



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΨΥΞΗΣ, ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Χρήση Modelica για μοντελοποίηση συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος
κεντρικού δέκτη σε συνδυασμό με SCO_2 κύκλο Brayton»**



ΧΡΙΣΤΟΣ ΣΑΜΜΟΥΤΟΣ

Ιούνιος 2023

Επιβλέπων: Τζιβανίδης Χρήστος, Καθηγητής ΕΜΠ
Τομέας Θερμότητας



National Technical University of Athens
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING
THERMAL ENGINEERING SECTION
REFRIGERATION, AIR CONDITIONING AND
SOLAR ENERGY LABORATORY

DIPLOMA THESIS

**«Modelica-based modelling of a solar tower power plant combined
with a SCO_2 Brayton cycle»**



CHRISTOS SAMMOUTOS

June 2023

Supervisor: Tzivanidis Christos, Professor
Thermal Engineering Section

-- κενή σελίδα --

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που γνώρισα στη σχολή κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, τον Άγγελο, τον Αλέξανδρο, τον Αντώνη, τον Γιώργο, την Ινώ και την Χριστίνα, για την άψογη συνεργασία που είχαμε αλλά και για την μεγάλης σημασίας φιλική σχέση που αναπτύξαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ κ. Χρήστο Τζιβανίδη, για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ευάγγελο Μπέλλο για την πολύτιμη του βοήθεια προς ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και όλα τα μέλη του εργαστηρίου για τη συνεργασία που είχαμε αυτό το διάστημα. Ιδιαίτερες ευχαριστίες όμως, θα ήθελα να εκφράσω προς την υποψήφια διδάκτορα Αγγελική Κιτσοπούλου για τη συνεργασία, αλλά κυρίως για την προθυμία της να με βοηθήσει ανά πάσα στιγμή.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Χρίστος Σάμμουτος

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Σύνοψη.....	7
Abstract.....	8
Nomenclature.....	9
1. Εισαγωγή.....	11
2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	15
2.1. Βιώσιμη ανάπτυξη.....	15
2.2. Ανάπτυξη των ΑΠΕ.....	16
2.3. Τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ.....	16
2.4. Μορφές, δυναμικό και μεθόδοι αξιοποίησης των ΑΠΕ.....	17
2.4.1. Το δυναμικό των ΑΠΕ.....	17
2.4.2. Ηλιακή ενέργεια.....	18
2.4.3. Αιολική ενέργεια.....	20
2.4.4. Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	21
2.4.5. Βιομάζα.....	22
2.4.6. Γεωθερμία.....	23
2.4.7. Κυματική και παλιρροϊκή ενέργεια.....	24
2.5. Το ενεργειακό μείγμα του παρόντος.....	24
2.6. Το ενεργειακό μείγμα του μέλλοντος.....	27
3. Ηλιακά συστήματα.....	29
3.1. Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας.....	29
3.1.1. Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	29
3.1.2. Θερμικά ηλιακά συστήματα.....	30
3.2. Ηλιακή ακτινοβολία.....	32
3.2.1. Ηλιακές γωνίες.....	34
3.2.2. Ηλιακός χρόνος.....	37
3.2.3. Γωνία πρόσπτωσης.....	38
3.2.4. Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία.....	39
3.2.5. Ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης.....	40
3.2.6. Ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια.....	41
3.2.7. Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας.....	42
3.3. Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα.....	43
3.3.1. Βασικά χαρακτηριστικά συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.....	43
3.3.2. Κύριες τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.....	44
3.3.3. Κοίλος παραβολικός συλλέκτης (PTC).....	45
3.3.4. Ηλιακός συλλέκτης Fresnel.....	48
3.3.5. Παραβολοειδής συγκεντρωτής.....	49
3.3.6. Συστήματα κεντρικού δέκτη.....	50
4. Συγκεντρωτικό σύστημα ηλιακού πύργου.....	52
4.1. Οπτικός βαθμός απόδοσης συστήματος ηλιακού πύργου.....	52
4.2. Θερμική ανάλυση ηλιακού πύργου.....	53

4.3. Αριθμητική επίλυση θερμοροών ηλιακού πύργου.....	56
4.4. Ιδιότητες τηγμένου άλατος.....	58
4.5. Δεξαμενή αποθήκευσης τηγμένου άλατος.....	59
5. Θερμοδυναμικοί κύκλοι αερίων.....	62
5.1. Θερμικοί σταθμοί μετατροπής ενέργειας.....	62
5.2. Θερμοδυναμικά αξιώματα.....	62
5.3. Κατηγορίες θερμοδυναμικών κύκλων.....	63
5.3.1. Θερμοδυναμικός κύκλος Carnot.....	64
5.3.2. Θερμοδυναμικός κύκλος Clausius-Rankine.....	65
5.3.3. Θερμοδυναμικός κύκλος Stirling-Ericsson.....	66
5.3.4. Θερμοδυναμικός κύκλος Kalina.....	67
5.3.5. Θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton.....	68
5.3.6. Θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton με αναγέννηση.....	70
5.3.7. Θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton με αναγέννηση και ψύξη.....	72
5.4. Εργαζόμενα μέσα σε κλειστούς θερμοδυναμικούς κύκλους.....	73
5.4.1. Κρίσιμο σημείο.....	73
5.4.2. Το διοξείδιο του άνθρακα σε συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα.....	74
5.4.3. Θερμοδυναμικός κύκλος Brayton με διοξείδιο του άνθρακα.....	80
6. Το λογισμικό Dymola.....	86
6.1. Μοντελοποίηση και προσομοίωση.....	86
6.2. Αντικειμενοστραφής μοντελοποίηση.....	86
6.3. Μοντελοποίηση βάσει εξισώσεων.....	87
6.4. Μοντελοποίηση συνεχούς και διακριτού χρόνου.....	88
6.5. Διαδικτυακή κοινότητα (Modelica Association).....	89
6.6. Το περιβάλλον OpenModelica.....	90
6.7. Το περιβάλλον Dymola.....	96
6.8. Βιβλιοθήκες λογισμικού Dymola (Dymola Libraries).....	99
6.8.1. Βασική βιβλιοθήκη Modelica (Modelica Standard Library).....	99
6.8.2. Υπάρχουσες βιβλιοθήκες στο Dymola.....	100
6.8.3. Άλλες διαθέσιμες βιβλιοθήκες.....	101
6.8.4. Εισαγωγή βιβλιοθηκών στη Modelica.....	104
6.8.5. Χρήση έτοιμων αντικειμένων από βιβλιοθήκες.....	105
6.8.6. Διαγραφή βιβλιοθήκης.....	108
7. Η γλώσσα προγραμματισμού Modelica.....	109
7.1. Modelica: Κλάσεις (Classes).....	109
7.2. Modelica: Μεταβλητές (Variables).....	113
7.3. Modelica: Τύποι (Types).....	115
7.4. Modelica: Εξισώσεις (Equations).....	116
7.5. Modelica: if, for, while, when.....	117
7.6. Modelica: Σύνδεσμοι (Connectors).....	121
7.7. Modelica: Αλγόριθμοι (Algorithms).....	125
7.8. Modelica: Συναρτήσεις (Functions).....	126
8. Μοντελοποίηση STP με Modelica.....	127
8.1. Μοντελοποίηση βιβλιοθηκών (packages modelling).....	127

8.2. Μοντελοποίηση συνδέσμων (connectors modelling).....	135
8.3. Μοντελοποίηση συναρτήσεων (functions modelling).....	143
8.4. Μοντελοποίηση αντικειμένων (models modelling).....	151
8.4.1. Μοντελοποίηση ηλιοστατών (Heliostats model).....	151
8.4.2. Μοντελοποίηση κεντρικού δεκτή (Receiver model).....	153
8.4.3. Μοντελοποίηση δεξαμενής (Thermal storage model).....	157
8.4.4. Μοντελοποίηση κυκλοφορητή (Circulator model).....	160
8.4.5. Μοντελοποίηση εναλλάκτη θερμότητας (Heat exchanger model).....	162
8.4.6. Μοντελοποίηση αεριοστροβίλου (Turbine model).....	165
8.4.7. Μοντελοποίηση γεννήτριας (Generator model).....	167
8.4.8. Μοντελοποίηση αναγεννητή (Regenerator model).....	169
8.4.9. Μοντελοποίηση ψύκτη (Cooler model).....	172
8.4.10. Μοντελοποίηση συμπιεστή (Compressor model).....	174
8.4.11. Μοντελοποίηση ολοκληρωτή (Integrator model).....	176
8.4.12. Μοντελοποίηση υπολογισμού αποδοτικότητας (Efficiency model).....	176
8.4.13. Μοντελοποίηση παραγόμενης ενέργειας (Value-kWh model).....	178
8.4.14. Μοντελοποίηση βαθμού απόδοσης (Value-efficiency model).....	180
8.5. Μοντελοποίηση μετεωρολογικών συνθηκών (Weather data package).....	182
8.6. Μοντελοποίηση συστήματος STP με SCO ₂ Brayton (SCO ₂ -Brayton model).....	186
9. Προσομοίωση STP με Dymola.....	192
9.1. Εκτέλεση προσομοίωσης στο λογισμικό Dymola.....	192
9.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης στο λογισμικό Dymola.....	196
9.3. Υπολογισμός βαθμών απόδοσης εγκατάστασης.....	205
9.4. Παραμετρική μελέτη εγκατάστασης.....	207
9.4.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τρεις περιοχές της Ελλάδας.....	207
9.4.2. Βαθμοί απόδοσης εγκατάστασης.....	209
9.4.3. Παραμετρική μελέτη επιφάνειας κεντρικού δέκτη.....	210
9.4.4. Παραμετρική μελέτη παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου.....	211
9.4.5. Παραμετρική μελέτη λόγου πίεσης θερμοδυναμικού κύκλου.....	213
10. Συμπεράσματα.....	215
10.1. Συμπεράσματα εργασίας.....	215
10.2. Μελλοντική εργασία.....	216
Κατάλογος πινάκων.....	217
Κατάλογος σχημάτων.....	218
Κατάλογος εικόνων.....	220
Κατάλογος αναφορών.....	228

