
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DATA A/7.8130/, B/11209./, C/5.2490D+05/
C
C CONVERT PRESSURES IN BARS TO PRESSURES IN MPA
C
C PPP=PP/10.
C FTS=2*C/(-B+{(B**2+4*A*C-4*C*DLOG(PPP))**0.5})
C RETURN
C END

```

### III.1.18 Υπορουτίνα INTEGRAL.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/integral.f)

```

C
C SUBROUTINE INTEGRAL(FUNC,A,B,S)
C
C TRAPEZIUM METHOD FOR FUNCTION INTEGRATION
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C EXTERNAL FUNC
C PARAMETER(N=1000)
C H=(B-A)/DFLOAT(N)
C S=(FUNC(A)+FUNC(B))/2.
C X=A
C N1=N-1
C DO 20 I=1,N1
C X=X+H
C S=S+FUNC(X)
C CONTINUE
C S=S*H
C RETURN
C END

```

20

### III.1.19 Υπορουτίνα SHF.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlispppt/shf.f)

```
C
C SUBROUTINE SHF(CPF,CVF)
C
C COMPUTE HEAT CAPACITY OF SATURATED LIQUID SODIUM AT CONSTANT
C PRESSURE IN kJ/(kgK) GIVEN TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING
C TO RELATION PROVIDED BY FINK J.K. AND LEIBOWITZ I., 1995
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION IBMF,KAF,KAM,F(3)
C COMMON
C   /Z2/TMIN,TMAX
C   /Z3/PC,TC,DC
C   /Z9/BETA,KAM
C   /Z11/F
C   /K2/TT,TR
C
C VOLUME EXPANSIVITY
C AF=-F(1)/TC-(F(2)*F(3)/TC)*(1-TR)**(F(3)-1)
C AF=-AF/FDENSF(TT)
C
C ADIABATIC COMPRESSIBILITY
C THETA=(TT-TMIN)/(TC-TMIN)
C KAF=KAM*(1+THETA/BETA)/(1-THETA)
C
C ISOTHERMAL BULK MODULUS (ISOTHERMAL COMPRESSIBILITY)
C BMF1=KAF*CF(TT)*TT/1000.+(TT/FDENSF(TT))*AF*(AF+KAF*DFPS(TT))
C BMF2=CF(TT)*TT-(TT/FDENSF(TT))*DFPS1000(TT)*(AF+KAF*DFPS(TT))
C IBMF=1000.*BMF1/BMF2
C
C THERMAL EXPANSION COEFFICIENT
C APF=AF+KAF*DFPS(TT)
C
C HEAT CAPACITY AT CONSTANT PRESSURE
C
C CPF=CF(TT)*TT+TT*APF*DFPS1000(TT)/FDENSF(TT)
C CVF=CPF*KAF/IBMF
C RETURN
C END
```

### III.1.20 Υπορουτίνα SHG.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlispppt/shg.f)

```
C
C SUBROUTINE SHG(CPG,CVG)
C
C COMPUTE HEAT CAPACITY OF SATURATED SODIUM VAPOUR AT CONSTANT
C PRESSURE IN kJ/(kgK) GIVEN TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING
C TO RELATION PROVIDED BY FINK J.K. AND LEIBOWITZ L., 1995
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
```

```

DIMENSION TP(8)
COMMON
*/Z2/TMIN,TMAX
*/Z3/PC,TC,DC
*/Z10/TP
*/Z13/A1,B1,C1,D1,A2,B2,C2,D2
*/K2/TT,TR
DATA
2 E2,F2,G2/-393.37D+0,-1288.877772D+0,-0.70698D+0/,
3 A3,B3,C3,D3/0.86496D+0,-196.685D+0,-644.43886D+0,-0.70968D+0/
EXTERNAL FDENSG
C
HEAT CAPACITY
C
C
IF ((TT.GE.TMIN).AND.(TT.LE.2000.))
* CG=A1+B1*TT+C1*TT**2+D1*TT**(-2)+E2/TC+(F2/TC)*(1-TR)**G2
* -DFPS1000(TT)/FDENSG(TT)
IF ((TT.GT.2000.).AND.(TT.LE.TMAX))
* CG=A3+B3/TC+(C3/TC)*(1-TR)**D3-DFPS1000(TT)/FDENSG(TT)
C
VOLUME EXPANSIVITY
C
C
AG=DFRIDR(FDENSG,TT,1.,ERR)
AG=-AG/FDENSG(TT)
C
THERMAL EXPANSION COEFFICIENT
C
C
IF ((TT.GE.TMIN).AND.(TT.LE.1600.))
* GAMMAV=(-TP(2)/(TT**2)+TP(3)/TT+TP(4)+2*TP(5)*TT)*
* DEXP(TP(1)+TP(2)/TT+TP(3)*DLOG(TT)+TP(4)*TT+TP(5)*TT**2)
IF ((TT.GT.1600.).AND.(TT.LE.TMAX))
* GAMMAV=TP(6)+TP(7)*(TC-TT)**0.5+TP(8)*(TC-TT)
APG=AG/(1-DFPS(TT)/GAMMAV)
C
HEAT CAPACITY AT CONSTANT PRESSURE
C
C
CPG=CG+TT*APG*DFPS1000(TT)/FDENSG(TT)
CVG=CPG-1000.*TT*APG*GAMMAV/FDENSG(TT)
RETURN
END

```

### III.1.21 Υπορουτίνα SIBMF.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/sibmf.f)

```

SUBROUTINE SIBMF(IBMFF)
C
C COMPUTE ISOTHERMAL BULK MODULUS (ISOTHERMAL COMPRESSIBILITY)
C OF SATURATED LIQUID SODIUM IN MPA-1 ACCORDING TO RELATION
C PROVIDED BY FINK J.K. AND LEIBOWITZ L., 1995
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
DOUBLE PRECISION IBMF,KAF,KAM,F(3)
COMMON
*/Z2/TMIN,TMAX
*/Z3/PC,TC,DC
*/Z9/BETA,KAM
*/Z11/F

```



```

* /Z13/A1,B1,C1,D1,A2,B2,C2,D2
* /K2/TT,TR
C
C VOLUME EXPANSIVITY
C
AF=-F(1)/TC-(F(2)*F(3)/TC)*(1-TR)**(F(3)-1)
AF=-AF/FDENSF(TT)
C
C ADIABATIC COMPRESSIBILITY
C
C THETA=(TT-TMIN)/(TC-TMIN)
KAF=KAM*(1+THETA/BETA)/(1-THETA)
C
C ISOTHERMAL BULK MODULUS (ISOTHERMAL COMPRESSIBILITY)
C
BMF1=KAF*CF(TT)*TT/1000.+(TT/FDENSF(TT))*AF*(AF+KAF*DFPS(TT))
BMF2=CF(TT)*TT-(TT/FDENSF(TT))*DFPS100C(TT)*iAF+KAF*DFPS(TT)
IBMF=1000.*BMF1/BMF2
RETURN
END

```

### III. 1.22 Υπορουτίνα SIBMG.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/sibmg.f)

```

C
C SUBROUTINE SIBMG(IEBG)
C
C COMPUTE ISOTHERMAL BULK MODULUS OF SATURATED SODIUM VAPOUR
C IN MPA-1 ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY FINK J.K. AND
C LEIBOWITZ L., 1995
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION IEBG,TP(8)
C COMMON
* /Z2/TMIN,TMAX
* /Z3/PC,TC,DC
* /Z10/TP
* /K2/TT,TR
C EXTERNAL FDENSG
C
C VOLUME EXPANSIVITY
C
AG=DFRIDR(FDENSG,TT,1.,ERR)
AG=-AG/FDENSG(TT)
C
C THERMAL EXPANSION COEFFICIENT
C
IF ((TT.GE.TMIN).AND.(TT.LE.1600.))
* GAMMAV=(-TP(2)/(TT**2)+TP(3)/TT+TP(4)+2*TP(5)*TT)*
* DEXP(TP(1)+TP(2)/TT+TP(3)*DLOG(TT)+TP(4)*TT+TP(5)*TT**2)
* IF ((TT.GT.1600.).AND.(TT.LE.TMAX))
* GAMMAV=TP(6)+TP(7)*(TC-TT)**0.5+TP(8)*(TC-TT)
APG=AG/(1-DFPS(TT)/GAMMAV)
IBMG=APG/GAMMAV
RETURN
END

```

### III.1.23 Υπορουτίνα SODIUM\_LISP.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlispt/sodium\_lisp.f)

```
C
C SUBROUTINE SODIUM_LISP(JS,JP,P,T,TS,JR,IS)
C
C SATURATED SODIUM LIQUID AND VAPOUR PROPERTY PACKAGE
C DEVELOPED BY PETROPOULOS N.P.
C
C COMPUTE THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF SATURATED
C SODIUM, GIVEN PRESSURE IN BARS AND TEMPERATURE IN DEGREES
C CENTIGRATE MAINLY ACCORDING TO RELATIONS GIVEN BY FINK J.K.
C AND LEIBOWITZ L.,1995
C VALUE OF JS(INPUT) MUST BE 1.RETURNED THERMODYNAMIC AND
C TRANSPORT PROPERTIES ARE SPECIFIED BY JP(INPUT).JR(OUTPUT)
C REPRESENTS THERMODYNAMIC SUB-REGION OF P-T DIAGRAM IN WHICH
C INPUT LIES.IS(OUTPUT) INDICATES RELATIVE POSITION OF INPUT TO
C SATURATION CURVE.COMPUTE SATURATION PROPERTIES IF EITHER PRESSURE
C OR TEMPERATURE IS EQUAL TO ZERO (FOR RESPECTIVE TEMPERATURE OR
C PRESSURE)
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION IBMF,IBMG,KF,LACFG,MF
C CHARACTER*3 AG,KG,MG
C
C COMMONS LABELLED WITH K REPRESENT MOST IMPORTANT INPUT OR
C OUTPUT
C
C COMMON
C /Z3/PC,TC,DC
C /K1/PP,PR
C /K2/TT,TR
C /K3/DD
C /K4/J
C
C COMMONS LABELLED WITH PROPERTY1 REPRESENT MAINLY PROPERTIES OF
C SATURATED LIQUID SODIUM
C
C /PROPERTY1/
C
C SUFFIX F STANDS MAINLY FOR FLUID(LIQUID)
C
C SVF,HF,UF,CPF,CVF,SF,IBMF,AF,KF,MF
C
C COMMONS LABELLED WITH PROPERTY2 REPRESENT MAINLY PROPERTIES OF
C SATURATED SODIUM VAPOUR
C
C /PROPERTY2/
C
C SUFFIX G STANDS MAINLY FOR GAS(VAPOUR)
C
C SVG,HG,UG,CFG,CVG,SG,IBMG,AG,KG,MG
C
C COMMONS LABELLED WITH PROPERTY 3 REPRESENT PROPERTIES
C EXISTING ONLY IN SATURATION STATES,SUFFIX FG STANDS FOR
C SATURATION
C
```

```

* /PROPERTY3/HFG,SIGMAFG,LACFG
C DATA ZERO/0.0+0/
C
C CHECK FOR CORRECT CALL OF SODIUM_LISP ROUTINE
C
100 IF (JS.NE.1) THEN
    WRITE (6,100)
    FORMAT(/,1X,'Fail to set the JS parameter correctly!',/)
    STOP
200 END IF
    IF (JP.GT.63.OR.JP.LT.0) THEN
        WRITE (6,200)
        FORMAT(/,1X,'Fail to set the JP parameter correctly!',/)
        STOP
10 END IF
    GO TO (-0),JS
    PP=P
    TT=T
    TS=ZERO
C CHECK FOR OUT OF RANGE
C
C CALL CHECKPT(TS,JR,IS)
C P=PP
C T=TT
C J=JR
C
C INITIALIZE VALUES OF DENSITIES AND SPECIFIC VOLUMES
C
C DF=ZERO
C DG=ZERO
C SVF=ZERO
C SVG=ZERO
C
C INITIALIZE VALUES OF OTHER PROPERTIES
C
C UF=ZERO
C UG=ZERO
C HF=ZERO
C HG=ZERO
C CPF=ZERO
C CPG=ZERO
C CVF=ZERO
C CVG=ZERO
C IBMF=ZERO
C IBMG=ZERO
C AF=ZERO
C AG="N/A"
C MF=ZERO
C MG="N/A"
C KF=ZERO
C KG="N/A"
C HFG=ZERO
C SIGMAFG=ZERO
C LACFG=ZERO
C
C DENSITY OF SATURATED SODIUM LIQUID
C
C IF ((J.EQ.1).OR.(J.EQ.6).OR.(J.EQ.4).OR.(J.EQ.5)) THEN
    DF=FDENSF(T)
    IF (DF.NE.ZERO) THEN

```

```

C
C CONVERT DENSITY TO SPECIFIC VOLUME IN m3/Kg
C
SVF=1/DF
END IF
END IF

C
C DENSITY OF SATURATED SODIUM VAPOUR
C
IF ((J.EQ.2).OR.(J.EQ.6).OR.(J.EQ.3).OR.(J.EQ.5)) THEN
DG=FDENSG(T)
IF (DG.NE.ZERO) THEN
C
C CONVERT DENSITY TO SPECIFIC VOLUME IN m3/kg
C
SVG=1/DG
END IF
END IF

C
C OTHER PROPERTIES OF SATURATED SODIUM
C
IF (JP.NE.0) CALL TOTAL
1 (JP,HF,UF,CPF,CVF,SF,IBMF,AF,KE,MF,
2 HG,UG,CPG,CVG,SG,IBMG,AG,KG,MG,SIGMAFG)
IF ((J.EQ.5).OR.(J.EQ.6)) THEN
C
C COMPUTE LATENT HEAT OF SODIUM IN kJ/kg
C
HFG=HG-HF

C
C COMPUTE LAPLACE CONSTANT OF SODIUM IN N/M
C
IF ((DF.NE.ZERO).AND.(DG.NE.ZERO).AND.(ABS(DF-DG).GE.1.D-3))
+ THEN
G=9.80665D+0
LACFG=DSQRT(SIGMAFG/(G*1000*(DF-DG)))
END IF
END IF
RETURN
END

```

### III.1.24 Υπορουτίνα SOLVE.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/solve.f)

```

C
C SUBROUTINE SOLVE(F,DF,EPS,NDEC,X,ITMAX,IER)
C
C FIND REAL ZERO X OF REAL FUNCTION F GIVEN GOOD INITIAL GUESS
C X AND FUNCTION DF (1st PARTIAL DERIVATIVE OF F BY X).ROOT X
C IS ACCEPTED IF ABSOLUTE VALUE OF F(X).LE.EPS(INPUT).ROOT X
C IS ACCEPTED IF TWO SUCCESSIVE APPROXIMATIONS AGREE TO FIRST
C NDEC(INPUT) DECIMAL DIGITS.X(INPUT) IS AN INITIAL VALUE.X(OUTPUT)
C CONTAINS COMPUTED ROOT.ITMAX(INPUT) IS MAXIMUM ALLOWABLE NUMBER
C OF NEWTON RAPHSON ITERATIONS USED ON ROOT.IER(OUTPUT) WARNING
C ERROR PARAMETER=N,N=1 ROOT X WAS BYPASSED BECAUSE DF BECOMES
C TOO SMALL.X IS SET TO 111111.THIS ERROR CONDITION MAY CAUSE AN
C OVERFLOW,N=2 ROOT X WAS BYPASSED BECAUSE ITMAX WAS EXCEEDED.F.C.
C X IS SET TO 222222,N=3 SEVERAL OF THE ABOVE ERROR CONDITIONS
C OCCURED.X IS SET TO EITHER 111111. OR 222222. AS ABOVE.DOUB.F.
C PRECISION ROUTINE.

```

C