Σύνοψη

Το ενεργειακό ζήτημα είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο σύγχρονος κόσμος. Η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, σε συνδυασμό με την εξάντληση των φυσικών πόρων και την ανάγκη για περιβαλλοντική προστασία οδηγούν στην αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Μια τέτοια πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή, η οποία σήμερα αντιπροσωπεύει περίπου το 50% των επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (RES). Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί την πηγή για την παραγωγή περισσότερων από 1000TWh ετησίως ανά το παγκόσμιο. Μια κατηγορία εφαρμογών της είναι τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (CSP) τα οποία οδηγούν στην αύξηση της θερμοκρασίας ενός εργαζόμενου μέσου. Αυτά τα συστήματα αναμένεται να συμμετέχουν σε ποσοστό μεγαλύτερο του 30% στο ενεργειακό μείγμα χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέχρι το 2050, σε ένα σενάριο όπου το μείγμα αυτό θα αποτελείται αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η μοντελοποίηση ενός ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος κεντρικού δέκτη με τη μορφή ηλιακού πύργου (STP), συνδυασμένο με έναν υπερκρίσιμο θερμοδυναμικό κύκλο Brayton του οποίου το εργαζόμενο μέσο είναι το υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα (SCO₂). Η μοντελοποίηση γίνεται στη γλώσσα προγραμματισμού Modelica, μια γλώσσα που επιτρέπει την ανάπτυξη μοντέλων στηριζόμενων σε εξισώσεις. Η προσομοίωση των μοντέλων γίνεται στο λογισμικό Dymola, το οποίο επιλύει δυναμικά μοντέλα γραμμένα σε γλώσσα Modelica. Ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης του θερμικού συστήματος ανέρχεται στο 37%, την ώρα που ο συνολικός μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης ανέρχεται στο 14%.

Λέξεις-κλειδιά: Ηλιακός πύργος, Υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα, Modelica, Dymola

Abstract

The energy issue is one of the most important problems the modern world must face. The increasing demand for energy, combined with the depletion of natural resources and the need for environmental protection has led to the search for alternative energy sources. Such an energy source is solar, which currently represents approximately 50% of investments in renewable energy sources (RES). Solar energy is the source of production for more than 1000TWh per year worldwide. Concentrating solar power systems (CSP) are applications of solar energy, leading to a temperature increase of a working fluid. These systems are expected to possess more than 30% of the total energy mixture of European Union countries by 2050, in a scenario where this mixture consists exclusively of renewable energy sources. In this paper, the modelling of a solar concentrating central receiver system in the form of a solar tower plant (STP) combined with a supercritical Brayton cycle whose working fluid is supercritical carbon dioxide (SCO₂) is being considered. The modelling is done using the programming language Modelica, a language that allows the development of models based on equations. The simulation of the models is done in Dymola software, which solves dynamic models written in Modelica. The average annual efficiency of the thermal system is 37%, while the average annual efficiency of the total system is 14%.

Keywords: Solar tower, Supercritical carbon dioxide, Modelica, Dymola

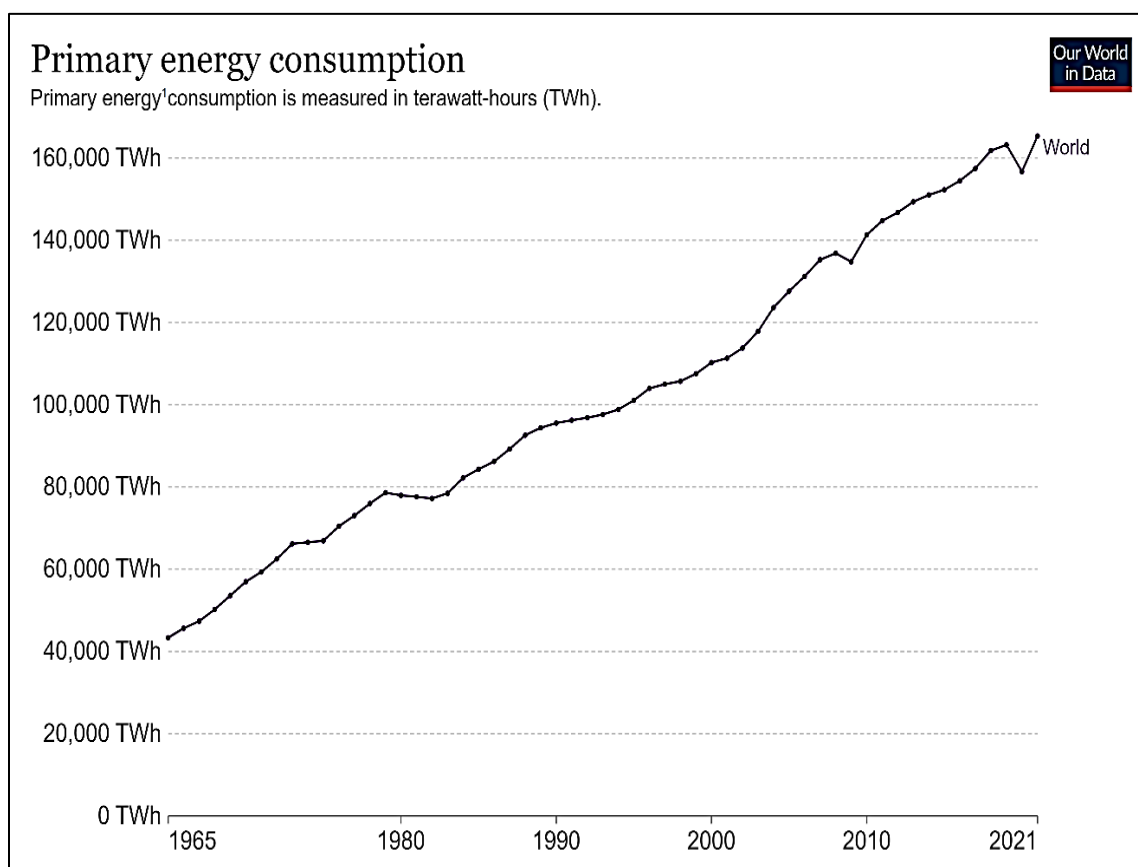
Nomenclature

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
a	Εστιακή απόσταση	m
A	Επιφάνεια	m ²
A _s	Αρχική πυκνότητα άλατος στους 0°C	kg/m ³
B	Διορθωτικός παράγοντας ηλιακού χρόνου	ο
B _s	Μεταβολή πυκνότητας άλατος	kg/m ³ C
C	Λόγος συγκέντρωσης	-
C _{2D}	Λόγος συγκέντρωσης επιμήκη συγκεντρωτή	-
C _{3D}	Λόγος συγκέντρωσης κυκλικού συγκεντρωτή	-
C _{max}	Μέγιστο γινόμενο θερμοχωρητικότητας-παροχής μάζας	W/K
C _{min}	Ελάχιστο γινόμενο θερμοχωρητικότητας-παροχής μάζας	W/K
C _p	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή	J/kgK
D	Διάμετρος	m
E	Διορθωτικός συντελεστής ηλιακού χρόνου	min
F	Παράγοντας απωλειών συλλέκτη	-
G	Στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία	W/m ²
h	Συντελεστής συναγωγής	W/m ² K
H	Ημερήσια ακτινοβολία	MJ/m ²
I	Ωριαία ακτινοβολία	MJ/m ²
k	Συντελεστής αγωγιμότητας	W/mK
K(i)	Συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης	-
K _T	Δείκτης αιθριότητας	-
m	Παροχή μάζας	kg/s
n	Ημέρα του έτους	-
N	Διάρκεια ημέρας σε ώρες	hours
Nu	Μέσος αριθμός Nusselt	-
Pr	Αριθμός Prandtl	-
Q	Ισχύς	W
R	Λόγος ακτινοβολίας κεκλιμένου προς οριζόντιο επίπεδο	-
Re	Αριθμός Reynolds	-
t	Χρόνος	min
T	Θερμοκρασία	°C ή K
U	Συντελεστής θερμοπερατότητας	W/m ² K
v	Κινηματικό ιξώδες	m ² /s
V	Όγκος	m ³
W	Ενέργεια	Wh

Ελληνικά σύμβολα	Περιγραφή	Μονάδες
α	Ηλιακό ύψος	$^{\circ}$
β	Κλίση επιπέδου	$^{\circ}$
γ	Αζιμούθιο επιφάνειας	$^{\circ}$
γ_s	Αζιμούθιο ηλίου	$^{\circ}$
δ	Ηλιακή απόκλιση	$^{\circ}$
ϵ	Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη	-
ϵ_r	Συντελεστής εκπομπής δέκτη	-
η	Βαθμός απόδοσης	-
η_{cycle}	Βαθμός απόδοσης θερμοδυναμικού κύκλου	-
η_o	Οπτικός βαθμός απόδοσης	-
η_{sys}	Βαθμός απόδοσης συστήματος	-
η_{th}	Θερμικός βαθμός απόδοσης	-
θ	Γωνία πρόσπτωσης	$^{\circ}$
θ_s	Ημιγωνία όρασης ηλίου	$^{\circ}$
θ_z	Γωνία ζενίθ	$^{\circ}$
λ	Γεωγραφικό μήκος	$^{\circ}$
ρ	Ανακλαστικότητα	-
ρ_s	Πυκνότητα άλατος	kg/m^3
τ	Διαπερατότητα	-
ϕ	Γεωγραφικό πλάτος	$^{\circ}$
ω	Ωριαία γωνία	$^{\circ}$
ω_s	Ωριαία γωνία δύσης ή ανατολής	$^{\circ}$

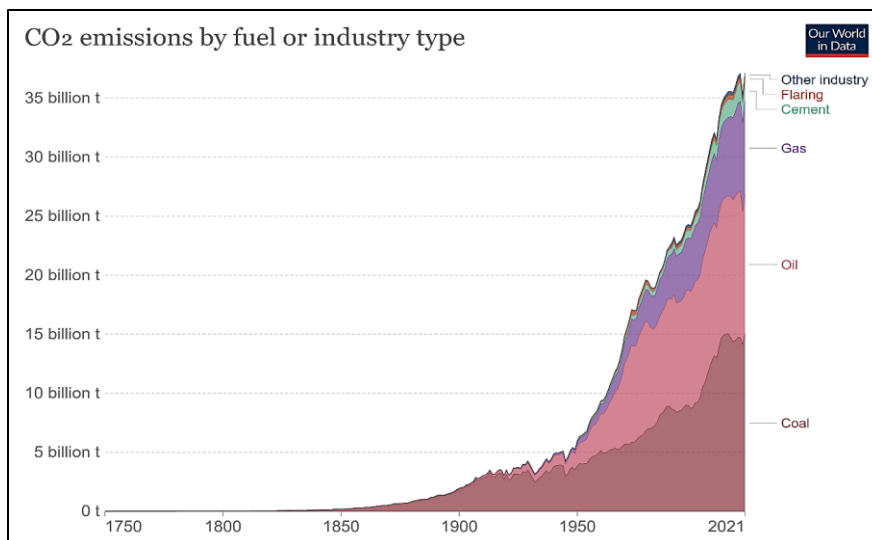
1. Εισαγωγή

Ένα από τα βασικότερα παγκόσμια ζητήματα που απασχολούν την ανθρωπότητα είναι το ενεργειακό. Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, έχουν οδηγήσει σε αυξημένες απαιτήσεις παραγωγής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών. Η ανάπτυξη της ανθρωπότητας στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ενέργεια, γι' αυτό και παρατηρείται αύξηση στην κατανάλωση της. Στο **Σχήμα 1** παρουσιάζεται η αυξητική τάση στην κατανάλωση πρωτογενούς ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα.