```
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
EXTERNAL F,DF
TOL=10.**(-NDEC)
IER=0
IF (ITMAX.GT.100) ITMAX=100
DO 20 K=1,ITMAX
IF (ABS(DF(X)).LT.EPS) THEN
X=1111111.D+0
IER=1
RETURN
END IF
XK=X-F(X)/DF(X)
IF (K.EQ.41) TOL=TOL*10
IF (K.EQ.61) TOL=TOL*10
IF (K.EQ.81) TOL=TOL*10
IF (ABS(XK-X).LT.TOL) THEN
X=XK
RETURN
ELSE
X=XK
IF (ABS(F(X)).LT.EPS) THEN
RETURN
END IF
END IF
20 CONTINUE
X=2222222.D+0
IF (IER.EQ.0) THEN
IER=2
ELSE
IER=3
END IF
RETURN
END
```

### III.1.25 Υπορουτίνα SOVEF.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppt/sovef.f)

```

SUBROUTINE SOVEF(AF)
C
C COMPUTE SONIC VELOCITY IN m/s OF SATURATED SODIUM LIQUID
C ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY FINK J.K. AND LEIBOWITZ L., 1995
C
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DOUBLE PRECISION A(3),KAF,KAM
COMMON
* /Z2/TMIN,TMAX
* /Z3/PC,TC,DC
* /Z9/BETA,KAM
* /K2/TT,TR
DATA A/2660.7D+0,-0.37667D+0,-9.0356D-5/
C
ADIABATIC COMPRESSIBILITY
C
THETA=(TT-TMIN)/(TC-TMIN)
KAF=KAM*(1+THETA/BETA)/(1-THETA)
C
SONIC VELOCITY
C
```

```

IF ((TT.GE.TMIN).AND.(TT.LE.1773.))
* AF=A(1)+A(2)*TT+A(3)*TT**2
IF ((TT.GT.1773.).AND.(TT.LE.TMAX))
* AF=1000.*(KAF*FDENSF(TT))**(-0.5)
RETURN
END

```

### III.1.26 Υπορουτίνα TENSION.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppi/tension.f)

```

C
C SUBROUTINE TENSION(SIGMAFG)
C
C COMPUTE SURFACE TENSION OF SATURATED SODIUM IN N/M GIVEN
C TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY
C FINK J.K AND LEIBOWITZ L., 1995
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION N
C COMMON /K2/TT,TR
C SIGMA0=240.5D-3
C N=1.126D+0
C SIGMAFG=SIGMA0*(1-TR)**N
C RETURN
C END

```

### III.1.27 Υπορουτίνα TOTAL.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlisppi/total.f)

```

C
C SUBROUTINE TOTAL
C 1 JP,HF,UF,CPF,CVF,SF,IBMF,AF,KF,MF,
C 2 HG,UG,CPG,CVG,SG,IBMG,AG,KG,MG,SIGMAFG)
C
C MASTER SERVICE SUBPROGRAM DIRECTLY UNDER SODIUM_LISP ROUTINE.
C
C IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
C DOUBLE PRECISION IBMF,KF,MF,IBMG
C CHARACTER*3 AG,KG,MG
C DIMENSION JPC1(32),JPC2(32),JPC3(32),JPC4(32)
C COMMON
C 1 /K2/TT,TR
C 2 /Z12/JPC1,JPC2,JPC3,JPC4
C
C ACT ACCORDING TO THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES
C SPECIFICATION,JP
C
C IF (MOD(JP,2)) 60,70,60
C
C ENTHALPY AND INTERNAL ENERGY
C
C 60 CALL ENTHALPYF(HF,UF)
C 70 CALL ENTHALPYG(HG,UG)
C DO 80 I=1,32
C IF (JP-JPC=(I)) 100,90,80
C 80 CONTINUE
C GO TO 100

```

```

C
C ENTROPY
C SPECIFIC HEAT AT CONSTANT PRESSURE
C SPECIFIC HEAT AT CONSTANT VOLUME
C
C
C      90 CALL ENTROPYF(SF)
C      CALL ENTROPYG(SG)
C      CALL SHF(CPF,CVF)
C      CALL SHG(CPG,CVG)
C      IF (TT.GT.2500.) THEN
C        CPF=-1.
C        CPG=-1.
C        CVF=-1.
C        CVG=-1.
C      END IF
C      DO 110 I=1,32
C        IF (JP-JPC2(I)) 130,120,110
C      CONTINUE
C      GO TO 130
C
C      110 SONIC VELOCITY
C      ISOTHERMAL BULK MODULUS
C
C      120 CALL SOVEF(AF)
C      CALL SIBMF(IBMF)
C      CALL SIBMG(IBMG)
C      IF (TT.GT.2500) THEN
C        AF=-1.
C        IBMF=-1.
C        IBMG=-1.
C      END IF
C      DO 140 I=1,32
C        IF (JP-JPC3(I)) 160,150,140
C      CONTINUE
C      GO TO 160
C
C      130 VISCOSITY,THERMAL CONDUCTIVITY
C
C      150 CALL VISCOSITYF(MF)
C      CALL CONDUCTIVEF(KF)
C      DO 170 I=1,32
C        IF (JP-JPC4(I)) 190,180,170
C      CONTINUE
C      GO TO 190
C
C      SURFACE TENSION
C
C      180 CALL TENSION(SIGMAFG)
C      190 IF (JP-32) 200,210,210
C
C      RESERVED FOR FUTURE USE
C
C      210 GO TO 200
C      200 RETURN
C      END

```

### III.1.28 Υπορουτίνα *VISCOSITYF*.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlispp/viscosityf.f)

```
C      SUBROUTINE VISCOSITYF(MF)
C
C      COMPUTE VISCOSITY OF SATURATED LIQUID SODIUM IN PAS GIVEN
C      TEMPERATURE IN K UNITS ACCORDING TO RELATION PROVIDED BY
C      SHPIL'RAIN E. ET AL., 1985
C
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DOUBLE PRECISION MF,M(3)
      COMMON /K2/TT,TR
      DATA M/ -6.4406D+0, -0.3958D+0, 556.835D+0/
      MF=DEXP (M(1)+M(2)*DLOG(TT)+M(3)/TT)
      RETURN
      END
```

### III.2 Τα αρχεία κατασκευής εκτελέσιμου προγράμματος.

#### III.2.1 *makefile1*.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlispp/makefile1)

```
ert: example.o sodium_lisp.o checkpt.o constants.o fdensf.o fdensg.o fts.o \
ffps.o fps.o dfps.o dfps1000.o dfridr.o solve.o \
total.o enthalpyf.o enthalpyg.o shf.o shg.o \
sovef.o sibmf.o sibmg.o viscosityf.o conductivef.o \
tension.o cf.o entropyf.o \
entropyg.o integral.o
f77 -g -o ert example.o sodium_lisp.o checkpt.o constants.o \
fdensf.o fdensg.o fts.o \
ffps.o fps.o dfps.o dfps1000.o dfridr.o solve.o \
total.o enthalpyf.o enthalpyg.o shf.o shg.o \
sovef.o sibmf.o sibmg.o viscosityf.o conductivef.o \
tension.o cf.o entropyf.o \
entropyg.o integral.o
```

#### III.2.2 *makefile2*.

(αρχείο /users2/npetro/sodiumlisp/sodiumlispp/makefile2)

```
ert: example.o sodium_lisp.o checkpt.o constants.o fdensf.o fdensg.o fts.o \
ffps.o fps.o dfps.o dfps1000.o dfridr.o solve.o \
total.o enthalpyf.o enthalpyg.o shf.o shg.o \
sovef.o sibmf.o sibmg.o viscosityf.o conductivef.o \
tension.o cf.o entropyf.o \
entropyg.o integral.o
f77 -g -o ert example.o sodium_lisp.o checkpt.o constants.o \
fdensf.o fdensg.o fts.o \
ffps.o fps.o dfps.o dfps1000.o dfridr.o solve.o \
total.o enthalpyf.o enthalpyg.o shf.o shg.o \
```



```

sofef.o sibmf.o sibmg.o viscosityf.o conductivef.o \
tension.o cf.o entropyf.o \
entropyg.o integral.o

entropyg.o: entropyg.f
        f77 -g -c entropyg.f

entropyf.o: entropyf.f
        f77 -g -c entropyf.f

cf.o: cf.f
        f77 -g -c cf.f

dfridr.o: dfridr.f
        f77 -g -c dfridr.f

example.o: example.f
        f77 -g -c example.f

sodium_lisp.o: sodium_lisp.f
        f77 -g -c sodium_lisp.f

checkpt.o: checkpt.f
        f77 -g -c checkpt.f

constants.o: constants.f
        f77 -g -c constants.f

fdensf.o: fdensf.f
        f77 -g -c fdensf.f

fdensg.o: fdensg.f
        f77 -g -c fdensg.f

fts.o: fts.f
        f77 -g -c fts.f

fps.o: fps.f
        f77 -g -c fps.f

ffps.o: ffps.f
        f77 -g -c ffps.f

dfps.o: dfps.f
        f77 -g -c dfps.f

dfps1000.o: dfps1000.f
        f77 -g -c dfps1000.f

solve.o: solve.f
        f77 -g -c solve.f

total.o: total.f
        f77 -g -c total.f

enthalpyf.o: enthalpyf.f
        f77 -g -c enthalpyf.f

enthalpyg.o: enthalpyg.f
        f77 -g -c enthalpyg.f

```

```
shf.o: shf.f
      f77 -g -c shf.f

shg.o: shg.f
      f77 -g -c shg.f

sovef.o: sovef.f
      f77 -g -c sovef.f

sibmf.o: sibmf.f
      f77 -g -c sibmf.f

sibmg.o: sibmg.f
      f77 -g -c sibmg.f

viscosityf.o: viscosityf.f
      f77 -g -c viscosityf.f

conductivef.o: conductivef.f
      f77 -g -c conductivef.f

tension.o: tension.f
      f77 -g -c tension.f

integral.o: integral.f
      f77 -g -c integral.f
```

### III.3 ΕΥΔΙΚΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ.

(βλέπε και' αvertisτορία και τον Πίνακα 6-5 στο 60 Κεφάλαιο)

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

SODIUM LI.S.P. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Sodium Substance at Saturation;

An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0  
Please enter desired temperature in C: 60

Desired temperature out of range!

SODIUM LI.S.P. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Sodium Substance at Saturation;  
 An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0  
 Please enter desired temperature in C: 100

Pressure in bars: .000

Temperature in C: 100.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0010808

Internal Energy in kJ/kg: 209.7

Specific Enthalpy in kJ/kg: 209.7

Specific Entropy in kJ/(kgK): 2.8280

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 1.3825

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 1.2607

Viscosity in kg/(ms): .0006808

Thermal Conductivity in W/(mK): 89.2762

Surface tension in N/m: .200536

Do you want another go?(y/n) n

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

SODIUM LI.S.F. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Sodium Substance at Saturation;  
An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 500

Pressure in bars: .006

Temperature in C: 500.000

This is a saturation state,or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m3/kg:

.0011982

.4812527F+03

Internal Energy in kJ/kg:

735.4

2296.7

Specific Enthalpy in kJ/kg:

735.5

4954.8

Specific Entropy in kJ/(kgK):

3.7903

9.2477

constant pressure in kJ/(kgK):

1.2642

2.4098

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK):

1.0075

1.7916

Viscosity in kg/(ms):

.0002358

N/A

Thermal Conductivity in W/(mK):

64.2169

N/A

Surface tension in N/m:

.158674

.158674

Do you want another go?(y/n) n

SODIUM LI.S.P. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Sodium Substance at Saturation;

An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 1000

Pressure in bars: 2.679

Temperature in C: 1000.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0014026

Internal Energy in kJ/kg: 1363.5

Specific Enthalpy in kJ/kg: 1367.2

Specific Entropy in kJ/(kgK): 4.4217

Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK): 1.2978

Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK): .8486

Viscosity in kg/(ms): .0001459

Thermal Conductivity in W/(mK): 44.8513

Surface tension in N/m: .108084

Do you want another go?(y/n) n

SODIUM LI.S.P. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Sodium Substance at Saturation;

An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0  
 Please enter desired temperature in C: 1500

Pressure in bars: 37.675

Temperature in C: 1500.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0017371

Internal Energy in kJ/kg: 2006.1

Specific Enthalpy in kJ/kg: 409.4

Specific Entropy in kJ/(kgK): 5252.3

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 6.6748

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 2.0482

constant volume in kJ/(kgK): 1.1415

Viscosity in kg/(ms): N/A

Thermal Conductivity in W/(mK): N/A

Surface tension in N/m: .060087

Do you want another go?(Y/N) n

SODIUM LI.S.P. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Sodium Substance at Saturation;  
An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK FOTROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 2000

Pressure in bars: 160.796

Temperature in C: 2000.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0025025

Internal Energy in kJ/kg: 2580.7

Specific Enthalpy in kJ/kg: 2983.1

Specific Entropy in kJ/(kgK): 5.3182

Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK): 2.4869

Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK): .8306

Viscosity in kg/(ms): .0000957

Thermal Conductivity in W/(mK): 12.2329

Surface tension in N/m: .016398

Do you want another go?(y/n) n



SODIUM LI.S.P. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
 (Thermodynamic and Transport Properties  
 of the Sodium Substance at Saturation;  
 An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.  
 (range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties  
 equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,  
 respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 2200

Pressure in bars: 242.304

Temperature in C: 2200.000

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0035859 .1438369E-01

Internal Energy in kJ/kg: 2791.6 1389.5

Specific Enthalpy in kJ/kg: 3660.4 4874.7

Specific Entropy in kJ/(kgK): 5.5918 6.0828

constant pressure in kJ/(kgK): 8.3635 28.9295

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): 2.5236 3.1767

Viscosity in kg/(ms): .0000907 N/A

Thermal conductivity in W/(mK): 1.8557 N/A

Surface tension in N/m: .001684 .001684

Do you want another go?(Y/N) n

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

SODIUM LI.S.P. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE  
(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Sodium Substance at Saturation;  
An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0  
Please enter desired temperature in C: 2300

Desired temperature out of range!

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Sodium Substance at Saturation;  
An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 0

Please enter desired temperature in C: 0

Both pressure and temperature cannot be 0.!

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE (R)

(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Sodium Substance at Saturation;  
An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author: NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 80  
Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 80.000

Temperature in C: 1727.238

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0019852 .6242776E-01

Internal Energy in kJ/kg: 2285.9 278.4

Specific Enthalpy in kJ/kg: 2444.7 5272.6

Specific Entropy in kJ/(kgK): 5.0750 6.4887

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 1.7615 2.2574

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): .7673 1.1114

Viscosity in kg/(ms): .0001040

Thermal Conductivity in W/(mK): 23.2044

Surface tension in N/m: .039499

Do you want another go? (y/n) n

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties  
of the Sodium Substance at Saturation;  
An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 80  
Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 80.000

Temperature in C: 1727.238

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0019852 .6242776E-01

Internal Energy in kJ/kg: 2285.9 278.4

Specific Enthalpy in kJ/kg: 2444.7 5272.6

Specific Entropy in kJ/(kgK): 5.0750 6.4887

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 1.7615 2.2574

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): .7673 1.1114

Viscosity in kg/(ms): .0001040 N/A

Thermal conductivity in W/(mK): 23.2044 N/A

Surface tension in N/m: .039499 .039499

Do you want another go?(Y/N) n

SODIUM LI.S.F. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Sodium Substance at Saturation;

An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 160  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 160.000

Temperature in C: 1997.785

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0024964

Internal Energy in kJ/kg: 2578.5

433.1

Specific Enthalpy in kJ/kg: 2977.9

5207.4

Specific Entropy in kJ/(kgK): 5.3160

6.2977

Specific Heat at

constant pressure in kJ/(kgK): 2.4749

3.6391

Specific Heat at

constant volume in kJ/(kgK): .8286

1.2739

Viscosity in kg/(ms): .0000957

12.3353

Thermal Conductivity in W/(mK):

.016575

Surface tension in N/m:

.016575

Do you want another go?(y/n) n

SODIUM LI.S.P. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Sodium Substance at Saturation;

An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 230  
 Please enter desired temperature in C: 0

Pressure in bars: 230.000

Temperature in C: 2172.554

This is a saturation state, or almost a saturation state

LIQUID

VAPOR

Specific Volume in m<sup>3</sup>/kg: .0032977

Internal Energy in kJ/kg: 2751.1

Specific Enthalpy in kJ/kg: 3509.6

Specific Entropy in kJ/(kgK): 5.5322

Specific Heat at constant pressure in kJ/(kgK): 5.5317

Specific Heat at constant volume in kJ/(kgK): 1.5934

Viscosity in kg/(ms): .0000913

Thermal Conductivity in W/(mK): 3.4215

Surface tension in N/m: .003467

Do you want another go?(y/n) n

National Technical University of Athens  
Department of Mechanical Engineering  
Nuclear Engineering Section

SODIUM LI.S.P. (R)

SODIUM LIQUID AND STEAM PROPERTIES PACKAGE

(Thermodynamic and Transport Properties

of the Sodium Substance at Saturation;

An interactive approach)

Version 1 - SEPTEMBER 1999

Author:NICK PETROPOULOS <C:1999>

This version of the code accepts

as input only pressure and temperature.

(range: 1.5E-10 - 256.4 bar, 97.85 - 2230.55 C)

To obtain the saturation properties

equal either pressure or temperature to zero

for the desired temperature or pressure,

respectively).

Please enter desired pressure in bars: 300  
Please enter desired temperature in C: 0

Desired pressure out of range!



### III.4 Λεπτομερής παρουσίαση του κώδικα.

Παρουσιάζονται στη συνέχεια όλα τα υποπρογράμματα του κώδικα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εξέταση των υπορουτινών SODIUM\_LISP, CHECKPT και TOTAL, οι οποίες είναι τα μεγαλύτερα υποπρογράμματα. Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα (υπορουτίνες -subroutines και συναρτήσεις -functions) παρουσιάζονται συνοπτικότερα. Το σύνολο των υποπρογραμμάτων παρουσιάζεται κατά το δυνατόν με τη σειρά που χρησιμοποιούνται στον κώδικα. Οι κυριότερες συνιστώσες της παρουσίασης κάθε υποπρογράμματος είναι:

- α. Μεταβλητές εισόδου
- β. Μεταβλητές εξόδου
- γ. Τοπικές μεταβλητές
- δ. Μορφολογικά χαρακτηριστικά υποπρογράμματος (εξαρτημένο, ανεξάρτητο ή άλλο, προαιρετικό ή απαραίτητο)
- ε. Υποπρογράμματα που καλούν το παρουσιαζόμενο υποπρόγραμμα και
- στ. Υποπρογράμματα που καλεί το παρουσιαζόμενο υποπρόγραμμα

Σημειώνεται ότι δεν είναι σκόπιμη -και ως εκ τούτου δε γίνεται- η εξέταση του υποδείγματος κυρίως προγράμματος εφαρμογής EXAMPLE (FORTRAN main program). Ο χρήστης του κώδικα που θα θελήσει να πειραματισθεί με αυτό μπορεί πολύ εύκολα να το χρησιμοποιήσει, έχοντας βέβαια πάντοτε υπόψη τις οδηγίες που δίνονται στο Κεφάλαιο 6, σχετικά με τη σύνδεση ενός κυρίου προγράμματος με τον κώδικα SODIUM\_LISP. Επίσης δεν παρουσιάζονται τα υποπρογράμματα INTEGRAL και DFRIDR, η λογική και η τεχνική των οποίων έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 6 (§ 6.3.2). Επιπλέον δεν παρουσιάζεται το blockdata CONSTANTS. Αλλά κατά την εξέταση κάθε υποπρογράμματος, αν τύχει να υπάρξει μεταβλητή εισόδου (σταθερή), η οποία να προέρχεται από το εν λόγω blockdata αυτό σημειώνεται με κατάλληλο τρόπο. Υπενθυμίζεται ότι το blockdata CONSTANTS επικοινωνεί με τον υπόλοιπο κώδικα με τη βοήθεια COMMON εντολών.

Επισημαίνεται πάντως ότι για τη σύνδεση ενός κυρίου προγράμματος όπως το EXAMPLE, με τον κώδικα SODIUM\_LISP -όταν ο κώδικας εργάζεται κάτω από

λειτουργικό σύστημα UNIX, πρέπει να χρησιμοποιείται ένα αρχείο κατασκευής εκτελέσιμου προγράμματος εφαρμογής, το ονομαζόμενο **makefile**. Το **makefile** αυτό αναλαμβάνει σε γενικές γραμμές τη σύνδεση (**linking**) των επιτυχώς μεταφρασμένων υποπρογραμμάτων του κώδικα **SODIUM\_LISP** (των **object files**) μεταξύ τους καθώς και με τις εσωτερικές συναρτήσεις της γλώσσας FORTRAN ή ακόμα -αν είναι επιθυμητό- με το **object file** που περιέχει το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη σε ένα εννιαίο εκτελέσιμο πρόγραμμα εφαρμογής (**executable application program**). Υπόδειγμα τέτοιου **makefile** περιλαμβάνεται στο αρχείο **makefile1**<sup>1</sup>. Στο υπόδειγμα αυτό το εκτελέσιμο πρόγραμμα φέρει τη συμβολική ονομασία "eri", η οποία φυσικά μπορεί να αλλάξει σύμφωνα με τις κατά καιρούς απαιτήσεις του χρήστη. Δεύτερο υπόδειγμα τέτοιου **makefile** περιλαμβάνεται στο αρχείο **makefile2**<sup>2</sup>. Η ιδιοποιός διαφορά αυτού του **makefile** από το προαναφερθέν **makefile1** εντοπίζεται στο ότι το **makefile2** διεκπεραιώνει πρώτα τη μετάφραση (**compilation**) των **source files**, στα οποία εμπεριέχονται τα υποπρογράμματα του κώδικα σε γλώσσα FORTRAN. Στη συνέχεια προχωράει στο **linking** των δημιουργούμενων **object files** και συγκροτεί τέλος το ζητούμενο εκτελέσιμο πρόγραμμα με το όνομα "eri". Φυσικά κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα, βαισιζόμενος πάντα στα υποδείγματα **makefile1-2**, να δημιουργήσει εκείνα τα **makefiles** που τον εξυπηρετούν καλύτερα.

### III.4.1 Η υπορουτίνα **SODIUM\_LISP**.

**Μεταβλητές εισόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

#### στη λίστα παραμέτρων

- JS (πρέπει να έχει πάντα την τιμή 1)
- JP (πρέπει να έχει πάντα ακέραια τιμή από 0 έως 63)
- P (πίεση σε bar μέσα στην περιοχή ισχύος του κώδικα ή 0)
- T (θερμοκρασία σε K μέσα στην περιοχή ισχύος του κώδικα ή 0)

#### στις COMMON εντολές

---

<sup>1</sup> Βλέπε την επόμενη παράγραφο.  
<sup>2</sup> Βλέπε την επόμενη παράγραφο.

PC	(κρίσιμη πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K -από το blockdata CONSTANTS)
DC	(κρίσιμη πυκνότητα σε $\text{kgm}^{-3}$ -δεν χρησιμοποιείται)
PP	(πίεση σε bar)
TT	(θερμοκρασία σε K)

στις λίστες παραμέτρων καλούμενων υποπρογραμμάτων

DF	(πυκνότητα του κορεσμένου υγρού σε $\text{kgm}^{-3}$ )
DG	(πυκνότητα του κορεσμένου ατμού σε $\text{kgm}^{-3}$ )

**Μεταβλητές εξόδου (κατά σειρά εμφανίσεως)**

στη λίστα παραμέτρων

P	(πίεση σε bar, αν η P εισόδου ήταν 0 και υπάρχει κατάσταση κορεσμού)
T	(θερμοκρασία σε °C, αν η T εισόδου ήταν 0 και υπάρχει κατάσταση κορεσμού)
TS	(θερμοκρασία κορεσμού σε °C, αν υπάρχει κατάσταση κορεσμού)
JR	(γραμμική κορεσμού στο διάγραμμα P,T, τιμή 6)
IS	(ακέραιες τιμές από 0 έως 1)

στις COMMON εντολές επικοινωνίας

PP	(πίεση σε bar)
PR	(ανηγγμένη πίεση)
TT	(θερμοκρασία σε K)
TR	(ανηγγμένη θερμοκρασία)
J	(=JR, γραμμή κορεσμού στο διάγραμμα P,T)

στην COMMON/PROPERTY1/

SVF, HF, UF, CPF, CVF, SF, IBMF, AF, KF, MF

στην COMMON/PROPERTY2/

SVG, HG, UG, CPG, CVG, SG, IBMG, AG, KG, MG

(AG, KG, MG δεν χρησιμοποιούνται)

στην COMMON/PROPERTY3/

HFG, SIGMAFG, LACFG

Δεν υπάρχουν τοπικές μεταβλητές.

**H SODIUM\_LISP** καλείται από:

Το κυρίως πρόγραμμα του χρήστη.

**H SODIUM\_LISP** καλεί τα υποπρογράμματα του κώδικα:

CHECKPT, FDENSE, FDENSG, TOTAL

H SODIUM\_LISP χαρακτηρίζεται ως μετρίως εξαρτημένο υποπρόγραμμα.

H SODIUM\_LISP είναι απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.

(βλέπε το αρχείο **sodium\_lisp.f**)

### **III.4.2 Η υπορουτίνα CHECKPT.**

Μεταβλητές εισόδου (κατά σειρά εμφανίσεως)

στις COMMON εντολές "/Zi/" -από το blockdata CONSTANTS

PMIN	(ελάχιστη πίεση σε bar για την οποία ισχύει ο κώδικας)
PMAX	(μέγιστη πίεση σε bar για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
PC	(κρίσιμη πίεση σε bar)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
DC	(κρίσιμη πυκνότητα σε $\text{kgm}^{-3}$ -δεν χρησιμοποιείται)

στις COMMON εντολές "/Kj/"

PP	(πίεση σε bar)
TT	(θερμοκρασία σε K)

στις λίστες παραμέτρων καλούμενων υποπρογραμμάτων

IER (δείκτης λάθους που συνέβη στην υπορουτίνα SOLVE)

**Μεταβλητές εξόδου (κατά σειρά εμφάνισέως)**

στη λίστα παραμέτρων

TS	(θερμοκρασία κορεσμού σε K, αν υπάρχει κατάσταση κορεσμού)
JR	(γραμμή κορεσμού στο διάγραμμα PT, JR = 6)
IS	(δείκτης του πόσο κοντά είναι η είσοδος σε μία κατάσταση κορεσμού IS = 0 υπερκρίσιμη πίεση και θερμοκρασία εισόδου IS = 1 υποκρίσιμη πίεση και θερμοκρασία εισόδου)

στις COMMON εντολές επικοινωνίας

PP	(πίεση σε bar)
PR	(ανηγμένη πίεση)
TT	(θερμοκρασία σε K)

TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

### **Τοπικές Μεταβλητές**

EPS, NDEC, ITMAX

(χρήσιμες για την κλήση της υπορουτίνας SOLVE)

### **Η CHECKPT καλείται από:**

Την υπορουτίνα SODIUM\_LISP

### **Η CHECKPT καλεί τα υποπρογράμματα του κώδικα:**

FFPS, FPS, FTS, DFPS, και SOLVE

Η CHECKPT χαρακτηρίζεται ως **μετρίως εξηρημένο υποπρόγραμμα**.

Η CHECKPT είναι **απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα**.

(βλέπε το αρχείο **checkpt.f**)

### **III.4.3 Η υπορουτίνα TOTAL.**

**Μεταβλητές εισόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

στη λίστα παραμέτρων

JP (διακόπτης που καθορίζει ποιές από τις θερμοφυσικές ιδιότητες θα υπολογισθούν, JP = 1 έως 63)

HF, UF, CPE, CVE, SF, IBMF, AF, KF, MF

HG, UG, CPG, CVG, SG, IBMG, AG, KG, MG, SIGMAFG

(στην είσοδο όλες οι παραπάνω μεταβλητές έχουν μηδενική τιμή, εκτός από τις AG, KG, MG οι οποίες έχουν την αλφαριθμητική τιμή "N/A", που δηλώνει ότι η ταχύτητα του ήχου, η θερμική αγωγιμότητα και η δυναμική συνεκτικότητα του κορεσμένου ατμού αντίστοιχα, δεν μπορεί να προσδιορισθεί από τον παρόντα κώδικα)

#### στις COMMON εντολές

**J** (γραμμή κορεσμού στο διάγραμμα PT, J = 6)

**JPC1, JPC2, JPC3, JPC4**

(πίνακες από το blockdata CONSTANTS που περιέχουν σταθερές, οι οποίες διευκολύνουν τους χειρισμούς που πρέπει να γίνουν από την TOTAL για να ικανοποιηθεί το αίτημα του χρήστη που υποβλήθηκε με τον διακόπτη JP)

**Μεταβλητές εξόδου** (κατά σειρά εμφανίσεως)

#### στη λίστα παραμέτρων

**HF, UF, CPF, CVF, SF, IBMF, AF, KF, MF**  
**HG, UG, CPG, CVG, SG, IBMG, SIGMAFG**

**Τοπικές Μεταβλητές**

**I** (δείκτης για επαναληπτικές διαδικασίες)

**H TOTAL καλείται από:**

Την υπορουτίνα SODIUM\_LISP

**H TOTAL καλεί τα υποπρογράμματα του κώδικα:**

**ENTHALPYF, ENTHALPYG, ENTROPYF, ENTROPYG, SHF, SHG, SIBMF, SIBMG, SOVEF, VISCOSITYF, CONDUCTIVEF, TENSION**

(Το πόσα από αυτά τα υποπρογράμματα θα κληθούν ή όχι εξαρτάται από την τιμή του δείκτη JP).

Η TOTAL χαρακτηρίζεται ως **μετρίως εξηρητημένο υποπρόγραμμα**.

Η TOTAL είναι **πρωιμετικό υποπρόγραμμα του κώδικα**.

(βλέπε το αρχείο **total.f**)

#### **III.4.4 Τα υπόλοιπα υποπρογράμματα.**

##### **III.4.4.1 Η function FTS.**

[στο αρχείο **fts.f** -υλοποίηση της εξίσωσης (3-64), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

PP (πίεση σε bar)

A,B,C [σταθερές της εξίσωσης (3-64)]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: PPP (πίεση σε MPa)

(η function καλείται από την υπορουτίνα CHECKPT και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

##### **III.4.4.2 Η function FPS.**

[στο αρχείο **fps.f** -υλοποίηση της εξίσωσης (3-62), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]



Μεταβλητές εισόδου:

TS (θερμοκρασία κορεσμού σε K)  
PP (πίεση σε bar)

AA, BB, CC

[σταθερές για την εξίσωση (3-62) από το blockdata CONSTANTS]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η function καλείται στην υπορουτίνα CHECKPT και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

**III.4.4.3 Η function FPS.**

[στο αρχείο ffps.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-62), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TS (θερμοκρασία κορεσμού σε K)

AA, BB, CC

[σταθερές για την εξίσωση (3-62) από το blockdata CONSTANTS]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα CHECKPT- και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### III.4.4.4 Η function DFPS.

[στο αρχείο dfps.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-63), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

Μεταβλητές εισόδου:

TS (θερμοκρασία κορεσμού σε K)

AA, BB, CC

[σταθερές για την εξίσωση (3-63) από το blockdata CONSTANTS]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η function καλείται από την υπορουτίνα SOLVE -στην υπορουτίνα CHECKPT- και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### III.4.4.5 Η function DFPS1000.

[στο αρχείο dfps1000.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-63), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

Μεταβλητές εισόδου:

TS (θερμοκρασία κορεσμού σε K)

AA, BB, CC

[σταθερές για την εξίσωση (3-63) από το blockdata CONSTANTS]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

#### Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η function καλείται από τις υπορουτίνες SIBMF, SHF και SHG και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **III.4.4.6 Η function FDENSF.**

[στο αρχείο fdensf.f – υλοποίηση της εξίσωσης (3-66), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

#### Μεταβλητές εισόδου:

- TT (θερμοκρασία κορεσμού σε K)
- PC (κρίσιμη πίεση σε bar –δεν χρησιμοποιείται)
- TC (κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
- DC (κρίσιμη πυκνότητα σε  $\text{kgm}^{-3}$ )
- F [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-66) από το blockdata CONSTANTS]

#### Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

#### Τοπικές μεταβλητές: TR (ανηγμένη θερμοκρασία κορεσμού)

(η υπορουτίνα καλείται από την SODIUM\_LISP και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **III.4.4.7 Η function FDENSG.**

[στο αρχείο fdensg.f – υλοποίηση της εξίσωσης (3-84), (μετρίως εξηρητημένο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

#### Μεταβλητές εισόδου:

- TT (θερμοκρασία κορεσμού σε K)

- PC (κρίσιμη πίεση σε bar -δεν χρησιμοποιείται)  
 TC (κρίσιμη θερμοκρασία σε K)  
 DC (κρίσιμη πυκνότητα σε  $\text{kgm}^{-3}$  -δεν χρησιμοποιείται)  
 G [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-84) από το blockdata CONSTANTS]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: TR (ανηγγεμένη θερμοκρασία κορεσμού)

(η υπορουτίνα καλείται από την SODIUM\_LISP και καλεί το υποπρόγραμμα FDENSEF)

#### III.4.4.8 Η υπορουτίνα SOLVE.

[στο αρχείο solve.f -υλοποίηση της αριθμητικής μεθόδου Newton - Raphson (ανεξάρτητο, απαραίτητο υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

- F [συνάρτηση  $F \equiv f(x) = 0$ , πεπλεγμένη ως προς  $x$ , για την οποία ζητείται ρίζα( $-\epsilon_s$ )  $x$ ]  
 DF [παράγωγος  $df(x)/dx$ ]  
 EPS [κριτήριο σύγκλισης, μία ρίζα  $x$  γίνεται αποδεκτή αν είναι  $|f(x)| \leq \text{EPS}$ ]  
 NDEC (κριτήριο σύγκλισης, μία ρίζα  $x$  γίνεται αποδεκτή αν δύο διαδοχικές προσεγγίσεις της συμφωνούν στα NDEC πρώτα δεκαδικά τους ψηφία)  
 X (αρχική προσέγγιση της ζητούμενης ρίζας)  
 ITMAX (μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων)

*(Σημείωση: Στις περισσότερες από τις περιπτώσεις υπολογισμών που έγιναν με τον κώδικα SODIUM\_LISP η ζητούμενη ρίζα  $x$  βρέθηκε σε λιγότερες από 40 επαναλήψεις.*

*Εξαιρείται συνήθως η γειτονιά του κρίσιμου σημείου και ορισμένες περιοχές στην υψηλή*

φάση. Όπως όμως και να έχει το πράγμα η υπορουτίνα SOLVE περιορίζει εσωτερικά τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό επαναλήψεων στις 100. Αν δηλαδή ο χρήστης έχει ζητήσει κατά την κλήση της υπορουτίνας να είναι ITMAX >100, το αίτημά του αυτό αγνοείται. Συνήθεις τιμές για τις μεταβλητές εισόδου EPS, NDEC και ITMAX είναι οι  $10^{-5}$ , 5 και 100 αντίστοιχα.)

Μεταβλητές εξόδου:

X (ζητούμενη ρίζα x)  
IER (προειδοποιητική παράμετρος λάθους)

(Σημείωση: Αν επιτευχθεί η εύρεση της ζητούμενης ρίζας x τότε επιστρέφεται IER = 0. Αν η ζητούμενη ρίζα x δεν είναι δυνατόν να βρεθεί επειδή η παράγωγος DF παίρνει κάποια στιγμιά τιμή που είναι "πολύ κοντά" στο 0, τότε επιστρέφεται IER = 1 και X = 111111. Αν η ζητούμενη ρίζα x δεν είναι δυνατόν να βρεθεί επειδή χρειάζονται για αυτό περισσότερες από ITMAX επαναλήψεις, τότε επιστρέφεται IER = 2 και X = 222222. Αν η ζητούμενη ρίζα x δεν είναι δυνατόν να βρεθεί επειδή συμβαίνουν και τα δύο αυτά ατυχή γεγονότα, τότε επιστρέφεται IER = 3 και X = 111111 ή X = 222222.)

Τοπικές μεταβλητές:

K (δείκτης για την επαναληπτική διαδικασία)  
TOL (κριτήριο σύγκλισης)

(Σημείωση: Σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν  $|x_k - x_{k-1}| \leq TOL$ . Η τιμή της TOL είναι  $10^{-NDEC}$  για τις επαναλήψεις από 1 έως 40,  $10^{-(NDEC-1)}$  για τις επαναλήψεις από 41 έως 60,  $10^{-(NDEC-2)}$  για τις επαναλήψεις από 61 έως 80 και  $10^{-(NDEC-3)}$  για τις επαναλήψεις από 81 έως 100. Στις λίγες περιπτώσεις όπου οι επαναλήψεις ξεπερνούν τις 40 - γειτονιά του κρισίμου σημείου κτλ- η ζητούμενη ρίζα x που τελικά υπολογίζεται με την αυξημένη ανοχή TOL είναι η καλύτερη που μπορεί να ληφθεί από τις κάθε φορά συναρτήσεις προς επίλυση.)

Η υπορουτίνα SOLVE καλείται από την υπορουτίνα CHECKRT και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα. Αναλυτικότερα καλείται από την υπορουτίνα CHECKRT με σκοπό

την επίλυση της εξισώσεως κορεσμού [function FFPS -σχέση (3-62)] ως προς τη θερμοκρασία κορεσμού αν το μόνο δεδομένο είναι η πίεση κορεσμού. Η προσέγγιση της λύσης δίνεται από την function FTS -σχέση (3-64)- ενώ η παράγωγος της συνάρτησης FFPS υπολογίζεται στην function DFPS -σχέση (3-63).

#### III.4.4.9 Η υπορουτίνα ENTHALPYF.

[στο αρχείο enthalpyf.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-74), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
H	[πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-74) από το blockdata CONSTANTS]
PP	(πίεση σε bar)
TT	(θερμοκρασία κορεσμού σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: HF (ειδική ενθαλπία του κορεσμένου υγρού σε kJ/kg), UF (ειδική εσωτερική ενέργεια του κορεσμένου υγρού σε kJ/kg)

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και καλεί το υποπρόγραμμα FDENSF)

#### III.4.4.10 Η υπορουτίνα ENTHALPYG.

[στο αρχείο enthalpyg.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-90), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα.)]

Μεταβλητές εισόδου:

TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
H	[πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-74) από το blockdata CONSTANTS]
PP	(πίεση σε bar)
TT	(θερμοκρασία κορεσμού σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: HG (ειδική ενθαλπία του κορεσμένου ατμού σε kJ/kg), UI (ειδική εσωτερική ενέργεια του κορεσμένου ατμού σε kJ/kg)

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και καλεί το υποπρόγραμμα FDENSG)

#### III.4.4.11 Η υπορουτίνα ENTROPYF.

[στο αρχείο entpropy.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-82) και (3-83), (μετρώως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
E	[πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-82) από το blockdata CONSTANTS]
PP	(πίεση σε bar)
TT	(θερμοκρασία κορεσμού σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: SF [ειδική εντροπία του κορεσμένου υγρού σε kJ/(kgK)]

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και καλεί το υποπρόγραμμα CF μέσω της υπορουτίνας INTEGRAL)

#### III.4.4.12 Η υπορουτίνα ENTROPYG.

[στο αρχείο entropyg.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-97) και (3-98), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

G [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-98) από το blockdata  
CONSTANTS]  
TT (θερμοκρασία κορεσμού σε K)  
TR (ανηγμένη θερμοκρασία)  
SF [ειδική εντροπία του κορεσμένου υγρού σε kJ/(kgK)]

Μεταβλητές εξόδου: SG [ειδική εντροπία του κορεσμένου ατμού σε kJ/(kgK)]

Τοπικές μεταβλητές: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και καλεί την υπορουτίνα ENTROPYF)

#### III.4.4.13 Η υπορουτίνα SHF.

[στο αρχείο shf.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-78) και (3-79), χρησιμοποιούνται επιπλέον και οι εξισώσεις (3-68) έως και (3-72), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TMIN (ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)  
TMAX (μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)



PC	(κρίσιμη πίεση σε bar –δεν χρησιμοποιείται)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
DC	(κρίσιμη πυκνότητα σε $\text{kgm}^{-3}$ –δεν χρησιμοποιείται)
BETA, KAM	[σταθερές για την εξίσωση (3-69) από το blockdata CONSTANTS]
F	[πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-68) από το blockdata CONSTANTS]
TT	(θερμοκρασία κορεσμού σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: CPF [ειδική θερμοχωρητικότητα του κορεσμένου υγρού υπό σταθερή πίεση σε  $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ], CVF [ειδική θερμοχωρητικότητα του κορεσμένου υγρού υπό σταθερό όγκο σε  $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ]

Τοπικές μεταβλητές:

AF	[ισόθλιπτη διαστολικότητα σε $\text{K}^{-1}$ -σχέση (3-68)]
KAF	[αδιαβατική συμπίεστικότητα σε $\text{MPa}^{-1}$ -σχέση (3-69)]
THETA	[ποσότητα αναγκαία για τον υπολογισμό της KAF -σχέση (3-70)]
IBMF	[ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα σε $\text{MPa}^{-1}$ -σχέση (3-71)]
BMF1, BMF2	(ενδιάμεσες ποσότητες αναγκαίες για τον υπολογισμό της IBMF1)
APF	[συντελεστής θερμικής διαστολής σε $\text{K}^{-1}$ – σχέση (3-72)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και καλεί τα υποπρογράμματα FDENSEF, DFPS, DFPS1000 και CF)

**III.4.4.14 Η υπορουτίνα SHV.**

[στο αρχείο shv.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-96) και (3-97), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
PC	(κρίσιμη πίεση σε bar –δεν χρησιμοποιείται)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
DC	(κρίσιμη πυκνότητα σε $\text{kgm}^{-3}$ -δεν χρησιμοποιείται)
TP	[πίνακας σταθερών για τον προσδιορισμό της αναγκαίας για τους υπολογισμούς ποσότητας που δίνεται από τη σχέση (3-63) –από το blockdata CONSTANTS]
A1,B1,C1,D1	[σταθερές για τον προσδιορισμό της αναγκαίας για τους υπολογισμούς ποσότητας που δίνεται από τη σχέση (3-94) –από το blockdata CONSTANTS]
A2,B2,C2,D2	[σταθερές που δεν χρησιμοποιούνται –από το blockdata CONSTANTS]

Μεταβλητές εξόδου: CPG [ειδική θερμοχωρητικότητα του κορεσμένου ατμού υπό σταθερή πίεση σε  $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ], CVG [ειδική θερμοχωρητικότητα του κορεσμένου ατμού υπό σταθερό όγκο σε  $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ]

Τοπικές μεταβλητές:

E2,F2,G2	[σταθερές για τον προσδιορισμό της αναγκαίας για τους υπολογισμούς ποσότητας που δίνεται από τη σχέση (3-94)]
A3,B3,C3,D3	[σταθερές για τον προσδιορισμό της αναγκαίας για τους υπολογισμούς ποσότητας που δίνεται από τη σχέση (3-95)]
CG	[ειδική θερμοχωρητικότητα του κορεσμένου ατμού σε $\text{kJ}/(\text{kgK})$ – σχέσεις (3-94) και (3-95)]
AG	[ισόθλιπτη διαστολικότητα σε $\text{K}^{-1}$ – σχέση (3-85)]
GAMMAV	[ποσότητα που υπολογίζεται από τις εξισώσεις (3-89) και (3-90)]
APG	[συντελεστής θερμικής διαστολής σε $\text{K}^{-1}$ – σχέση (3-87)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και καλεί τα υποπρογράμματα FDENSG, DFPS1000, DFRIDR και DFPS)

### III.4.4.15 Η υπορουτίνα SIBMF.

[στο αρχείο sibmf.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-71), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

#### Μεταβλητές εισόδου:

TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
PC	(κρίσιμη πίεση σε bar –δεν χρησιμοποιείται)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
DC	(κρίσιμη πυκνότητα σε $\text{kgm}^{-3}$ –δεν χρησιμοποιείται)
BETA, KAM	[σταθερές για την εξίσωση (3-69) από το blockdata CONSTANTS]
F	[πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-68) από το blockdata CONSTANTS]
TT	(θερμοκρασία κορεσμού σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: IBMF (ισοθερμοκρασιακή συμπεσότητα του κορεσμένου υγρού σε  $\text{MPa}^{-1}$ )

#### Τοπικές μεταβλητές:

AF	[ισόθλιπτη διαστολικότητα σε $\text{K}^{-1}$ -σχέση (3-68)]
KAF	[αδιαβατική συμπεσότητα σε $\text{MPa}^{-1}$ -σχέση (3-69)]
THETA	[ποσότητα αναγκαία για τον υπολογισμό της KAF -σχέση (3-70)]
IBMF	[ισοθερμοκρασιακή συμπεσότητα σε $\text{MPa}^{-1}$ -σχέση (3-71)]
BMF1, BMF2	(ενδιάμεσες ποσότητες αναγκαίες για τον υπολογισμό της IBMF1)

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και καλεί τα υποπρογράμματα FDENSE, DFPS, DFPS1000 και CF)

#### III.4.4.16 Η function CF.

[στο αρχείο cf.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-76) και (3-77), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
PC	(κρίσιμη πίεση σε bar –δεν χρησιμοποιείται)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
DC	(κρίσιμη πυκνότητα σε $\text{kgm}^{-3}$ -δεν χρησιμοποιείται)
TT	(θερμοκρασία κορεσμού σε K)
A1,B1,C1,D1	[σταθερές για τον προσδιορισμό της αναγκαίας για τους υπολογισμούς ποσότητας που δίνεται από τη σχέση (3-76) –από το blockdata CONSTANTS]
A2,B2,C2,D2	[σταθερές για τον προσδιορισμό της αναγκαίας για τους υπολογισμούς ποσότητας που δίνεται από τη σχέση (3-77) –από το blockdata CONSTANTS]

Μεταβλητές εξόδου: ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ

Τοπικές μεταβλητές: TR (ανηγμένη θερμοκρασία)

(η function καλείται από την ENTROPYF, την SHF και την SIBMF και καλεί τα υποπρογράμματα FDENSF και DFPS)

#### III.4.4.17 Η υπορουτίνα SIBMG.

[στο αρχείο sibmg.f -υλοποίηση της εξίσωσης (3-86), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
------	--

TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
PC	(κρίσιμη πίεση σε bar –δεν χρησιμοποιείται)
TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
DC	(κρίσιμη πυκνότητα σε $\text{kgm}^{-3}$ -δεν χρησιμοποιείται)
TP	[πίνακας σταθερών για τον προσδιορισμό της αναγκαίας για τους υπολογισμούς ποσότητας που δίνεται από τη σχέση (3-63) –από το blockdata CONSTANTS]
TT	(θερμοκρασία κορεσμού σε K)
TR	(ανηγγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: IBMG (ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του κορεσμένου ατμού σε  $\text{MPa}^{-1}$ )

Τοπικές μεταβλητές:

AG	[ισόθλιπτη διαστολικότητα σε $\text{K}^{-1}$ – σχέση (3-85)]
GAMMAV	[ποσότητα που υπολογίζεται από τις εξισώσεις (3-89) και (3-90)]
APG	[συντελεστής θερμικής διαστολής σε $\text{K}^{-1}$ – σχέση (3-87)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και καλεί τα υποπρογράμματα DFRIDR, FDENSG και DFPS)

### III.4.4.18 Η υπορουτίνα SOVEF.

[στο αρχείο sovef.f -υλοποίηση των εξισώσεων (3-80) και (3-81), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου:

TMIN	(ελάχιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
TMAX	(μέγιστη θερμοκρασία σε K για την οποία ισχύει ο κώδικας)
PC	(κρίσιμη πίεση σε bar –δεν χρησιμοποιείται)

TC	(κρίσιμη θερμοκρασία σε K)
DC	(κρίσιμη πυκνότητα σε $\text{kgm}^{-3}$ -δεν χρησιμοποιείται)
BETA, KAM	[σταθερές για την εξίσωση (3-69) από το blockdata CONSTANTS]
TT	(θερμοκρασία κορεσμού σε K)
TR	(ανηγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: AF (ταχύτητα του ήχου στην υγρή φάση σε m/sec)

Τοπικές μεταβλητές:

A	[πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-80)]
KAF	[αδιαβατική συμπίεσιότητα σε $\text{MPa}^{-1}$ -σχέση (3-69)]
THETA	[ποσότητα αναγκαία για τον υπολογισμό της KAF -σχέση (3-70)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και καλεί το υποπρόγραμμα FDENSEF)

#### III.4.4.19 Η υπορουτίνα VISCOSITYF.

[στο αρχείο viscosity.f -ύλοποίηση της εξίσωσης (3-50), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: TT (θερμοκρασία σε K), TR (ανηγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)

Μεταβλητές εξόδου: MF [δυναμική συνεκτικότητα της υγρής φάσης σε Pas]

Τοπικές μεταβλητές:

M	[πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-101)]
---	--

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### III.4.4.20 Η υπορουτίνα CONDUCTIVEF.

[στο αρχείο conductive.f -ύλοποίηση της εξίσωσης (3-100), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: TT (θερμοκρασία σε K), TR (ανηγγμένη θερμοκρασία -δεν χρησιμοποιείται)

Μεταβλητές εξόδου: KF [θερμική αγωγιμότητα της υγρής φάσης σε W/(mK)]

Τοπικές μεταβλητές:

K [πίνακας σταθερών για την εξίσωση (3-100)]

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)

#### **III.4.4.21 Η υπορουτίνα TENSION.**

[στο αρχείο tension.f -ύλοποίηση της εξίσωσης (3-102), (μετρίως εξηρητημένο, προαιρετικό υποπρόγραμμα του κώδικα)]

Μεταβλητές εισόδου: TT (θερμοκρασία σε K-δεν χρησιμοποιείται), TR (ανηγγμένη θερμοκρασία)

Μεταβλητές εξόδου: SIGMAFG (επιφανειακή τάση σε N/m)

Τοπικές μεταβλητές:

SIGMA0 [σταθερή για την εξίσωση (3-102)]

N (ομοίως)

(η υπορουτίνα καλείται από την TOTAL και δεν καλεί κανένα υποπρόγραμμα)





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

### ΑΡΧΕΙΑ ΣΕ ΓΛΩΣΣΕΣ HTML ΚΑΙ PERL

#### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

IV.1 Χρησιμοποιούμενα αρχεία σε γλώσσες HTML και PERL.....	1
IV.1.1 properties.html .....	1
IV.1.2 legal.html.....	2
IV.1.3 lightweight.html .....	4
IV.1.4 light_calculus.html.....	8
IV.1.5 light.cgi.....	9
IV.1.6 clean .....	16
IV.1.7 heavywater.html .....	16
IV.1.8 heavy_calculus.html.....	19
IV.1.9 heavy.cgi .....	20
IV.1.10 cleanh .....	28
IV.1.11 sodium.html.....	28
IV.1.12 sodium_calculus.html.....	30
IV.1.13 sodium.cgi.....	31
IV.1.14 cleans.....	39



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

### ΑΡΧΕΙΑ ΣΕ ΓΛΩΣΣΕΣ HTML ΚΑΙ PERL

#### IV.1 Χρησιμοποιούμενα αρχεία σε γλώσσες HTML και PERL.

Παρατίθεται τα κείμενα των σχετικών αρχείων

##### IV.1.1 *properties.html*