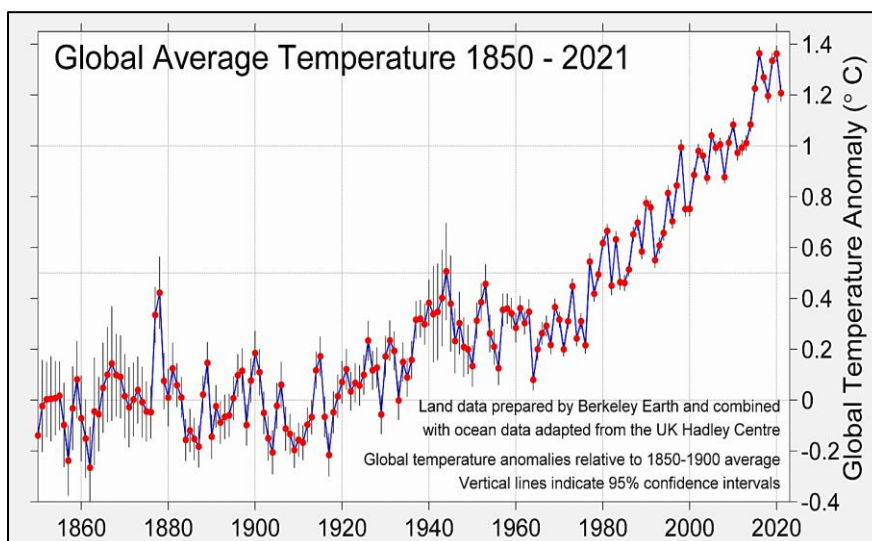


Σχήμα 1: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ηλεκτρικής ενέργειας [1]

Τις προηγούμενες δεκαετίες, η παραγωγή ενέργειας είχε στηριχθεί στα ορυκτά καύσιμα. Η πρακτική αυτή έχει οδηγήσει σε σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζεται η αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε παγκόσμια κλίμακα, η οποία φαίνεται να σχετίζεται κυρίως με τη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Στο **Σχήμα 3** παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας στον πλανήτη έχοντας ως σημείο αναφοράς τον μέσο όρο της θερμοκρασίας πενήντα ετών. Ταυτόχρονα, είναι γνωστό ότι τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ανεξάντλητα. Οι πιο πάνω παρατηρήσεις και διαπιστώσεις οδηγούν στην ανάγκη αναδιάρθρωσης της παγκόσμιας ενεργειακής στρατηγικής.

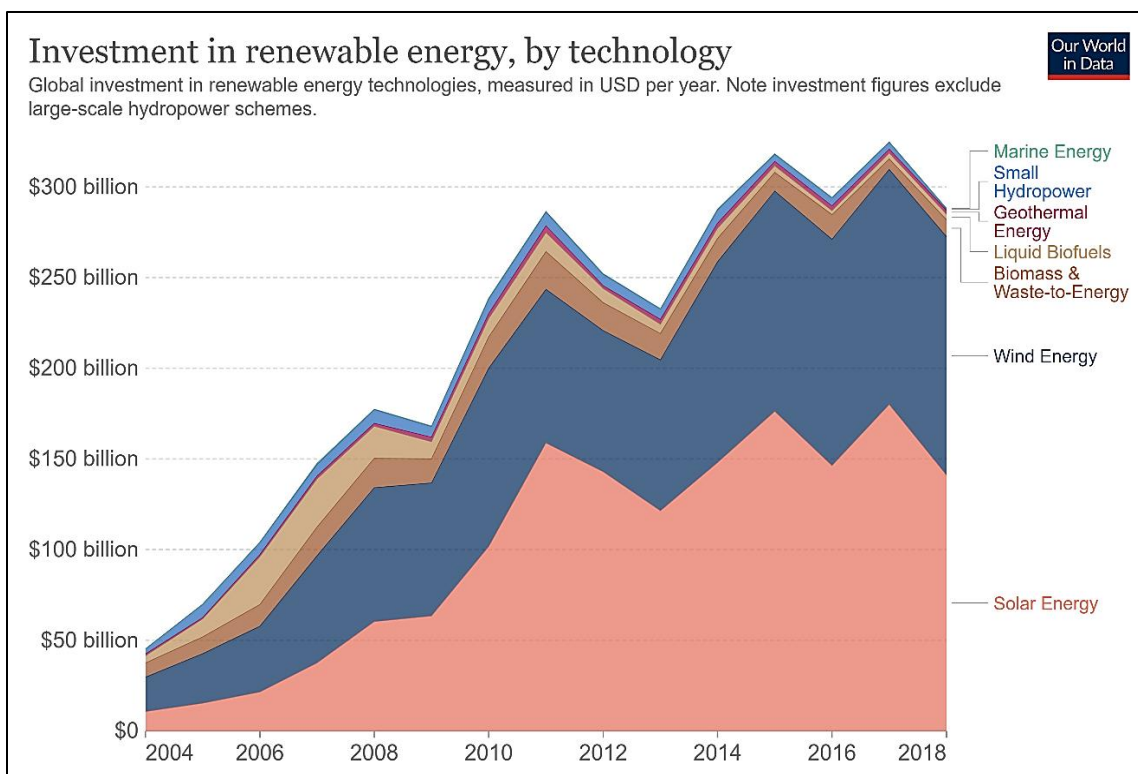


Σχήμα 2: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα με βάση το καύσιμο ή τον τύπο της βιομηχανίας [2]

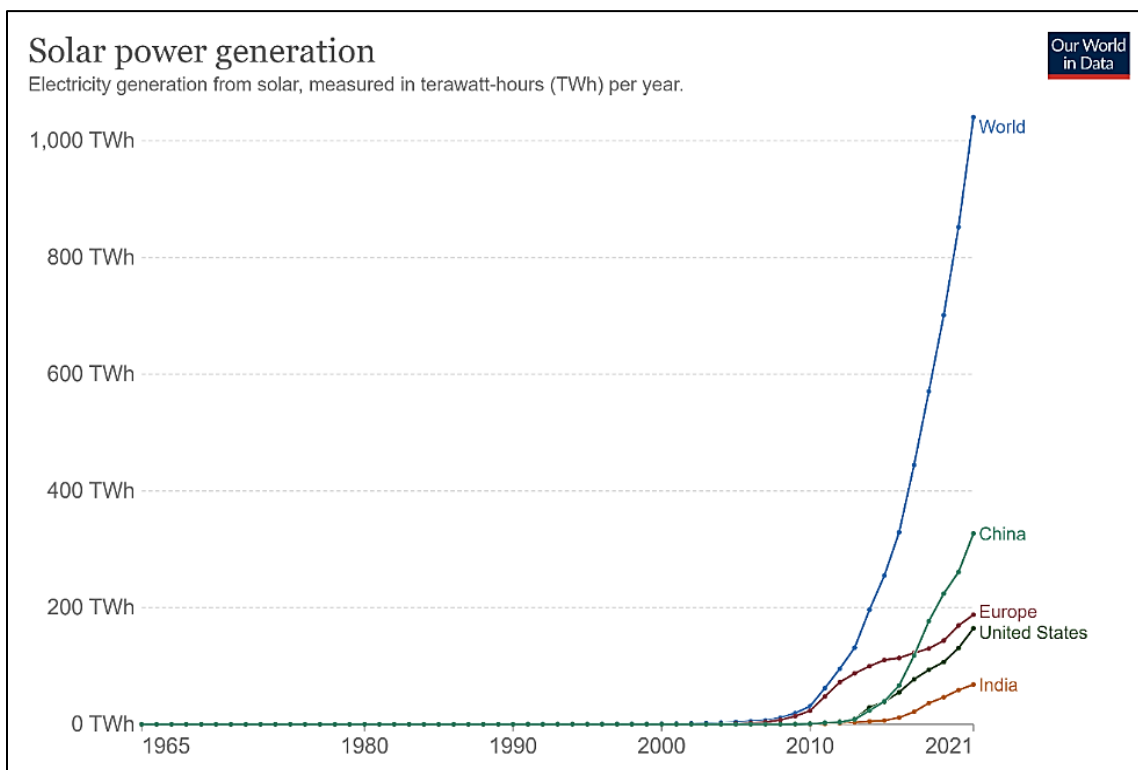


Σχήμα 3: Διακύμανση παγκόσμιας μέσης τιμής της θερμοκρασίας με βάση τον μέσο όρο των ετών 1850 μέχρι 1900 [3]

Το βάρος της χάραξης και υλοποίησης της νέας ενεργειακής πολιτικής θα επωμιστούν τεχνολογικά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στηρίζεται πρωτίστως σε οικονομικά κριτήρια. Όμως, ως άμεση συνέπεια μιας τέτοιας στρατηγικής προσέγγισης θα είναι και ο μετριασμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζεται η αύξηση στις επενδύσεις των τελευταίων δύο δεκαετιών που αφορούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με την ηλιακή να κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών επενδύσεων. Στο **Σχήμα 5** παρουσιάζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ως πηγή την ηλιακή ενέργεια, τόσο σε παγκόσμιο, όσο και σε εθνικό επίπεδο για κάποιες χώρες που κατέχουν σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας.