```
<HTML>
<HEAD>
<TITLE>
Two phase flow heat transfer in Nuclear Reactors with emphasis to transient
phenomena
</TITLE>
</HEAD>
<BODY BGCOLOR=#FFFFFF TEXT=#000000>
<FONT SIZE=4>
<B><I>
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
</I></B></FONT>
<FONT SIZE=5>
<BR>
<B><I>
Nuclear Engineering Section
</I></B></FONT>
<HR SIZE=3 WIDTH=430 ALIGN=Left ALIGN=TOP NOSHADE >
<BR>
<BR>
<BR>
<BR>
<CENTER>
<B>
<FONT SIZE=5>
CODES FOR THE CALCULATION OF</FONT></B>
<p>
<B>
<FONT SIZE=5>
THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES</FONT></B></CENTER></p>
<CENTER>
<FONT SIZE=5>
<B>OF NUCLEAR REACTOR COOLANTS</B></FONT></CENTER></p>
<?>
<CENTER>
{#169&nbsp;2003: Petropoulos N.P., PhD Thesis, <BR>
Nuclear Engineering Section, Mechanical Engineering School,<BR>
National Technical University of Athens, Athens, 2003)
</CENTER>
</P>
<HR SIZE=3 WIDTH=500 ALIGN=CENTER ALIGN=TOP NOSHADE >
<BR>
<BR>
<FONT SIZE=4>
1. <a href="lightwater.html"> Light (Ordinary) Water</a>
```

```

<BR><BR>
2. <a href="heavywater.html"> Heavy Water</a>
<BR><BR>
3. <a href="sodium.html"> Saturated Sodium Liquid & Vapour</a>
<BR><BR>
4. <a href="tritiumoxide.html"> Tritium Oxide</a> (under Construction)
</B>
</font>
<p><i><font size="2"> <a href="legal.html">Legal Notices and Privacy Statement,
Release Notes, Copyright, Disclaimer</a>&nbsp;&nbsp;&nbsp;</font></i>
</p>
<p><font size="4"><em><a href="http://arcas.nuclear.ntua.gr">The NES-NTUA Home
Page</a></em></font>
</p>
<p><font size="4"><em><a href="http://www.ntua.gr">The NTUA Home</a></em></font>
</p>
</BODY>
</HTML>

```

#### **IV.1.2 legal.html**

```

<html>
<head>
<meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=windows-1252">
<meta name="GENERATOR" content="Microsoft FrontPage 4.0">
<meta name="ProgId" content="FrontPage.Editor.Document">
<title>New Page 1</title>
</head>
<body>
<font size=4>
<B><I>
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
</I></B></FONT>
<font size="4"><b><i>ATHENS</i></b></font>
<font size=5>
<BR>
<B><I>
Nuclear Engineering
</I></B></FONT>
<font size="5"><b><i>Section</i></b></font>
<HR SIZE=3 WIDTH=430 ALIGN=left ALIGN=TOP NOSHADE >
<BR>
<BR>
<BR>
<p align="center">
<b><font size="5"> Legal Notices and Privacy Statement, Release Notes, Copyright,
</font></b><b><font size="5">Disclaimer</font></b>&nbsp;&nbsp;&nbsp;
</p>
<hr align="center" width="500" noShade SIZE="3">
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0">&nbsp;&nbsp;&nbsp;
</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0">&nbsp;&nbsp;&nbsp;
</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><font size="2"><b><i>Legal
</i></b></font>
<font size="2"><b><i>Notices</i></b></font>
</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><i><font size="2">Permission to use
Documents
(such as parts of text, code results&nbsp;&nbsp;&nbsp;and other publications) from this server
(&quot;Server&quot;) is granted by Nuclear Engineering Section - National Technical
University of Athens (&quot;NES-NTUA&quot;), provided that:</font></i>

```



```

</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0">
<i><font size="2"><b>Copyright</b></font></i>
</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0">
<i><font size="2">All rights reserved. No part of the contents and/or the results
of these WWW pages may be reproduced or transmitted in any form or by any means
without
written permission.</font></i>
</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0">
&nbsp;
</p>
<p style="margin: 0">
&nbsp;
</p>
<p style="margin: 0">
<i><font size="2"><b>Disclaimer</b></font></i>
</p>
<p style="line-height: 100%; margin: 0"><font size="2"><i>Neither the authors nor
the National Technical University of Athens makes any warranty, expressed or
implied
with respect to the reliability of the above software or the accuracy of any
calculation
results produced herein, including, without limitation, the implied warranties
of&nbsp;
fitness for a particular purpose.</i></font> <font size="2"><i>Neither the authors
nor the National Technical University of Athens shall have any liability for any
damages, whatsoever including consequential, incidental, direct, indirect, special,
and lost profits. In any event the authors and the National Technical University
of Athens entire liability in any manner arising out of these WWW pages shall not
exceed acknowledgement of all serious reported bugs and possible malfunctions under
the link mentioned in the Release Notes paragraph above.</i></font>
</p>
<p>
<font size=4>
<EM>
<a href="properties.html">Back to Properties Home Page</a>
</EM>
</font>
</p>
<p><font size="4"><em><a href="http://arcas.nuclear.ntua.gr">The NES-NTUA Home
</a></em></font>
<font size="4"><em><a href="http://arcas.nuclear.ntua.gr">Page</a></em></font>
</p>
<p><font size="4"><em><a href="http://www.ntua.gr">The NTUA </a></em></font>
<font size="4"><em><a href="http://www.ntua.gr">Home</a></em></font>
</p>
</body>
</html>

```

### IV.1.3 *lightwater.html*

```

<html>
<head>
<meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=windows-1253">
<meta name="GENERATOR" content="Microsoft FrontPage 4.0">
<meta name="ProgId" content="FrontPage.Editor.Document">
<title>New Page 1</title>

```

```

</head>
<body>
<FONT SIZE=4>
<B><I>
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
</I></B></FONT>
<FONT SIZE=5>
<BR>
<B><I>
Nuclear Engineering Section
</I></B></FONT>
<HR SIZE=3 WIDTH=430 ALIGN=left ALIGN=TOP NOSHADE >
<BR>
<BR>
<BR>
<BR>
<CENTER>
<B>
<FONT SIZE=5>
THERMODYNAMIC</FONT></B>
<BR>
<FONT SIZE=5>
AND TRANSPORT PROPERTIES</FONT></B></CENTER>
<p>
<CENTER>
<B>
<FONT SIZE=5>
OF LIGHT (ORDINARY) WATER</FONT>></B></CENTER>></p>
<HR SIZE=3 WIDTH=500 ALIGN=CENTER ALIGN=TOP NOSHADE >
<BR>
<BR>
<p><font size="3"><a href="light_calculus.html">Prepare &amp; Submit Calculation.
Form</a></font></p>
<font size="3">The thermodynamic and transport properties of&nbsp;light water can
be calculated according to the property equations presented in:</font>
<p><b>[1] Keyes F.G., Keenan J.H., Hill P.G. and Moore J.G., <i>&quot;A
Fundamental Equation for Liquid and Vapor Water&quot;</i>, Proceedings of the
7th International Conference on the Properties of Steam, Tokyo, Japan 1968.</b></p>
<p><b>[2] Schmidt E., <i>&quot;Properties of Water and Steam in SI Units&quot;</i>,
Springer-Verlag, 1969.</b></p>
<p><b>[3] Sengers J.V. and Watson J.T.R., <i>&quot;Improved International
Formulations for the Viscosity and Thermal Conductivity of Water
Substance&quot;</i>,
Journal of Physical Chemistry Reference Data, 15(4):1291, 1986.</b></p>
<p><b>[4] Straub J., Rosner N. und Grigull U., &quot;Oberflaechenspannung von
Leichtem und Schwerem Wasser&quot;, Waerme- und Stoffuebertragung, 13:241,
1980.</b></p>
<p>Based&nbsp;mainly on the above references&nbsp;property equations have
been&nbsp;implemented in
the <b>LIGHT_WASP</b> (<b>LIGHT W</b>ater <b>A</b>nd <b>S</b>team
<b>P</b>roperties) FORTRAN 77 code
in the course of&nbsp;the following PhD work (in Greek):</p>
<p><b>Petrooulos N.P., <i>&quot;THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF NUCLEAR POWER
REACTOR COOLANTS: COMPARATIVE STUDY AND CALCULATION CODES&quot;</i>, Nuclear
Engineering Section, Mechanical Engineering Department, National Technical
University of Athens, 2000 (in progress).</b></p>
<p>The set of equations used provide reliable thermodynamic and transport
properties results equivalent to the industrial standard formulation IFC-1967.
The following validity range is covered:</p>
<p class="MsoBodyText" style="margin-top:0cm;margin-right:0cm;margin-bottom:0cm;
margin-left:17.85pt;margin-bottom:.0001pt;text-indent:-17.85pt;mso-list:l5 level1
lfo43;
tab-stops:list 17.85pt" align="center"><span style="mso-ansi-language: EL"
lang="EL">Pressure</span><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">:
0 - 1000 </span><span lang="EN-US" style="mso-ansi-language:EN-US">bar</span><span
lang="EL" style="mso-ansi-language:EL"><o:p>

```

</o:p>  
</span></p>  
<p class="MsoBodyText" style="margin-top:0cm;margin-right:0cm;margin-bottom:0cm;margin-left:17.85pt;margin-bottom:.0001pt;text-indent:-17.85pt;mso-list:l23 level1 lfo44; tab-stops: list 17.85pt" align="center"><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">Temperature:  
0 -1000 <sup>o</sup><o:p>  
</o:p>  
</span></p>  
<p class="MsoBodyText" style="margin:0cm;margin-bottom:.0001pt"><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">&nbsp;  <o:p>  
</o:p>  
</span></p>  
<p class="MsoBodyText" style="margin:0cm;margin-bottom:.0001pt" align="center"><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">A small region at the vicinity of the critical point is excluded:<o:p>  
</o:p>  
</span></p>  
<p class="MsoBodyText" style="margin:0cm;margin-bottom:.0001pt" align="center"><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">&nbsp;  <o:p>  
</o:p>  
</span></p>  
<p class="MsoBodyText" align="center" style="margin:0cm;margin-bottom:.0001pt;text-align:center"><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">|T - T\*|  
</span><span style="mso-char-type: symbol; mso-symbol-font-family: Symbol; font-family: Symbol; mso-ascii-font-family: Times New Roman; mso-hansi-font-family: Times New Roman; mso-ansi-language: EL" lang="EL">f</span><span style="mso-ansi-language: EL" lang="EL">f</span></span><span lang="EL" style="mso-ansi-language: EL">10 K,<span style="mso-spacerun: yes">&nbsp;  </span></span></p>  
- |l| </span><span style="mso-char-type: symbol; mso-symbol-font-family: Symbol; font-family: Symbol; mso-ascii-font-family: Times New Roman; mso-hansi-font-family: Times New Roman; mso-ansi-language: EL" lang="EL">f</span><span style="mso-ansi-language: EL">0.3</span></p>  
<p class="MsoBodyText" style="margin-top:0cm;margin-right:0cm;margin-bottom:0cm;margin-left:17.85pt;margin-bottom:.0001pt;text-indent:-17.85pt;mso-list:l43 level1 lfo45; tab-stops: list 17.85pt">&nbsp;  </p>  
<p class="MsoBodyText" style="margin-top:0cm;margin-right:0cm;margin-bottom:0cm;margin-left:17.85pt;margin-bottom:.0001pt;text-indent:-17.85pt;mso-list:l43 level1 lfo45; tab-stops: list 17.85pt" align="center"><span style="mso-ansi-language: EL">where  
</span><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">\*= 647.27 </span><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">317.763 </span><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">3</span><span><sup></sup><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL">3</span></span></span><span lang="EL" style="mso-ansi-language:EL"></span></p>  
</span></p>  
<p>  
Calculable Properties:</p>  

<i>Specific volume <b>v</b> in m<sup>3</sup>/kg&nbsp;  </td>	<i> Density <b>ρ</b> in kg/m<sup>3</sup></td>
<i> Internal energy <b>u</b> in kJ/kg&nbsp;  </td>	<i> Specific enthalpy <b>h</b> in kJ/kg</td>
<i> Entropy <b>s</b> in kJ/(kgK)</td>	<i> Isobaric heat capacity <b>c</b> in kJ/(kgK)</td>