Σχήμα 4: Παγκόσμιες επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανά τεχνολογία [4]



Σχήμα 5: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές που στηρίζονται στην ηλιακή ενέργεια [5]

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η προσομοίωση ενός ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος με κεντρικό δέκτη, ο οποίος σε συνδυασμό με κλειστό θερμοδυναμικό κύκλο Brayton θα αξιοποιηθεί για ηλεκτροπαραγωγή. Η μοντελοποίηση θα γίνει με βάση την γλώσσα προγραμματισμού Modelica, σε συνδυασμό με το λογισμικό προσομοίωσης Dymola. Τα ερωτήματα που προκύπτουν είναι κατά πόσο αυτό το λογισμικό είναι κατάλληλο για τέτοιου είδους προσομοιώσεις, καθώς επίσης και για τις δυνατότητες προσομοίωσης μεταβατικών φαινομένων σε αυτό. Επίσης, προκύπτει το ερώτημα κατά πόσον μια τέτοια εφαρμογή μεγάλης κλίμακας θα είχε ενδιαφέρον για χώρες όπως η Ελλάδα, οι οποίες έχουν αυξημένη ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια του έτους. Βασικός στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα στη γλώσσα Modelica με εφαρμογή στην ηλιακή ενέργεια και η σύγκριση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες τιμές των παραμέτρων του συστήματος όπου το ηλιακό συγκεντρωτικό σύστημα θα είναι της μορφής ηλιακού πύργου, καθώς επίσης και σύγκριση των αποτελεσμάτων για διάφορες γεωγραφικές περιοχές.

Η μοντελοποίηση ηλιακών συστημάτων με χρήση του λογισμικού Dymola έχει επίσης μελετηθεί σε άλλες εργασίες. Πιο συγκεκριμένα, έχει προταθεί η χρήση του λογισμικού για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης ενέργειας σε δίκτυα τα οποία τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά σε συνδυασμό με θερμικά συστήματα [6]. Επίσης, έχει προταθεί για την μοντελοποίηση ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος με ηλιακό πύργο, με έμφαση στην μοντελοποίηση του εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ ηλιακού και θερμοδυναμικού συστήματος [7]. Τέλος, έχει προταθεί για τη μελέτη υπερκρίσιμου θερμοδυναμικού κύκλου Brayton με υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα ως εργαζόμενο μέσο [8]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αναλυτική παρουσίαση των μοντέλων που αναπτύσσονται στο λογισμικό Dymola με σκοπό τη μοντελοποίηση ενός συστήματος με ηλιακό πύργο, ο οποίος θα τροφοδοτεί έναν θερμοδυναμικό κύκλο Brayton που λειτουργεί με το διοξείδιο του άνθρακα σε υπερκρίσιμη κατάσταση ως εργαζόμενο μέσο.

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια νύξη στο ενεργειακό ζήτημα και στον ρόλο που θα διαδραματίσει η ηλιακή ενέργεια προς την επίλυση του. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τεχνολογίες των ηλιακών συστημάτων, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα συστήματα με ηλιακό πύργο. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται οι θερμοδυναμικοί κύκλοι αερίων, καθώς επίσης και οι ιδιότητες του υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο λογισμικό Dymola, ενώ στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικά στοιχεία της γλώσσας προγραμματισμού Modelica. Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του συστήματος, ενώ στο ένατο η προσομοίωση αυτού. Τέλος, στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς επίσης και τα συμπεράσματα που προκύπτουν, αλλά και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

2.1. Βιώσιμη ανάπτυξη

Τις τελευταίες δεκαετίες, ο όρος βιωσιμότητα έχει αρχίσει να απασχολεί ευρύτερα την ανθρωπότητα, τόσο σε επιστημονικό όσο και σε ευρύτερα κοινωνικό επίπεδο. Συχνά, ο όρος βιωσιμότητα θεωρείται ως συνώνυμο του όρου αειφορία. Η επιστημονική κοινότητα, μέσα από παρατηρήσεις και μελέτες, έχει αντιληφθεί ότι η παρούσα κατάσταση πραγμάτων όσον αφορά τον τρόπο και τον ρυθμό ανάπτυξης δεν μπορεί να συνεχιστεί. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) μέσω του Παρατηρητηρίου Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΠΒΑ) έχει δεσμευτεί προς την πλήρη εφαρμογή του πλάνου του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ) που αφορά τους στόχους για το 2030. Προς αυτή την κατεύθυνση, η ΕΕ έχει αποφασίσει όπως θεσπίσει κάποιους βασικούς πυλώνες και να δώσει κάποιες κατευθυντήριες γραμμές έτσι ώστε να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι. Συγκεκριμένα, ενθαρρύνει την μεταβίβαση σε μια κυκλική και πράσινη οικονομία, χωρίς οικονομικούς και κοινωνικούς αποκλεισμούς, με έμφαση στην καινοτομία και τη βιώσιμη κατανάλωση και παροχή υπηρεσιών [10].

Η βιώσιμη ενεργειακά ανάπτυξη θα πρέπει να εξασφαλίζει την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών, την κοινωνική ευημερία, την οικονομική ανάπτυξη αλλά και την προστασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, θα πρέπει να έχει αντίκτυπο στο σύνολο του πληθυσμού χωρίς διακρίσεις και εξαιρέσεις. Στη βάση αυτής της λογικής, ο ΟΗΕ έχει θέσει 17 στόχους για το μέλλον, οι οποίοι φαίνονται στην **Εικόνα 1**. Οι χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο προς αυτή την επίτευξη. Η παρούσα τάξη πραγμάτων που αφορά την ενέργεια και ευρύτερα την ανάπτυξη δεν μπορεί να συνεχιστεί, αφού σε καμία περίπτωση δεν εξασφαλίζει την βιώσιμη ενεργειακή ανάπτυξη του πλανήτη [9][11].



Εικόνα 1: Βιώσιμοι αναπτυξιακοί στόχοι του ΟΗΕ [11]

2.2. Ανάπτυξη των ΑΠΕ

Στα πρώιμα χρόνια της αναπτυξιακής έξαρσης, οι χαμηλές τιμές των συνήθων ορυκτών καυσίμων στην αγορά, όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας, εμπόδιζαν την ανάπτυξη των ΑΠΕ και την ευρύτερη χρήση τους ως βασική πηγή παραγωγής ενέργειας. Όμως, οι διάφορες ενεργειακές κρίσεις σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και η ανάπτυξη της περιβαλλοντικής συνείδησης από την κοινωνία ώθησαν την ανάπτυξη των ΑΠΕ και έστρεψαν το ενδιαφέρον της ενεργειακής κοινότητας προς την αξιοποίηση τους. Φυσικά, καθοριστικός παράγοντας αποτέλεσε η αναγνώριση των πολλών ωφελειών που προκύπτουν από την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πόρων, τα οποία εκτείνονται σε τομείς πέραν της προστασίας του περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα οικονομικά και γεωπολιτικά οφέλη. Πλέον, οι ΑΠΕ διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή της ενέργειας, αφού δίνουν τη δυνατότητα τόσο για οικιακή εγκατάσταση, όσο και για μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας [9].

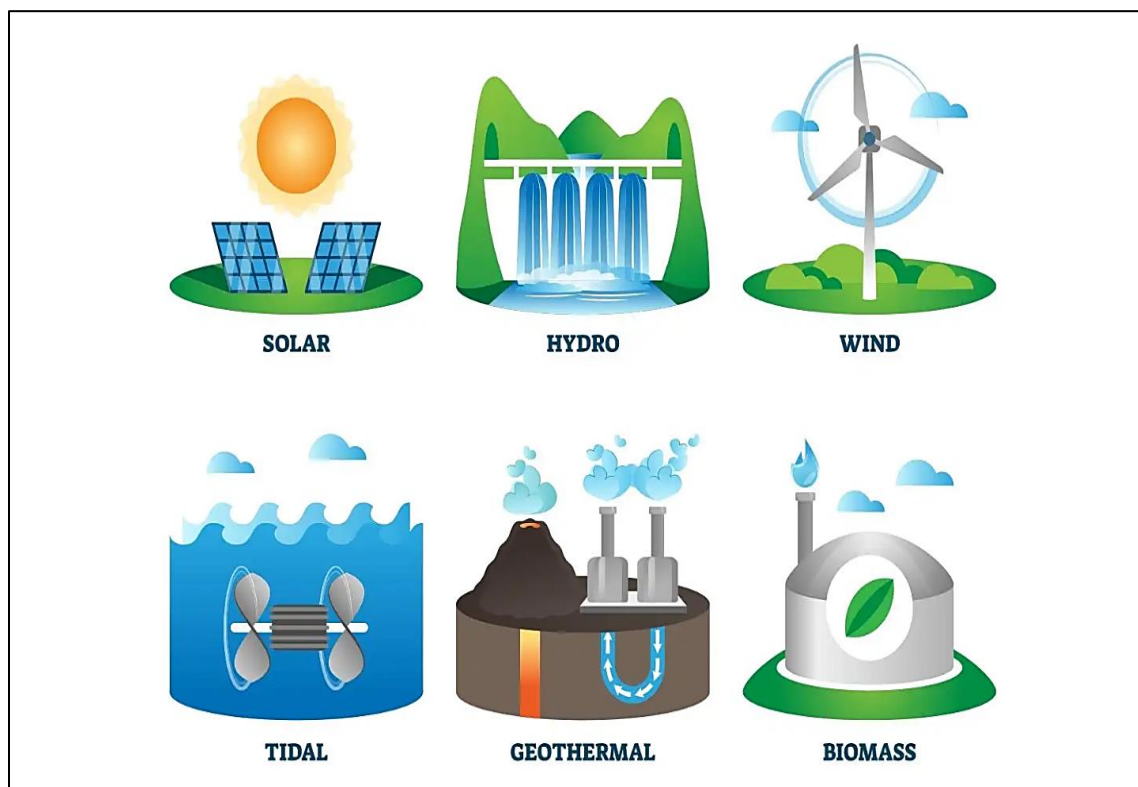
2.3. Τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ

Η ταχεία ανάπτυξη των ΑΠΕ οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα πλεονεκτήματα από την εκμετάλλευση τους είναι πολλαπλάσια από τα αντίστοιχα μειονεκτήματα. Ως μειονεκτήματα θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν οι ανάγκες για δέσμευση μεγάλων εκτάσεων γης, η οπτική και ενδεχομένως η ακουστική όχληση, αλλά και το υψηλό αρχικό κόστος του αρχικού κεφαλαίου μιας ενδεχόμενης επένδυσης [9].

Τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ αφορούν πολλούς τομείς, όπως την οικονομία, την κοινωνία και το περιβάλλον. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι η πηγή τους είναι πρακτικά ανεξάντλητη. Αυτό συμβάλει στην εξοικονόμηση και στη σταδιακή απεξάρτηση από άλλους φυσικούς πόρους οι οποίοι εξαντλούνται, όπως για παράδειγμα το φυσικό αέριο. Επιπρόσθετα, έχουν την ιδιότητα να είναι τοπικές, δηλαδή εκμεταλλεύσιμες σε εθνικό επίπεδο. Αυτό, δίνει τη δυνατότητα σε μια χώρα να ενισχύσει την ενεργειακή της αυτάρκεια αλλά και τον ασφαλή ενεργειακό εφοδιασμό της βιομηχανίας και της κοινωνίας της, ενώ ταυτόχρονα τέτοιες εγκαταστάσεις μπορούν να βρίσκονται διάσπαρτες σε όλη τη χώρα, μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας λόγω μεταφοράς και καλύπτοντας τοπικές ενεργειακές ανάγκες [9].

Η ενίσχυση του ενεργειακού μείγματος μιας χώρας με ΑΠΕ, συμβάλει καθοριστικά στην οικονομική αλλά και την κοινωνική ανάπτυξη. Μπορεί μεν οι ΑΠΕ να έχουν σχετικά υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης, όμως τα λειτουργικά τους κόστη είναι εξαιρετικά χαμηλά, πάντα σε σύγκριση με αντίστοιχες μονάδες παραγωγής ενέργειας με μη ανανεώσιμο καύσιμο. Επιπλέον, μπορούν να αναβαθμίσουν σημαντικά την τοπική κοινωνία, αφού χαρακτηρίζονται ως επενδύσεις εντάσεως εργασίας (δηλαδή προσφέρουν στην τοπική κοινότητα νέες θέσεις εργασίας) αλλά και ανεβάζουν το βιοτικό επίπεδο της κοινότητας προσφέροντας σε αυτήν πρόσβαση σε φθηνή και πράσινη ενέργεια. Τέλος, είναι σε μεγάλο βαθμό φιλικές προς το περιβάλλον, ενώ η αξιοποίηση τους τυγχάνει, σε

σημαντικό βαθμό, κοινωνικής αποδοχής. Οι ΑΠΕ με τη μεγαλύτερη χρήση και εφαρμογή παρουσιάζονται στην **Εικόνα 2** [9].



Εικόνα 2: Οι κατηγορίες ΑΠΕ με τη μεγαλύτερη εφαρμογή [12]

2.4. Μορφές, δυναμικό και μέθοδοι αξιοποίησης των ΑΠΕ

2.4.1. Το δυναμικό των ΑΠΕ

Το δυναμικό των ΑΠΕ χωρίζεται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες, αρχίζοντας από το θεωρητικό δυναμικό και καταλήγοντας στο οικονομικά εκμεταλλεύσιμο. Το θεωρητικό δυναμικό αποτελεί το σύνολο της ενέργειας που υπάρχει διαθέσιμη σε μια συγκεκριμένη περιοχή και είναι ένα αμιγώς χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος. Το διαθέσιμο δυναμικό είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμη σε μια περιοχή χωρίς να υπάρξει επίπτωση στο φυσικό περιβάλλον ή αλλαγή στην κύρια χρήση της γης. Για παράδειγμα, εάν μια περιοχή χαρακτηρίζεται ως αγροτική και η γη είναι κατ' εξοχήν καλλιεργήσιμη, τότε το διαθέσιμο δυναμικό θα είναι πολύ μικρό. Το τεχνολογικό δυναμικό είναι αυτό που μπορεί να αξιοποιηθεί από την αποδοτικότητα της διαθέσιμης τεχνολογίας την εκάστοτε χρονική στιγμή της μελέτης ενός έργου. Τέλος, το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό αποτελεί την ενέργεια που μπορεί να αξιοποιηθεί, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθέσιμη τεχνολογία αλλά και την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Είναι προφανές πως, το δυναμικό που λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας εγκατάστασης με ΑΠΕ είναι το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο [9].

2.4.2. Ηλιακή ενέργεια

Η πηγή της ηλιακής ενέργειας είναι ο ήλιος. Ο τεράστιος αυτός αστέρας του ηλιακού συστήματος παρέχει αυτήν την πηγή ενέργειας στη γη μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλιακή ακτινοβολία, αφού εξασθενήσει λόγω της ύπαρξης της ατμόσφαιρας της γης, φτάνει στην επιφάνεια αυτής. Η ακτινοβολία αυτή χωρίζεται σε άμεση και διάχυτη. Παρόλο που η συνολική ενέργεια αποτελεί το άθροισμα αυτών, είναι ωφέλιμο να μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός των δύο αυτών συνιστωσών, καθώς κάποιες εφαρμογές ηλιακών συστημάτων εκμεταλλεύονται μόνο την άμεση ακτινοβολία, όπως για παράδειγμα οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες. Επιπλέον, η ενέργεια αυτή είναι η θεμελιώδης πηγή και των υπολοίπων ΑΠΕ [9].

Οι τεχνολογίες εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας ποικίλουν. Η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία είναι τα φωτοβολταϊκά. Η τεχνολογία τους στηρίζεται σε ημιαγωγούς για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η επιστημονική κοινότητα σε συνεργασία με την πολιτεία και τη βιομηχανία εστιάζουν στην περαιτέρω μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης μέσω της αύξησης του βαθμού απόδοσης. Στην **Εικόνα 3** παρουσιάζεται μια εγκατάσταση με συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αντίστοιχες συστοιχίες εγκαθίστανται και σε οροφές κτιρίων με κύριο σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ή μέρος αυτών του κτιρίου αυτού. Μια άλλη αναπτυσσόμενη τεχνολογία είναι τα θερμοφωτοβολταϊκά (thermophotovoltaics) τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια εκμεταλλευόμενα τη θερμότητα, δηλαδή το υπέρυθρο τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό, τους δίνει το πλεονέκτημα να λειτουργούν ακόμη και εάν υπάρχει νέφωση στον ουρανό, αφού δεν εξαρτώνται από το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που αποτελεί το ορατό φως και τη διάχυτη ακτινοβολία. Στην **Εικόνα 4** παρουσιάζεται μια συστοιχία παραβολικών συγκεντρωτικών συλλεκτών. Τέλος, μεγάλη εφαρμογή σε οικιακές εγκαταστάσεις παρουσιάζει η τεχνολογία του ηλιακού συλλέκτη, η χρήση του οποίου επιτρέπει την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Στην **Εικόνα 5** παρουσιάζεται μια εγκατάσταση ηλιακού συλλέκτη σε οροφή οικίας [13].



Εικόνα 3: Συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων [14]



Εικόνα 4: Συστοιχία παραβολικών συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών [15]



Εικόνα 5: Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες σε οροφή οικίας [16]

2.4.3. Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια στηρίζεται σε τεχνολογίες μετατροπής της ενέργειας του ανέμου σε άλλη μορφή ενέργειας, όπως για παράδειγμα ηλεκτρικής, παρεμβάλλοντας ένα ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα μετατροπής ενέργειας με κιβώτιο ταχυτήτων, περιστρεφόμενο άξονα και γεννήτρια. Η κύρια τεχνολογία αφορά τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα με δύο ή τρία πτερύγια, αφού αντιστοιχούν στην βέλτιστη τεχνοοικονομική εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Η Κίνα, οι ΗΠΑ και η Ευρώπη διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αγορά της αιολικής ενέργειας, καθώς διαθέτουν τις μεγαλύτερες εταιρίες παραγωγής και εγκατάστασης ανεμογεννητριών αλλά και οι ίδιες ως χώρες έχουν σημαντική εγκατεστημένη ισχύ. Στην **Εικόνα 6** παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα. Πλέον, η αγορά της αιολικής ενέργειας κινείται κυρίως προς την εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων, εφαρμογή η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα όπως υψηλότερες ταχύτητες ανέμου αλλά και τη μη δέσμευση γης. Προς αυτή την κατεύθυνση συμβάλει και το γεγονός ότι οι περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό έχουν πλέον αξιοποιηθεί για εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Στην **Εικόνα 7** παρουσιάζεται ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο [9][13].



Εικόνα 6: Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με τρία πτερύγια [17]



Εικόνα 7: Υπεράκτιο αιολικό πάρκο [18]

2.4.4. Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η πηγή της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι η κινητική ενέργεια του νερού, την οποία αποκτά λόγω της αρχικής του δυναμικής ενέργειας η οποία εξαρτάται κυρίως από το ύψος. Η τεχνολογία που αξιοποιείται είναι αυτή των υδροδυναμικών μηχανών, δηλαδή αντλιών και υδροστροβίλων, που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του νερού σε ηλεκτρική μέσω μιας περιστρεφόμενης ατράκτου ή το αντίθετο. Η δημιουργία νέων μεγάλων υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων φθίνει, αφού στις περιοχές με υψηλό υδροηλεκτρικό δυναμικό έχουν ήδη κατασκευαστεί τέτοια έργα ή είναι πρακτικά εξαιρετικά δύσκολο λόγω της γεωμορφολογίας της περιοχής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή της αντλησιοταμίευσης, η οποία θα μπορούσε να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην αποθήκευση ενέργειας, εξασφαλίζοντας ενεργειακή σταθερότητα σε ένα ενεργειακό μείγμα χωρίς συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Στην **Εικόνα 8** παρουσιάζεται ένα μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο [9][19].