```

<tr>
  <td width="51%"><i>Isochoric heat capacity <b>c</sub></b></i> in
    kJ/(kgK) <math>\rho</math></i></td>
  <td width="49%"><i>Viscosity <b>\eta</b> in kg/(ms)</i></td>
</tr>
<tr>
  <td width="51%"><i>Thermal
conductivity <b>\lambda</b> in W/(mK)</i></td>
  <td width="49%"><i>Surface tension<b>\sigma</b> in N/m.</i></td>
</tr>
</table>
<p>Code accepts the following input pair:</p>
<p><math>(P,T)</math> in bars and degrees Centigrate respectively.
</p>
<p><a href="light_bug_page.html">Reported Bugs</a></p>
<p><a href="Addendum">Addendum</a></p>
<BR>
<i>This WWW page is maintained regularly to
ensure best performance and error-free accurate calculations for the
thermodynamic and transport properties of light (ordinary) &nbsp; water. All efforts
have been made to ensure that the present &nbsp; code &nbsp; is as accurate implementation as possible of the property equations
included at the above literature.
Authors welcome your comments and suggestions for further improvement along with
any bug reports and they will acknowledge any reported bug in this very page under
the link <a href="light_bug_page.html">reported bugs </a> regardless whether they
are fixed or not.&nbsp;</i>
</p>
<p><math>P</math> Please, contact:</p>
</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0">
<math>P</math>
<a href="mailto:petro@nuclear.ntua.gr">Nick P. Petropoulos</a>
(npetro@nuclear.ntua.gr)</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><math>P</math> Research
Assistant</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><math>P</math> Nuclear Engineering
Section</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><math>P</math> Mechanical
Engineering Dept.</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><math>P</math> National Technical
University of Athens</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><math>P</math> 15780 Athens,
GREECE</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><math>P</math> tel:
+302107722939</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><math>P</math> fax:
+302107722914</p>
<p style="margin-top: 0; margin-bottom: 0"><math>P</math> <a href="http://arcas.nuclear.ntua.gr/">http://arcas.nuclear.ntua.gr/</a></p>
</p>
<i>However,
authors will not try to fix all reported bugs promptly, and they will certainly
not be involved in an effort to improve performance of the property equations in
pressure - temperature regions, where their results are ambiguous or not to be
trusted.&nbsp;</i>
Furthermore, authors cannot accept ANY
responsibility if some or all calculations based on this code may be proven

```

wrong or inadequate. Visitors of this page, who would like to receive free copies of the source code for their own private use or for evaluating purposes are encouraged to place a request at <mailto:npetro@nuclear.ntua.gr>, stating also their intended implementation platform (i.e. FORTRAN make &amp; version, UNIX or Windows based application etc). Not all requests are to be granted.&nbsp;This versior of the software is not commercially available.</font></i>

```
<FONT SIZE=4>
<B>
<BR>
</B>
<BR>
<EM>
<A HREF="properties.html">Back to the Previous Page</A>
</EM>
</p>
</font>
</body>
</html>
```

#### IV.1.4 *light\_calculus.html*

```
<html>
<head>
<title>Light Water Thermophysical Properties</title>
</head>
<body>
<FONT SIZE=4>
<B><I>
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
</I></B></FONT>
<FONT SIZE=5>
<BR>
<B><I>
Nuclear Engineering Section
</I></B></FONT>
<HR SIZE=3 WIDTH=430 ALIGN=Left ALIGN=TOP NOSHADE >
<BR>
<BR>
<BR>
<BR>
<CENTER>
<B>
<FONT SIZE=5>
THERMODYNAMIC</FONT></B>
<B>
<FONT SIZE=5>
AND TRANSPORT PROPERTIES</FONT></B></CENTER>
<p>
<CENTER>
<B>
<FONT SIZE=5>
OF LIGHT (ORDINARY) WATER&nbsp;</FONT></B></CENTER></p>
<p>
<CENTER>
<B>
<FONT SIZE=5>
CALCULATION FORM</FONT></B></CENTER></p>
```

```

<HR SIZE=3 WIDTH=500 ALIGN=CENTER ALIGN=TOP NOSHADE >
<P>To obtain a saturation state:<BR>
<TABLE border=0 >
<TR>
<TD ALIGN="LEFT">a) </TD>
<TD ALIGN="LEFT">Fill the pressure box with zero and the temperature box with the
operation temperature,</TD>
</TR>
<TR COLSPAN=2 >
<TD COLSPAN=2 ALIGN="CENTER">or</TD>
</TR>
<TR>
<TD ALIGN="LEFT">b) </TD>
<TD ALIGN="LEFT">Fill the pressure box with the saturation pressure and the
temperature box with zero.</TD>
</TR>
</TABLE>
<form method="GET" action=".,/light.cgi">
<TABLE>
<TR>
<TD>
<font size="4">Please enter pressure in bars:
</TD>
<TD>
<input type="float" name="press" size="10"></font>
</TD>
</TR>
<TR>
<TD>
<font size="4">Please enter temperature in C:
</TD>
<TD>
<input type="float" name="temp" size="10"></font>
</TD>
</TR>
</TABLE>
<p>&nbsp;</p>
<p><font size="4"><input type="submit" value=" submit " name="submit"
style="font-size: 14pt">
<input type="reset" value="clear form" name="B2" style="font-size:
14pt"></font></p>
</form>
<BR>
</P>
<p>
<BR>
<FONT SIZE=4>
<EM>
<A HREF="lightwater.html">Back to the Previous Page</A>
</EM>
</p>
</font>
</body>
</html>

```

#### IV.1.5 *light.cgi*

```

#!/usr/sbin/perl
#
# Process cgi args - Method GET
#

```

↓**ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΦΟΡΜΑ ΥΠΟΒΟΛΗΣ**↓

```
{  
  $buffer=$ENV{'QUERY_STRING'} ;  
  @pairs=split(/&/,$buffer);  
  @bit=split(/=/,$pairs[0]);  
  $press=$bit[1];  
  @bit=split(/=/,$pairs[1]);  
  $temp=$bit[1];
```

↓**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΡΧΕΙΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ**↓

```
  open (FILE1,">>infile");  
  print FILE1 (" $press\n");  
  print FILE1 (" $temp\n");  
  close(FILE1);
```

↓**ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ**↓

```
$prog = '/users/wnuc/public_html/codes/ioc/lightw';  
  open (CLOUDY, "|$prog");  
  close (CLOUDY);
```

↓**ΑΝΑΓΝΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΑΡΧΕΙΟ**↓

```
  open (FILE1,"<outfile");  
  $prch=<FILE1>;
```

↓**ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΙΘΑΝΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ**↓

```
}  
if( $prch eq "0\n")  
{  
  $prs1=<FILE1>;  
  $prs2=<FILE1>;  
  $prs3=<FILE1>;  
  $prs4=<FILE1>;  
  $prs5=<FILE1>;  
  $prs6=<FILE1>;  
  $prs7=<FILE1>;  
  $prs8=<FILE1>;  
  $prs9=<FILE1>;  
  $prs10=<FILE1>;  
  $prs11=<FILE1>;  
  $prs12=<FILE1>;
```

```
$prs13=<FILE1>;
$prs14=<FILE1>;
$prs15=<FILE1>;
$prs16=<FILE1>;
$prs17=<FILE1>;
$prs18=<FILE1>;
$prs19=<FILE1>;
$prs20=<FILE1>;
$prs21=<FILE1>;
$prs22=<FILE1>;
    $prans1=<FILE1>;
    $prans2=<FILE1>;
    $prans3=<FILE1>;
    $prans4=<FILE1>;
    $prans5=<FILE1>;
    $prans6=<FILE1>;
    $prans6b=<FILE1>;
    $prans7=<FILE1>;
    $prans8=<FILE1>;
    $prans9=<FILE1>;
    $prans10=<FILE1>;
    $prans11=<FILE1>;
    $prans12=<FILE1>;
    $prans13=<FILE1>;
    $prans14=<FILE1>;
    $prans15=<FILE1>;
    $prans16=<FILE1>;
    $prans17=<FILE1>;
    $prans18=<FILE1>;
    $pransi9=<FILE1>;
    $prans20=<FILE1>;
    $prans21=<FILE1>;
    $prans22=<FILE1>;
    $prans23=<FILE1>;
    $prans24=<FILE1>;
    $prans25=<FILE1>;
    $prans26=<FILE1>;
    $prans27=<FILE1>;
    $prans28=<FILE1>;
#    if( $prans27 eq "0\n")
    {
```

```

$prans29=<FILE1>;
$prans30=<FILE1>;
$prans31=<FILE1>;
$prans32=<FILE1>;
$prans33=<FILE1>;
$prans34=<FILE1>;
$prans35=<FILE1>;
$prans36=<FILE1>;
$prans37=<FILE1>;
$prans38=<FILE1>;
$prans39=<FILE1>;
$prans40=<FILE1>;
$prans41=<FILE1>;
$prans42=<FILE1>;
$prans43=<FILE1>;
$prans44=<FILE1>;
$prans45=<FILE1>;
$prans46=<FILE1>;
$prans47=<FILE1>;
$prans48=<FILE1>;
$prans49=<FILE1>;
$prans50=<FILE1>;
$prans51=<FILE1>;
$prans52=<FILE1>;
    if( $prans52 eq "0\n")
    {
    }
    else
    {
        $prans53=<FILE1>;
        $prans54=<FILE1>;
    }
    }
    close(FILE1);
$prog = '/users/wnuc/public_html/codes/clean';
open (CLOUDY, "$prog");
close (CLOUDY);

```

↓**ΔΙΑΓΡΑΦΗ ΑΡΧΕΙΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΑΝ ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΛΑΘΟΣ**↓

↓ΠΡΟΕΓΧΕΙΡΙΑ ΔΙΚΤΥΑΚΗΣ ΣΕΛΙΔΑΣ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ  
ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΑΝ ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΛΑΘΟΣ↓

```
print ("Content-type: text/html\n\n");
print("<HTML>");
print("<TITLE>Results for Light Water</TITLE>");
print("<BODY>");
print("<FONT SIZE=4><CENTER>");
print ("<B>Results for Requested Light Water
Properties</B></CENTER></FONT><BR>");
print("<BR>");
print("<TABLE ALIGN=CENTER BORDER=3>");
print ("<BR><FONT COLOR=#000000><CAPTION ALIGN=CENTER>SUBMITTED
VALUES</CAPTION>");
print("<TR>");
print("<TD><CENTER>$prans1</CENTER></TD></TR>");
print("<TR><TD><CENTER>$prans2</CENTER></TD></TR>");
print("</TABLE><BR><BR>");

print ("<TABLE ALIGN=CENTER BORDER=1 cellpadding=0 cellspacing=0
WIDTH=50%>");
print ("<BR><FONT COLOR=#000000><CAPTION
ALIGN=CENTER>RESULTS</CAPTION>");
print ("<TR colspan=2><TD colspan=2 ALIGN=LEFT>$prans4</TD></TR>");
if( $prans52 eq "0\n")
{
}
else
{
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$prans5</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$prans6</TD></TR>");
}
print ("<TR COLSPAN=2><TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT> </TD></TR>");
print ("<TR COLSPAN=2>");
print ("<TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT><B>$prans7</B></TD>");
print ("</TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$prans9</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$prans10</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$prans11</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$prans12</TD></TR>");
```

```

print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans14</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans16</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans18</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans20</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans22</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans24</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans26</TD></TR>");
if( $prans27 eq "0\n")
{
print      ("<TR COLSPAN=2>");
print      ("<TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT><B>$prans29</B></TD>");
print      ("</TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans32</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans34</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans36</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans38</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans40</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans42</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans44</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans46</TD></TR>");
print      ("<TR><TD
ALIGN=RIGHT>$prans48</TD></TR>");
if( $prans52 eq "1\n")
{
print      ("<TR colspan=2><TD colspan=2 ALIGN=LEFT> <BR></TD></TR>");

```

```

ALIGN=LEFT>$prans13</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans15</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans17</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans19</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans21</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans23</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans25</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans31</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans33</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans35</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans37</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans39</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans41</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans43</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans45</TD><TD
ALIGN=LEFT>$prans47</TD><TD><TD

```



```

print      ("<TR><TD      ALIGN=LEFT>$sprans53</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans54</TD><</TR>" );
)
)
print ("</TABLE>");
print ("<FONT SIZE=4>");
print ("<BR><BR><BR><BR><EM>");
print
print      ("<A
href=http://arcas.nuclear.mech.ntua.gr/codes/light_calculus.html>");
print ("Back to Calculation Form</A>");
print ("</EM>");
print ("</BODY>");
}
else

```

**↓ΔΙΑΓΡΑΦΗ ΑΡΧΕΙΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΟΤΑΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΛΑΘΟΣ↓**

```

{
    $prmess=<FILE1>;
    close(FILE1);
    $prog = '/users/wnuc/public_html/codes/clean';
    open (CLOUDY, "$prog");
    close (CLOUDY);

```

**↓ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΙΚΤΥΑΚΗΣ ΣΕΛΙΔΑΣ ΑΠΑΝΤΗΣΗΣ ΟΤΑΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΛΑΘΟΣ↓**

```

print ("Content-type: text/html\n\n");
print ("<HTML>");
print ("<TITLE>Results for Light Water</TITLE>");
print ("<BODY><BR><BR><BR><BR>");
print ("<FONT SIZE=4><CENTER>");
print      ("Results      for      Requested      Light      Water
Properties</CENTER></FONT><BR><BR><BR><BR>");
print      ("<FONT
COLOR=#FF0000><CENTER>$prmess</CENTER></FONT><BR>");
print      ("<BR>");
print ("<TABLE ALIGN=CENTER BORDER=3>");
print      ("<BR><FONT COLOR=#000000><CAPTION ALIGN=CENTER>SUBMITTED
VALUES</CAPTION>");
print      ("<TR>");
print      ("<TD>Pressure in bar &#160&#160</TD>");
print      ("<TD>$press</TD></TR>");

```

```

print ("<TR><TD>Temperature in &#186C &#160&#160</TD>");
print ("<TD>$temp</TD>");
print ("</TR>");
print ("</TABLE>");
print ("<FONT SIZE=4>");
print ("<BR><BR><BR><BR><EM>");
print
print http://arcas.nuclear.mech.ntua.gr/codes/light_calculus.html");
print ("Back to Calculation Form</A>");
print ("</EM>");
print ("</BODY>");
}

```

### ***IV.1.6 clean***

Πρόκειται για αρχείο εντολών του λειτουργικού συστήματος με το οποίο διαγράφονται τα προσωρινά αρχεία INFILE και OUTFILE δεδομένων και αποτελεσμάτων αντίστοιχα του κώδικα LIGHT\_WASP.