Εικόνα 8: Μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο [20]

2.4.5. Βιομάζα

Η βιομάζα είναι η κυρίαρχη μορφή ΑΠΕ παγκοσμίως. Αυτό οφείλεται κυρίως στις υποανάπτυκτες χώρες των οποίων ο πληθυσμός έχει ως μοναδική πηγή ενέργειας την καύση ξυλείας ή άλλων παρόμοιων υλικών για την παραγωγή θερμότητας. Στον ανεπτυγμένο και αναπτυσσόμενο κόσμο γίνεται προσπάθεια για περαιτέρω ανάπτυξη τεχνολογιών αξιοποίησης της βιομάζας, αφού είναι η μόνη ΑΠΕ που μπορεί να συνεισφέρει στην ηλεκτροπαραγωγή, την παραγωγή θερμότητας αλλά και στις μεταφορές. Η κύρια τεχνολογία αξιοποίησης εστιάζει στην καύση των παραπροϊόντων άλλων βιομηχανιών ή και στην καύση πόρων που καλλιεργούνται ειδικά για το σκοπό αυτό. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έμμεση εκμετάλλευση της βιομάζας για παραγωγή βιοαερίου, το οποίο στη συνέχεια θα μπορούσε να αντικαταστήσει το φυσικό αέριο. Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις έχει κυριαρχήσει η μέθοδος της συμπαραγωγής, δηλαδή παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία και φαίνεται να αποτελεί την πλέον οικονομικά βιώσιμη λύση αξιοποίησης της βιομάζας. Στην **Εικόνα 9** παρουσιάζεται ένας σταθμός αξιοποίησης βιομάζας [9][13].



Εικόνα 9: Σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με χρήση βιομάζας [21]

2.4.6. Γεωθερμία

Η παραγωγή ενέργειας μέσω της γεωθερμίας επιτυγχάνεται αξιοποιώντας το θερμό υπέδαφος, όπως για παράδειγμα θερμά πετρώματα ή και το μάγμα. Η γεωθερμία δεν γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Η πλέον αξιόπιστη και γνωστή τεχνολογία αξιοποίησης της γεωθερμίας είναι η γεωθερμική αντλία θερμότητας, η οποία εκμεταλλεύεται τη σταθερή θερμοκρασία στο υπέδαφος έτσι ώστε να παράγει θερμότητα με μειωμένη κατανάλωση ενέργειας λόγω της χρήσης εναλλακτών θερμότητας. Στην **Εικόνα 10** παρουσιάζεται μια εγκατάσταση γεωθερμικής εκμετάλλευσης [13].



Εικόνα 10: Σύστημα εκμετάλλευσης γεωθερμίας [22]

2.4.7. Κυματική και παλιρροϊκή ενέργεια

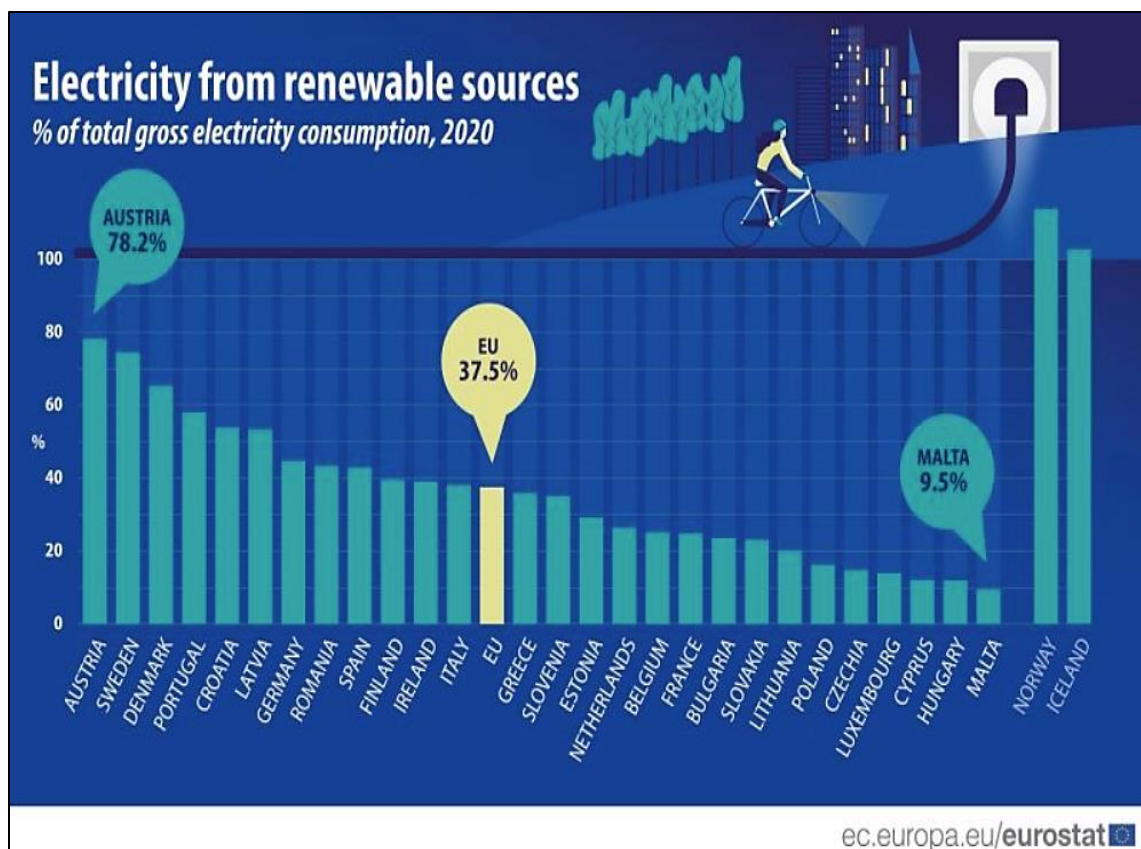
Η ενέργεια που μπορεί να προσφέρει η θάλασσα είναι θεωρητικά ανεξάντλητη. Όμως, το γεγονός ότι η πραγματική εκμετάλλευση αυτής της πηγής είναι εξαιρετικά δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη, αλλά και το γεγονός ότι συνήθως βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από την κατανάλωση, καθιστούν την αξιοποίηση του θαλάσσιου δυναμικού ως μια μη ελκυστική προοπτική. Οι ελάχιστες εφαρμογές εστιάζονται στην κινητική ενέργεια των κυμάτων, στα θαλάσσια ρεύματα και την παλίρροια, καθώς επίσης και σε ακόμη πιο σπάνιες εφαρμογές όπως τη θερμοκρασιακή διαφορά της επιφάνειας της θάλασσας με τον πυθμένα αλλά και τη διαφορά αλμυρότητας του ύδατος. Στην **Εικόνα 11** παρουσιάζεται μια εφαρμογή εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας [9].



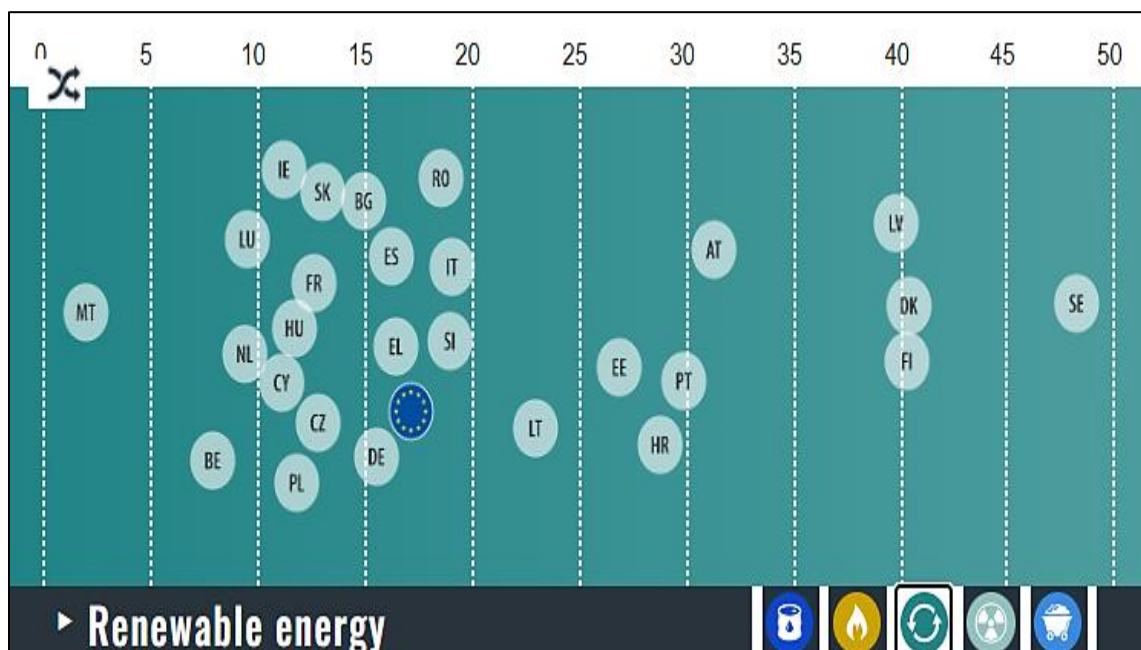
Εικόνα 11: Τεχνολογία εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας [23]

2.5. Το ενεργειακό μείγμα του παρόντος

Η ΕΕ πρωταγωνιστεί στην προσπάθεια της ενεργειακής μετάβασης σε ένα καθεστώς πλήρους απεξάρτησης από τα συμβατικά καύσιμα, όπως τον άνθρακα, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο. Στην **Εικόνα 12** φαίνεται το ποσοστό της ηλεκτρικής κατανάλωσης κάθε χώρας μέλους της ΕΕ του οποίου η παραγόμενη ενέργεια προέρχεται από τις ΑΠΕ. Στην **Εικόνα 13** φαίνεται το ποσοστό της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε χώρα μέλος της ΕΕ και προέρχεται από ΑΠΕ. Η Ελλάδα βρίσκεται και στους δύο δείκτες ελαφρώς κάτω από τον μέσο όρο της ΕΕ, το οποίο είναι αρκετά ενθαρρυντικό. Πέραν της ηλεκτροπαραγωγής, η ΕΕ στοχεύει στην αξιοποίηση των ΑΠΕ και στους τομείς της θέρμανσης και της ψύξης, αλλά και στην αξιοποίηση της βιομάζας στον τομέα των μεταφορών μέσω της παραγωγής βιοκαυσίμων. Αυτό εξηγεί και το γεγονός ότι το ποσοστό κάλυψης της συνολικής ενέργειας από ΑΠΕ είναι μικρότερο από αυτό της κάλυψης των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια [24].

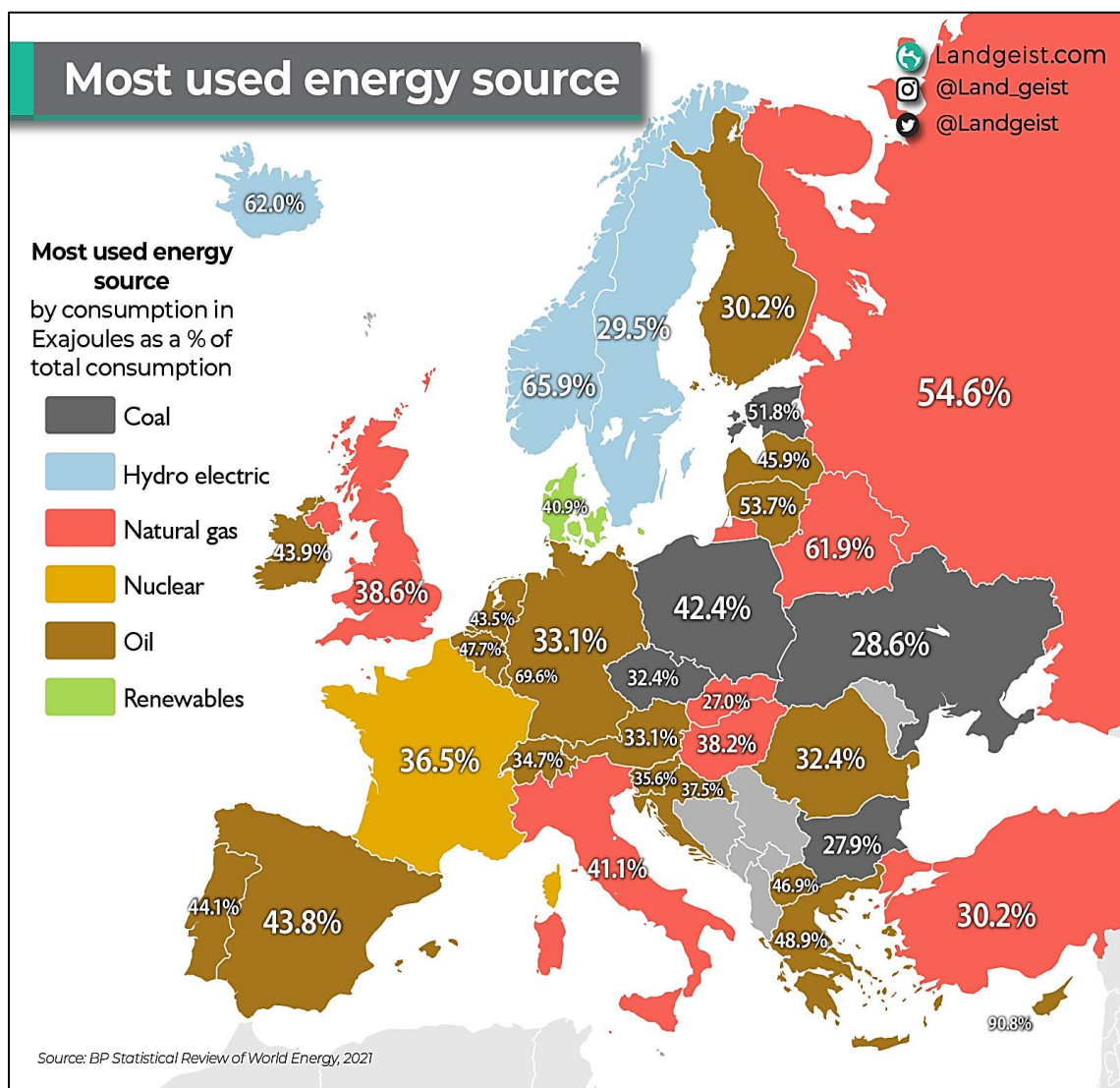


Εικόνα 12: Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ως προς την καταναλισκόμενη ενέργεια για τις χώρες μέλη της ΕΕ το 2020 [24]



Εικόνα 13: Ποσοστό συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από ΑΠΕ για τις χώρες μέλη της ΕΕ το 2021 [25]

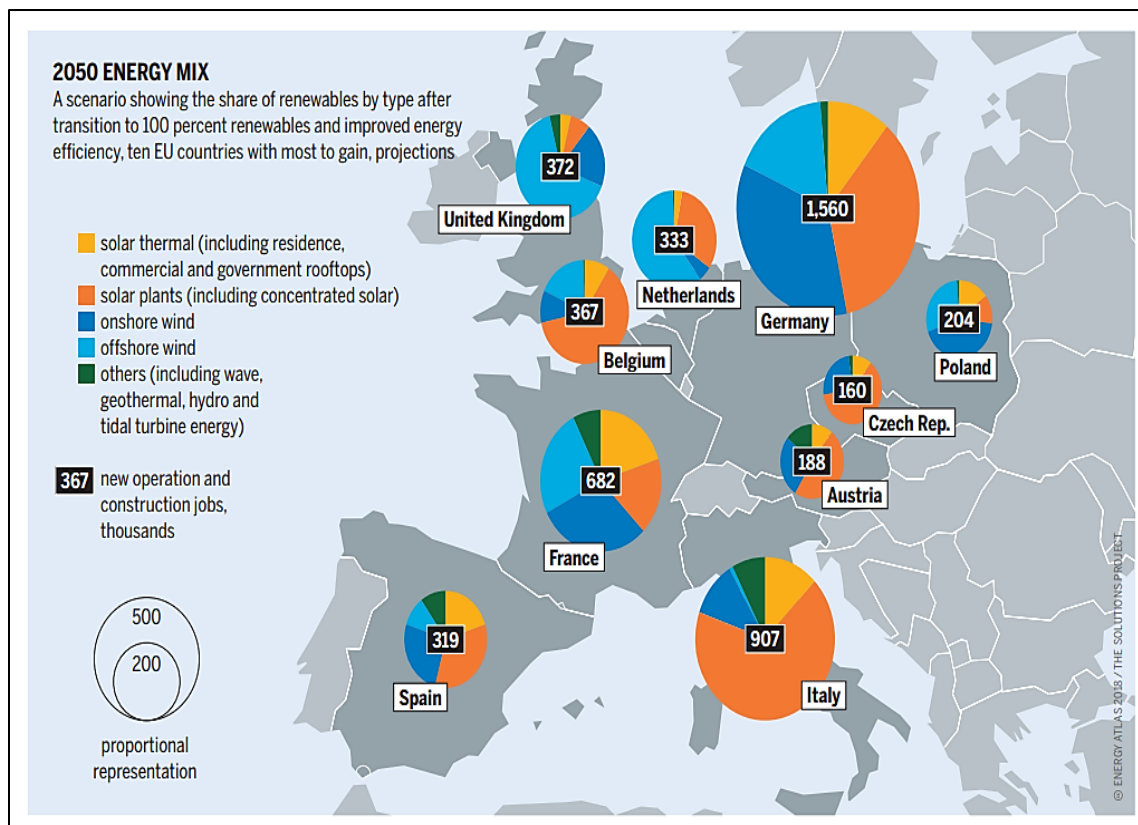
Στην **Εικόνα 14** φαίνεται το ποσοστό και το είδος της κυρίαρχης πηγής παραγωγής ενέργειας σε χώρες της Ευρώπης για το 2021. Οι περισσότερες χώρες είναι ενεργειακά εξαρτημένες σε μεγάλο βαθμό στα συμβατικά καύσιμα. Η Γαλλία, στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην πυρηνική ενέργεια, ενώ οι Σκανδιναβικές χώρες και οι Ισλανδία εκμεταλλεύονται το υδροηλεκτρικό τους δυναμικό. Η μόνη χώρα της οποίας το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που καταναλώνεται σε αυτή προέρχεται από ΑΠΕ είναι η Δανία, η οποία έχει αναπτύξει σε μεγάλο βαθμό την τεχνολογία εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Δεδομένου ότι τα συμβατικά καύσιμα εξαντλούνται, διαφαίνεται ξεκάθαρα η μεγάλη προοπτική εξέλιξης των ΑΠΕ οι οποίες θα αποτελούν τη βάση του μελλοντικού ενεργειακού μείγματος [26].



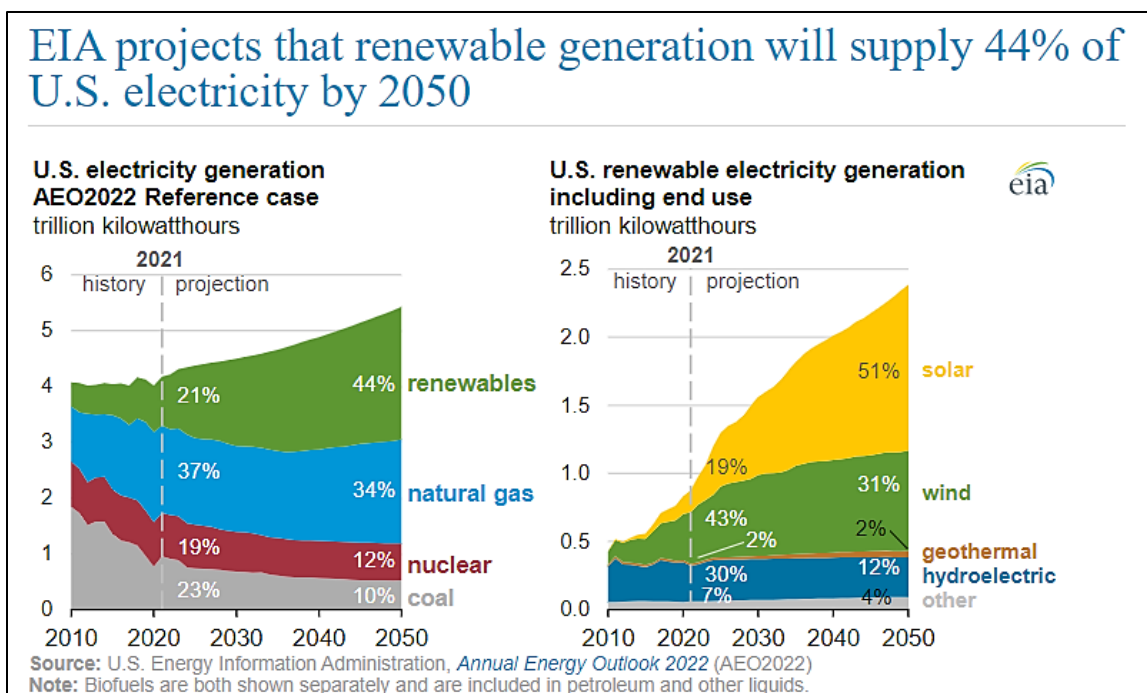
Εικόνα 14: Ποσοστό και είδος κυρίαρχης πηγής παραγωγής ενέργειας σε χώρες της Ευρώπης [26]