```
rm -r -f infile
```

```
rm -r -f outfile
```

### ***IV.1.7 heavywater.html***

```

<!DOCTYPE HTML PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.0 Transitional//EN">
<HTML><HEAD><TITLE>Heavy Water Thermophysical Properties</TITLE>
<META http-equiv=Content-Type content="text/html; charset=windows-1253">
<META content="Microsoft FrontPage 4.0" name=GENERATOR>
<META content=FrontPage.Editor.Document name=ProgId></HEAD>
<BODY><FONT size=4><B><I>NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
</I></B></FONT><FONT size=5><BR><B><I>Nuclear Engineering Section
</I></B></FONT>
<HR align=left width=430 noShade SIZE=3>
<BR><BR><BR><BR>
<CENTER><B><FONT size=5>THERMODYNAMIC</FONT></B> <B><FONT size=5>AND TRANSPORT
PROPERTIES</FONT></B></CENTER>
<P>
<CENTER><H><FONT size=5>OF HEAVY WATER</FONT></B></CENTER>
<P></P>
<HR align=center width=500 noShade SIZE=3>
<p><FONT size=3><A
href="http://arcas.nuclear.mech.ntua.gr/codes/heavy_calculus.html">Prepare
&amp; Submit Calculation Form</A></FONT>
<BR><BR><FONT size=3>The thermodynamic and transport properties of&nbsp;heavy
water can be calculated according to the property equations presented in:</FONT>
</p>
<p><B>[1] <span lang="en-gb" style="font-size:12.0pt;mso-bidi-font-size:
10.0pt;font-family:&quot;Times New Roman&quot;;mso-fareast-font-family:&quot;Times
New Roman&quot;;

```



style="MARGIN: 0cm 0cm 0pt 17.85pt; TEXT-INDENT: -17.85pt; mso-list: l43 level1 lfo45; tab-stops: list 17.85pt">&nbsp;  </P>  
<P class=MsoBodyText  
style="MARGIN: 0cm 0cm 0pt 17.85pt; TEXT-INDENT: -17.85pt; mso-list: l43 level1 lfo45; tab-stops: list 17.85pt"  
align=center><SPAN style="mso-ansi-language: EL">where </SPAN>T<SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL">\*= 643.89 </SPAN>K<SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL"> and  $\rho^* = 358.0$  </SPAN>kg<SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL"></SPAN>m<SUP></SUP><SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL">3</SPAN></SUP><SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL"><O:P> </O:P></SPAN></P>  
<P>Calculable Properties:</P>  
<TABLE width="80%" border=1>  
<TBODY>  
<TR>  
<TD width="51%"><I>Specific volume <B>v</B> in  
m<SUP>3</SUP>/kg&nbsp;  </I></TD>  
<TD width="49%"><I>Density <B> $\rho$ </B> in kg/m<SUP>3</SUP></I></TD></TR>  
<TR>  
<TD width="51%"><I>Internal energy <B>u</B> in kJ/kg&nbsp;  </I></TD>  
<TD width="49%"><I>Specific enthalpy <B>h</B> in kJ/kg</I></TD></TR>  
<TR>  
<TD width="51%"><I>Entropy <B>s</B> in kJ/(kgK)</I></TD>  
<TD width="49%"><I>Isobaric heat capacity <B>c</B> in kJ/(kgK)</I></TD></TR>  
<TR>  
<TD width="51%"><I>Isochoric heat capacity <B>c</B> in kJ/(kgK)&nbsp;  </I></TD>  
<TD width="49%"><I>Viscosity <B> $\eta$ </B> in kg/(ms)</I></TD></TR>  
<TR>  
<TD width="51%"><I>Thermal conductivity <B> $\lambda$ </B> in W/(mK)</I></TD>  
<TD width="49%"><I>Surface tension&nbsp;  </I></TD>  
N/m.</I></TD></TR></TBODY></TABLE>  
<P>Code accepts the following input pair:</P>  
<P><I><B>(P,T)</B></I> in bars and degrees Centigrade respectively.</P>  
<P><FONT size=3><A href="http://arcas.nuclear.ntua.gr/codes/heavy\_bug\_page.html">Reported Bugs</A></FONT></P>  
<P><I><B><FONT size=2>Addendum</FONT></B></I> <BR><I><FONT size=2>This WWW page is maintained regularly to ensure best performance and error-free accurate calculations for the thermodynamic and transport properties of light (ordinary)&nbsp;&nbsp;&nbsp;water. All efforts have been made to ensure that the present&nbsp;&nbsp;&nbsp;code&nbsp;&nbsp;&nbsp;is as accurate implementation as possible of the property equations included at the above literature. Authors welcome your comments and suggestions for further improvement along with any bug reports and they will acknowledge any reported bug in this very page under the link <A href="http://arcas.nuclear.ntua.gr/codes/heavy\_bug\_page.html">reported bugs </A>regardless whether they are fixed or not.&nbsp;&nbsp;&nbsp;</FONT></I></P>  
<P><I><FONT size=2>Please, contact:</FONT></I> </P>  
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2><A href="mailto:npetro@nuclear.ntua.gr">Nick P. Petropoulos</A>  
(npetro@nuclear.ntua.gr)</FONT></I> </P>  
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>Research Assistant</FONT></I> </P>  
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>Nuclear Engineering Section</FONT></I> </P>  
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>Mechanical Engineering Dept.</FONT></I> </P>  
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>National Technical University of Athens</FONT></I> </P>  
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>15780 Athens, GREECE</I> </P>  
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>tel: +302107722939</FONT></I> </P>  
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>fax: +302107722914</FONT></I> </P>  
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>URL: <A href="http://arcas.nuclear.ntua.gr/">http://arcas.nuclear.ntua.gr/</A></FONT></I>



```

<TR COLSPAN=2>
<TD COLSPAN=2 ALIGN="CENTER">or</TD>
</TR>
<TR>
<TD ALIGN="LEFT">b) </TD>
<TD ALIGN="LEFT">Fill the pressure box with the saturation pressure and the
temperature box with zero.</TD>
</TR>
</TABLE>
</P>
<form method="GET" action="/heavy.cgi">


```

#### **IV.1.9 heavy.cgi**

```

#!/usr/sbin/perl

#
# Process cgi args - Method GET
#
{

```

```

$buffer=$ENV{'QUERY_STRING'} ;
@pairs=split(/&/, $buffer);
@bit=split(/=/, $pairs[0]);
$press=$bit[1];
@bit=split(/=/, $pairs[1]);
$temp=$bit[1];
open (FILE1, ">>infhw");
print FILE1 (" $press\n");
print FILE1 (" $temp\r.");
close(FILE1);

$prog = '/users/wmuc/public_html/codes/loc/heavyw';

open (CLOUDY, "|$prog");
close (CLOUDY);
open (FILE1, "<outfhw");
    $prch=<FILE1>;
}
if( $prch eq "0\n")
{
    $prs1=<FILE1>;
    $prs2=<FILE1>;
    $prs3=<FILE1>;
    $prs4=<FILE1>;
    $prs5=<FILE1>;
    $prs6=<FILE1>;
    $prs7=<FILE1>;
    $prs8=<FILE1>;
    $prs9=<FILE1>;
    $prs10=<FILE1>;
    $prs11=<FILE1>;
    $prs12=<FILE1>;

```

\$prs13=<FILE1>;  
\$prs14=<FILE1>;  
\$prs15=<FILE1>;  
\$prs16=<FILE1>;  
\$prs17=<FILE1>;  
\$prs18=<FILE1>;  
\$prs19=<FILE1>;  
\$prs20=<FILE1>;  
\$prs21=<FILE1>;  
\$prs22=<FILE1>;  
\$prans1=<FILE1>;  
\$prans2=<FILE1>;  
\$prans3=<FILE1>;  
\$prans4=<FILE1>;  
\$prans5=<FILE1>;  
\$prans6=<FILE1>;  
\$prans6b=<FILE1>;  
\$prans7=<FILE1>;  
\$prans8=<FILE1>;  
\$prans9=<FILE1>;  
\$prans10=<FILE1>;  
\$prans11=<FILE1>;  
\$prans12=<FILE1>;  
\$prans13=<FILE1>;  
\$prans14=<FILE1>;  
\$prans15=<FILE1>;  
\$prans16=<FILE1>;  
\$prans17=<FILE1>;  
\$prans18=<FILE1>;  
\$prans19=<FILE1>;



```
$prans20=<FILE1>;
$prans21=<FILE1>;
$prans22=<FILE1>;
$prans23=<FILE1>;
$prans24=<FILE1>;
$prans25=<FILE1>;
$prans26=<FILE1>;
$prans27=<FILE1>;
$prans28=<FILE1>;
#
if( $prans27 eq "0\n")
{
$prans29=<FILE1>;
$prans30=<FILE1>;
$prans31=<FILE1>;
$prans32=<FILE1>;
$prans33=<FILE1>;
$prans34=<FILE1>;
$prans35=<FILE1>;
$prans36=<FILE1>;
$prans37=<FILE1>;
$prans38=<FILE1>;
$prans39=<FILE1>;
$prans40=<FILE1>;
$prans41=<FILE1>;
$prans42=<FILE1>;
$prans43=<FILE1>;
$prans44=<FILE1>;
$prans45=<FILE1>;
$prans46=<FILE1>;
$prans47=<FILE1>;
```

```

$prans48=<FILE1>;
$prans49=<FILE1>;
$prans50=<FILE1>;
$prans51=<FILE1>;
$prans52=<FILE1>;
if( $prans52 eq "0\n" )
{
}
else
{
    $prans53=<FILE1>;
    $prans54=<FILE1>;
}
}
close(FILE1);
$prog = '/users/wnuc/public_html/codes/cleanh';
open (CLOUDY, "$prog");
close (CLOUDY);
print ("Content-type: text/html\n\n");
print ("<HTML>");
print ("<TITLE>Results for Heavy Water</TITLE>");
print ("<BODY>");
print ("<FONT SIZE=4><CENTER>");
print ("<B>Results for Requested Heavy Water
Properties</B></CENTER></FONT><BR>");
print ("<BR>");
print ("<TABLE ALIGN=CENTER BORDER=3>");
print ("<BR><FONT COLOR=#00C000><CAPTION ALIGN=CENTER>SUBMITTED
VALUES</CAPTION>");
print ("<TR>");
print ("<TD><CENTER>$prans1</CENTER></TD></TR>");

```

```

print ("<TR><TD><CENTER>$sprans2</CENTER></TD></TR></TR>");
print ("</TABLE><BR><BR>");

print ("<TABLE ALIGN=CENTER BORDER=1 cellspacing=0 cellpadding=0
WIDTH=50%>");
    print ("<BR><FONT COLOR=#000000><CAPTION
ALIGN=CENTER>RESULTS</CAPTION>");
    print ("<TR colspan=2><TD colspan=2 ALIGN=LEFT>$sprans4</TD></TR>");
    if( $sprans52 eq "0\n")
    {
    ;
    else
    {
    print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans5</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans6</TD></TR>");
    }
    print ("<TR COLSPAN=2><TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT> </TD></TR>");
    print ("<TR COLSPAN=2>");
    print ("<TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT><B>$sprans7</B></TD>");
    print ("</TR>");
    print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans9</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans10</TD></TR>");
    print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans11</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans12</TD></TR>");
    print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans13</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans14</TD></TR>");
    print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans15</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans16</TD></TR>");
    print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans17</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans18</TD></TR>");
    print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans19</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans20</TD></TR>");
    print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans21</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans22</TD></TR>");
    print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans23</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans24</TD></TR>");

```

```

print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans25</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans26</TD></TR>");
if( $sprans27 eq "0\n")
{
print ("<TR COLSPAN=2>");
print ("<TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT><B>$sprans29</B></TD>");
print ("</TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans31</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans32</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans33</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans34</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans35</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans36</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans37</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans38</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans39</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans40</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans41</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans42</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans43</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans44</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans45</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans46</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans47</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans48</TD></TR>");
if( $sprans52 eq "1\n")
{
print ("<TR colspan=2><TD colspan=2 ALIGN=LEFT> <BR></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans53</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans54</TD></TR>");
}
}
print ("</TABLE>");
print ("<FONT SIZE=4>");
print ("<BR><BR><BR><BR><EM>");

```

```

print ("<A
HREF=http://arcas.nuclear.mech.ntua.gr/codes/heavy_calculus.html>");

print ("Back to Calculation Form</A>");

print ("</EM>");

print ("</BODY>");

}

else
{
    $prmess=<FILE1>;
    close(FILE1);
    $prog = '/users/wnac/public_html/codes/clearh';
    open (CLOUDY, "$prog");
    close (CLOUDY);
    print ("Content-type: text/html\n\n");
    print ("<HTML>");
    print ("<TITLE>Results for Heavy Water</TITLE>");
    print ("<BODY><BR><BR><BR>");
    print ("<FONT SIZE=4><CENTER>");

    print ("Results for Requested Heavy Water
Properties</CENTER></FONT><BR><BR><BR>");
    print ("<FONT SIZE=5
COLOR=#FF0000><CENTER>$prmess</CENTER></FONT><BR>");
    print ("<BR>");
    print ("<TABLE ALIGN=CENTER BORDER=3>");
    print ("<BR><FONT COLOR=#000000><CAPTION ALIGN=CENTER>SUBMITTED
VALUES</CAPTION>");
    print ("<TR>");
    print ("<TD>Pressure in bar &#160&#160</TD>");
    print ("<TD>$press</TD></TR>");
    print ("<TR><TD>Temperature in &#186C &#160&#160</TD>");
    print ("<TD>$temp</TD>");
    print ("</TR>");
}

```

```

print ("</TABLE>");
print ("<FONT SIZE=4>");
print ("<BR><BR><BR><BR><EM>");
print ("<A
href=http://arcas.nuclear.mech.ntua.gr/codes/heavy_calculus.html>");
print ("Back to Calculation Form</A>");
print ("</EM>");
print ("</BODY>");
}

```

#### **IV.1.10 cleanh**

Πρόκειται για αρχείο εντολών του λειτουργικού συστήματος με το οποίο διαγράφονται τα προσωρινά αρχεία INFHW και OUTFHW δεδομένων και αποτελεσμάτων αντίστοιχα του κώδικα HEAVY\_WASP.

```
rm -r -f infhw
```

```
rm -r -f outfhw
```

#### **IV.1.11 sodium.html**

```

<!DOCTYPE HTML PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.0 Transitional//EN">
<HTML><HEAD><TITLE>Sodium Thermophysical Properties</TITLE>
<META http-equiv=Content-Type content="text/html; charset=windows-1253">
<META content="Microsoft FrontPage 4.0" name=GENERATOR>
<META content=FrontPage.Editor.Document name=ProgId></HEAD>
<BODY><FONT size=4><B><i>NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
</I></B></FONT><FONT size=5><BR><B><I>Nuclear Engineering Section
</I></B></FONT>
<HR align=left width=430 noShade SIZE=3>
<p align="center" style="margin-top: 0; margin-bottom: 0">
<BR><BR><BR><BR>
<CENTER><B><FONT size=5>THERMODYNAMIC</FONT></B> <FONT size=5> <B>AND TRANSPORT
PROPERTIES</B></FONT></P><P align="center" style="margin-top: 0; margin-bottom:
0"><FONT size=5><B>OF SODIUM
LIQUID METAL&nbsp;&nbsp;&nbsp;</P>
<P>
SATURATION
STATES</font></b></p>
<P></P>
<HR align=center width=500 noShade SIZE=3>
</CENTER>
<p><FONT size=3><A
href="http://arcas.nuclear.ntua.gr/codes/sodium_calculus.html">Prepare
&amp; Submit Calculation Form</A></FONT>
<BR><BR><FONT size=3>The thermodynamic and transport properties of&nbsp;&nbsp;&nbsp;heavy
water can be calculated according to the property equations presented in:</FONT>
</p>

```

<P><B>[1] <span lang="EN-GB" style="font-size:12.0pt;mso-bidi-font-size:10.0pt;font-family:"Times New Roman";mso-foreast-font-family:"Times New Roman";><i><span lang="EN-GB;mso-foreast-language:EN-US;mso-bidi-language:AR-SA">Fink J.K., Leibowitz L., <i><span lang="EN-US;mso-foreast-language:EN-US;mso-bidi-language:AR-SA">Fink Liquid and Vapor</i>, Report ANL/RE-95/2, Ractor Engineering Division, Argonne National Laboratory, 1995</span>.</B></P>

<P>Based&nbsp;mainly on the above reference&nbsp;property equations have been&nbsp;implemented in the <b>SODIUM LISP</b> (<b>SODIUM LI</b>guid and <b>S</b>team <b></b>roperties) FORTRAN\_77 code in the course of&nbsp;the following PhD work (in Greek):</P>

<P><B>Petrooulos N.P., <I>"THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF NUCLEAR POWER REACTOR COOLANTS: COMPARATIVE STUDY AND CALCULATION CODES"</I>, Nuclear Engineering Section, Mechanical Engineering School, National Technical University of Athens, 2000 (in progress).</B></P>

<P>The set of equations used provide reliable thermodynamic and transport properties results for the&nbsp;industrial use of heavy water. The following validity range is covered:</P>

<P class=MsoBodyText style="MARGIN: 0cm 0cm 0pt 17.85pt; TEXT-INDENT: -17.85pt; mso-list: l5 level1 lfo43; tab-stops: list 17.85pt" align=center><SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL">Pressure</SPAN><SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL">: 1.5E<sup>-10</sup> - 256.4 </SPAN><SPAN lang=EN-US style="mso-ansi-language: EN-US">bar</SPAN><SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL"><O:P> </O:P></SPAN></P>

<P class=MsoBodyText style="MARGIN: 0cm 0cm 0pt 17.85pt; TEXT-INDENT: -17.85pt; mso-list: l23 level1 lfo44; tab-stops: list 17.85pt" align=center><SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL">Temperature: 97.85 - 2230.55 <sup>0</sup></SPAN><O:P> </O:P></SPAN></P>

<P class=MsoBodyText style="MARGIN: 0cm 0cm 0pt"><SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL">&nbsp;<O:P> </O:P></SPAN></P>

<P class=MsoBodyText style="MARGIN: 0cm 0cm 0pt 17.85pt; TEXT-INDENT: -17.85pt; mso-list: l43 level1 lfo45; tab-stops: list 17.85pt" align=center><SPAN lang=EL style="mso-ansi-language: EL"><O:P></SPAN></P>

<P>Calculable Properties:</P>

<TBODY>
<TR>
<TD width="51%"><I>Specific volume <B>v</B> in m<sup>3</sup>/kg&nbsp;</I></TD>
<TD width="49%"><I>Density <B>ρ</B> in kg/m<sup>3</sup></I></TD></TR>
<TD width="51%"><I>Internal energy <B>u</B> in kJ/kg&nbsp;</I></TD>
<TD width="49%"><I>Specific enthalpy <B>h</B> in kJ/kg</I></TD></TR>
<TD width="51%"><I>Entropy <B>s</B> in kJ/(kgK)</I></TD>
<TD width="49%"><I>Isobaric heat capacity <B>c</B> in kJ/(kgK)</I></TD></TR>
<TD width="51%"><I>Isochoric heat capacity <B>c</B> in kJ/(kgK)</I></TD>
<TD width="49%"><I>Surface tension&nbsp;<B>σ</B> in N/m.</I></TD></TR></TBODY></TABLE> <p>&lt;P&gt;Code accepts the following input pair:&lt;/P&gt;</p> <p>&lt;P&gt;&lt;I&gt;&lt;B&gt;(P,T)&lt;/B&gt;&lt;/I&gt; in bars and degrees Centigrade respectively.&lt;/P&gt;</p> <p>&lt;P&gt;&lt;FONT size=3&gt;&lt;a href="http://arcas.nuclear.ntua.gr/codes/sodium_bug_page.html"&gt;Reported Bugs&lt;/A&gt;&lt;/FONT&gt;&lt;/P&gt;</p> <p>&lt;P&gt;&lt;I&gt;&lt;B&gt;&lt;FONT size=2&gt;Addendum&lt;/FONT&gt;&lt;/I&gt; &lt;BR&gt;&lt;I&gt;&lt;FONT size=2&gt;This WWW page is maintained regularly to ensure best performance and error-free accurate calculations for the thermodynamic and transport properties of light</p>

```

(ordinary)&nbsp;water. All efforts have been made to ensure that the
present&nbsp;is as accurate implementation as possible of the
property equations included at the above literature. Authors welcome your
comments and suggestions for further improvement along with any bug reports and
they will acknowledge any reported bug in this very page under the link <A
href="http://arcas.nuclear.ntua.gr/codes/sodium_bug_page.html">reported
bugs </A>regardless whether they are fixed or not.&nbsp;</FONT></I></P>
<P><I><FONT size=2>Please, contact:</FONT></I> </P>
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2><A
href="mailto:npetro@nuclear.ntua.gr">Nick P. Petropoulos</A>
(npetro@nuclear.ntua.gr)</FONT></I> </P>
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>Research
Assistant</FONT></I> </P>
<F style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>Nuclear
Engineering Section</FONT></I> </P>
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>Mechanica:
Engineering Dept.</FONT></I> </P>
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>National
Technical University of Athens</FONT></I> </P>
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>15780 Athens,
GREECE</FONT></I> </P>
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>tei:
+302107722939</FONT></I> </P>
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>fax:
+302107722914</FONT></I> </P>
<P style="MARGIN-TOP: 0px; MARGIN-BOTTOM: 0px"><I><FONT size=2>URL: <A
href="http://arcas.nuclear.ntua.gr/">http://arcas.nuclear.ntua.gr/</A></FONT></I>
</P>
<P><I><FONT size=2>However, authors will not try to fix all reported bugs
promptly, and they will certainly not be involved in an effort to improve
performance of the property equations in pressure - temperature regions, where
their results are ambiguous or not to be trusted.&nbsp;&nbsp;&nbsp;Furthermore,
authors cannot accept ANY responsibility if some or all calculations based on
this code may be proven wrong or inadequate.Visitors of this page, who would
like to receive free copies of the source code for their own private use or for
evaluating purposes are encouraged to place a request at <A
href="mailto:npetro@nuclear.ntua.gr">npetro@nuclear.ntua.gr</A>, stating also
their intended implementation platform (i.e. FORTRAN make &amp; version, UNIX or
Windows based application etc). Not all requests are to be granted.&nbsp;&nbsp;&nbsp;This
version of the software is not commercially available.</FONT></I> <FONT
size=4><BR></B><BR><EM><A
href="http://arcas.nuclear.ntua.gr/codes/properties.html">Back to the
Previous Page</A> </EM></P></FONT></BODY></HTML>

```

#### IV.1.12 sodium\_calculus.html

```

<html>
<head>
<title>Light Water Thermophysical Properties</title>
</head>
<body>
<FONT SIZE=4>
<B><I>
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
</I></B></FONT>
<FONT SIZE=5>
<BR>
<B><I>
Nuclear Engineering Section
</I></B></FONT>
<HR SIZE=3 WIDTH=430 ALIGN=Left ALIGN=TO? NOSHADE >
<BR>
<BR>

```



```

<BR>
<BR>
<CENTER>
<B>
<FONT SIZE=5>
THERMODYNAMIC</FONT></B>
<B>
<FONT SIZE=5>
AND TRANSPORT PROPERTIES</FONT></B></P>
<P>
<B>
<FONT SIZE=5>
OF SODIUM SATURATION STATES.&nbsp;&nbsp;&nbsp;</B></P>
<P>
<B>
CALCULATION FORM</FONT></B></CENTER></p>
<HR SIZE=3 WIDTH=500 ALIGN=CENTER ALIGN=TOP NOSHADE >
<form method="GET" action="/sodium.cgi">
<table>
<TR>
<TD>
<font size="4">Please select input parameter:
to calculate the appropriate saturation state:
</TD>
<TD>
<SELECT type="checkbox" name="press">
<OPTION type="float" value="0">Pressure (bar)</OPTION>
<OPTION type="float" value="1">Temperature (&#176C)</OPTION>
</SELECT>
</font>
</TD>
</TR>
<TR>
<TD>
<font size="4">Please enter Input Value:
</TD>
<TD ALIGN=RIGHT>
<input type="float" name="temp" size="16"></font>
</TD>
</TR>
</table>
<p>&nbsp;&nbsp;&nbsp;</p>
<p><font size="4"><input type="submit" value=" submit " name="submit"
style="font-size: 14pt">
<input type="reset" value="clear form" name="B2" style="font-size:
14pt"></font></p>
</form>
<BR>
<p>
<BR>
<FONT SIZE=4>
<EM>
<A HREF="sodium.html">Back to the Previous Page</A>
</EM>
</p>
</font>
</body>
</html>

```

#### IV.1.13 sodium.cgi

```
#!/usr/sbin/perl
```

```

#
# Process cgi args - Method GET
#
{
    $buffer=$ENV{'QUERY_STRING'} ;
    @pairs=split(/&/,$buffer);
    @bit=split(/=/,$pairs[0]);
    $press=$bit[1];
    @bit=split(/=/,$pairs[1]);
    $temp=$bit[1];
    if( $press eq 0)
    {
        open (FILE1,">>infs");
        print FILE1 (" $temp\n");
        print FILE1 (" $press\n");
        close(FILE1);
    }
    else
    {
        $press = $press - 1;
        open (FILE1,">>infs");
        print FILE1 (" $press\n");
        print FILE1 (" $temp\n");
        close(FILE1);
    }
}
#
# open (FILE1,">>infs");
#
# print FILE1 (" $pp\n");
#
# print FILE1 (" $tt\n");

```

```
# close(FILE1);
$prog = '/users/wnuc/public_html/codes/loc/sodium';
open (CLOUDY, "|$prog");
close (CLOUDY);
open (FILE1, "<outfs");
    $prch=<FILE1>;
)
if( $prch eq "0\n")
{
    $prsi=<FILE1>;
    $prs2=<FILE1>;
    $prs3=<FILE1>;
    $prs4=<FILE1>;
    $prs5=<FILE1>;
    $prs6=<FILE1>;
    $prs7=<FILE1>;
    $prs8=<FILE1>;
    $prs9=<FILE1>;
    $prs10=<FILE1>;
    $prs11=<FILE1>;
    $prs12=<FILE1>;
    $prs13=<FILE1>;
    $prs14=<FILE1>;
    $prs15=<FILE1>;
    $prs16=<FILE1>;
    $prs17=<FILE1>;
    $prs18=<FILE1>;
    $prs19=<FILE1>;
    $prs20=<FILE1>;
    $prs21=<FILE1>;
```

```
$prns22=<FILE1>;  
$prans1=<FILE1>;  
$prans2=<FILE1>;  
$prans3=<FILE1>;  
$prans4=<FILE1>;  
$prans5=<FILE1>;  
$prans6=<FILE1>;  
$prans7=<FILE1>;  
$prans8=<FILE1>;  
$prans9=<FILE1>;  
$prans:0=<FILE1>;  
$prans11=<FILE1>;  
$prans12=<FILE1>;  
$prans13=<FILE1>;  
$prans14=<FILE1>;  
$prans15=<FILE1>;  
$prans16=<FILE1>;  
$prans17=<FILE1>;  
$prans18=<FILE1>;  
$prans19=<FILE1>;  
$prans20=<FILE1>;  
$prans21=<FILE1>;  
$prans22=<FILE1>;  
$prans23=<FILE1>;  
$prans24=<FILE1>;  
$prans25=<FILE1>;  
$prans26=<FILE1>;  
$prans27=<FILE1>;  
$prans28=<FILE1>;  
$prans29=<FILE1>;
```

```

$prans30=<FILE1>;
$prans31=<FILE1>;
$prans32=<FILE1>;
$prans33=<FILE1>;
$prans34=<FILE1>;
$prans35=<FILE1>;
$prans36=<FILE1>;
$prans37=<FILE1>;
$prans38=<FILE1>;
$prans39=<FILE1>;
$prans40=<FILE1>;
$prans41=<FILE1>;
$prans42=<FILE1>;
$prans43=<FILE1>;
$prans44=<FILE1>;
$prans45=<FILE1>;
$prans46=<FILE1>;
$prans47=<FILE1>;
$prans48=<FILE1>;
close(FILE1);
$prog = '/users/wmuc/public_html/codes/cleans';
open (CLOUDY, "|$prog");
close (CLOUDY);
print ("Content-type: text/html\n\n");
print ("<HTML>");
print ("<TITLE>Results for Sodium</TITLE>");
print ("<BODY>");
print ("<FONT SIZE=4><CENTER>");
print ("<B>Results for Requested Sodium
Properties</B></CENTER></FONT><SR>");

```

```

print ("<BR>");
print ("<TABLE ALIGN=CENTER BORDER=3>");
print ("<BR><FONT COLOR=#000000><CAPTION ALIGN=CENTER>SUBMITTED
VALUES</CAPTION>");
print ("<TR>");
print ("<TD><CENTER>$sprans1</CENTER></TD></TR>");
print ("<TR><TD><CENTER>$sprans2</CENTER></TD></TR>");
print ("</TABLE><BR><BR>");

print ("<TABLE ALIGN=CENTER BORDER=1 cellpadding=0 cellspacing=0
WIDTH=50%>");
print ("<BR><FONT COLOR=#000000><CAPTION
ALIGN=CENTER>RESULTS</CAPTION>");
print ("<TR COLSPAN=2>");
print ("<TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT>$sprans4</TD>");
print ("</TR>");
print ("<TR COLSPAN=2><TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT> </TD></TR>");
print ("<TR COLSPAN=2>");
print ("<TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT><B>$sprans7</B></TD></TR>");
print ("</TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans9</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans10</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans11</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans12</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans13</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans14</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans15</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans16</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans17</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans18</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans19</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans20</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans21</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans22</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans23</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans24</TD></TR>");

```

```

print ("<TR COLSPAN=2>");
print ("<TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT><B>$sprans25</B></TD>");
print ("</TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans27</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans28</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans29</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans30</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans31</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans32</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans33</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans34</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans35</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans36</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans37</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans38</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans39</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans40</TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans41</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans42</TD></TR>");
print ("<TR COLSPAN=2><TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT> </TD></TR>");
print ("<TR COLSPAN=2>");
print ("<TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT><I>$sprans44<BR>");
print (" $sprans45</I></TD>");
print ("</TR>");
print ("<TR COLSPAN=2><TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT> </TD></TR>");
print ("<TR COLSPAN=2><TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT> </TD></TR>");
print ("<TR COLSPAN=2><TD COLSPAN=2 ALIGN=LEFT> </TD></TR>");
print ("<TR><TD ALIGN=LEFT>$sprans47</TD><TD
ALIGN=RIGHT>$sprans48</TD></TR>");
print ("</TABLE>");
print ("<FONT SIZE=4>");
print ("<BR><BR><BR><EM>");
print ("<A
href=http://arcas.nuclear.mech.ntua.gr/codes/sodium_calculus.html>");
print ("Back to Calculation Form</A>");

```

```

print ("</EM>");
print ("</BODY>");
}
else
{
    $prmess=<FILE1>;
    close(FILE1);
    open (FILE1, "<infs");
    $press-<FILE1>;
    $temp=<FILE1>;
    close(FILE1);
    $prog = '/users/wnuc/public_html/codes/cleans';
    open (CLOUDY, "$prog");
    close (CLOUDY);
    print ("Content-type: text/html\n\n");
    print ("<HTML>");
    print ("<TITLE>Results for Sodium</TITLE>");
    print ("<BODY><BR><BR><BR><BR>");
    print ("<FONT SIZE=4><CENTER>");
    print ("Results for Requested Sodium
Properties</CENTER></FONT><BR><BR><BR>");
    print ("<FONT SIZE=5
COLOR=#FF0000><CENTER>$prmess</CENTER></FONT><BR>");
    print ("<BR>");
    print ("<TABLE ALIGN=CENTER BORDER=3>");
    print ("<BR><FONT COLOR=#000000><CAPTION ALIGN=CENTER>SUBMITTED
VALUES</CAPTION>");
    print ("<TR>");
    print ("<TD>Pressure in bar &#160&#160</TD>");
    print ("<TD ALIGN=RIGHT>$press</TD></TR>");
    print ("<TR><TD>Temperature in &#186C &#160&#160</TD>");

```



```

print ("<TD ALIGN=RIGHT>$temp</TD>");
print ("</TR>");
print ("</TABLE>");
print ("<FONT SIZE=4>");
print ("<BR><BR><BR><EM>");
print ("<A
:REF=http://arcas.nuclear.mech.ntua.gr/codes/sodium_calculus.html>");
print ("Back to Calculation Form</A>");
print ("</EM>");
print ("</BODY>");
}

```

#### **IV.1.14 cleans**

Πρόκειται για αρχείο εντολών του λειτουργικού συστήματος με το οποίο διαγράφονται τα προσωρινά αρχεία INFS και OUTFS δεδομένων και αποτελεσμάτων αντίστοιχα του κώδικα

```
SODIUM_LISP
```

```
rm -r -f infs
```

```
rm -r -f outfs
```