2.6. Το ενεργειακό μείγμα του μέλλοντος

Η ΕΕ έχει δεσμευτεί ότι μέχρι το 2050 θα απεξαρτηθεί εντελώς από τα συμβατικά καύσιμα, έτσι ώστε να μπορεί να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας παγκοσμίως, αλλά και να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και ευρύτερα της προστασίας του περιβάλλοντος. Στην **Εικόνα 15** παρουσιάζεται ένα σενάριο για το ενεργειακό μείγμα χωρών της Ευρώπης για το 2050, το οποίο θα στηρίζεται αποκλειστικά σε ΑΠΕ. Όπως φαίνεται, σε αρκετές χώρες αναμένεται να έχουν υψηλό ποσοστό συνεισφοράς οι εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας. Αντίστοιχα, στην **Εικόνα 16** παρουσιάζεται το μελλοντικό ενεργειακό μείγμα των ΑΠΕ για τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (ΗΠΑ), στο οποίο φαίνεται ότι κυρίαρχη μορφή ΑΠΕ θα είναι η ηλιακή ενέργεια με ποσοστό 51%, ενώ συνολικά οι ΑΠΕ θα καλύπτουν το 44% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2050. Συμπερασματικά, η ηλιακή ενέργεια αναμένεται να παρουσιάσει υψηλούς δείκτες ανάπτυξης τις επόμενες δεκαετίες και θα κατέχει σημαντικό μέρος του ενεργειακού μείγματος [27][28].



Εικόνα 15: Ενεργειακό μείγμα 10 χωρών της Ευρώπης το 2050 στο σενάριο που ολόκληρο το ενεργειακό τους μείγμα αποτελείται αποκλειστικά από ΑΠΕ [27]



Εικόνα 16: Ποσοστό των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα των ΗΠΑ το 2050 [28]

3. Ηλιακά συστήματα

3.1. Αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας

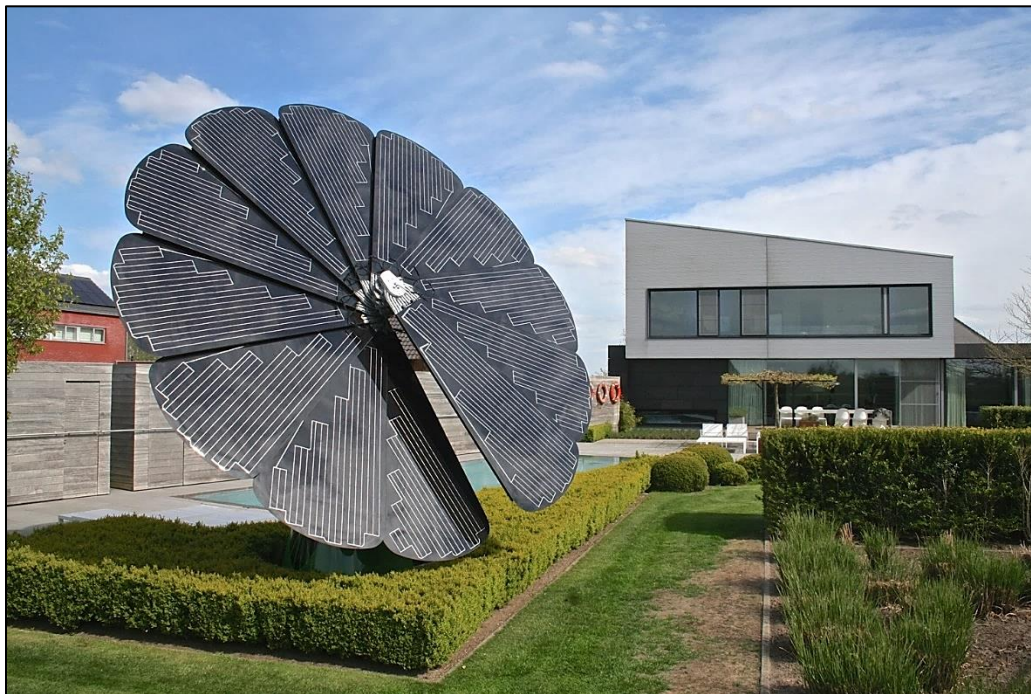
Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί το σύνολο της ενέργειας και των μορφών αυτής οι οποίες οφείλονται στον ήλιο. Η προσπάθεια προσδιορισμού του δυναμικού της πηγής είναι ανούσια αφού, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αποτελεί ανεξάντλητη πηγή και ως εκ τούτου το δυναμικό της είναι απροσδιόριστο. Η ηλιακή ενέργεια είναι η μόνη μορφή ενέργειας η οποία προσδίδεται απευθείας στη γη. Η αιτία αυτής της πρόσδοσης ενέργειας στη γη δεν είναι άλλη από την ηλιακή ακτινοβολία. Οι υπόλοιπες ΑΠΕ αποτελούν παράγωγα αυτής της πηγής. Για παράδειγμα, οι άνεμοι, που είναι η πηγή της αιολικής ενέργειας, προκαλούνται από την άνιση θερμοκρασιακή κατανομή στις αέριες μάζες εντός ατμόσφαιρας. Η μόνη ΑΠΕ που δεν σχετίζεται άμεσα με την ηλιακή ακτινοβολία είναι η γεωθερμία [29].

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας εστιάζει σε δύο βασικούς τομείς που είναι η θερμική μετατροπή και η ηλεκτρική μετατροπή αυτής. Ανάλογα με τις ανάγκες, υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες η μία επιλογή υπερέχει σε πλεονεκτήματα της άλλης, όπως για παράδειγμα σε μια οικία, όπου η ανάγκη για ΖΝΧ ικανοποιείται από εγκατάσταση θερμικής μετατροπής, ενώ η ανάγκη για κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρισμό από την ηλεκτρική μετατροπή. Η τεχνολογία που κυριαρχεί στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (Φ/Β). Αντίστοιχα, η κυρίαρχη τεχνολογία στην παραγωγή θερμότητας είναι τα συγκεντρωτικά ηλιακά, γνωστά και ως θερμοφωτοβολταϊκά στοιχεία (PVT) [29].

3.1.1. Φωτοβολταϊκά συστήματα

Η βάση ενός Φ/Β συστήματος αποτελείται από ημιαγωγά υλικά, όπως για παράδειγμα το πυρίτιο (Si). Ένα Φ/Β στοιχείο (γνωστό και ως Φ/Β κελί) αποτελείται από τον συνδυασμό ημιαγωγών. Οι ημιαγωγοί είναι υλικά τα οποία συνδυάζουν ιδιότητες μονωτικών και αγώγιμων υλικών. Υπό κανονικές συνθήκες, συνήθως λειτουργούν ως μονωτές. Όμως, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις είναι δυνατό να λειτουργήσουν ως αγωγοί. Ως μια τέτοια προϋπόθεση μπορεί να χαρακτηριστεί η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα τέτοιο υλικό. Η ακτινοβολία αποδίδει ενέργεια στα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη σθένους του υλικού, με αποτέλεσμα να απελευθερωθούν από τους δεσμούς που τα συγκρατούν στο χημικό στοιχείο και να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας, άγοντας με την κίνηση τους το ηλεκτρικό ρεύμα. Η ενεργειακή διαφορά που πρέπει να καλυφθεί ονομάζεται χάσμα ζώνης και είναι χαρακτηριστική κάθε υλικού. Στα υλικά αυτά προστίθενται ειδικές προσμίξεις, οι οποίες διευκολύνουν την αποδέσμευση των ηλεκτρονίων. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού εξαρτάται άμεσα από τον συνδυασμό του φάσματος του φωτός που προσπίπτει στο υλικό σε σχέση με το χάσμα ζωνών που χαρακτηρίζει το υλικό. Η μέγιστη θεωρητική απόδοση ενός τέτοιου Φ/Β κελιού μπορεί να ανέλθει στο 33%, με τη μέγιστη τεχνολογικά απόδοση που έχει

επιτευχθεί εργαστηριακά να ανέρχεται στο 25%. Στις τεχνολογικές εφαρμογές, η τεχνολογία των Φ/Β παρουσιάζει χαμηλότερους βαθμούς απόδοσης της τάξης του 20% με 25%. Στην **Εικόνα 17** φαίνεται το φωτοβολταϊκό Sunflower, μια ιδιαίτερη μορφή φωτοβολταϊκού συστήματος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [9].



Εικόνα 17: Φωτοβολταϊκό σύστημα «Sunflower» [30]

3.1.2. Θερμικά ηλιακά συστήματα

Η θερμική εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προηγείται ιστορικά σε σχέση με την ηλεκτρική εκμετάλλευση. Η βασική ιδέα των θερμικών ηλιακών συστημάτων στηρίζεται στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για τη θέρμανση ενός μέσου. Αρχικά, το μέσο αυτό ήταν το νερό, το οποίο θα χρησιμοποιείτο αυτούσιο (συστήματα ανοικτού τύπου) ενώ στη συνέχεια εισήχθησαν και τα συστήματα στα οποία η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει ένα ρευστό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί άμεσα ή έμμεσα σε κάποια άλλη διεργασία. Η βάση τέτοιων συστημάτων είναι ο ηλιακός συλλέκτης. Ο πιο ευρέως διαδεδομένος τύπος ηλιακού συλλέκτη είναι ο επίπεδος. Ένας επίπεδος συλλέκτης αποτελείται από μια απορροφητική πλάκα, η οποία θα πρέπει να έχει υψηλή απορροφητικότητα και ταυτόχρονα υψηλή θερμική αγωγιμότητα, έτσι ώστε να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια να την αποδίδει στο ρευστό, το οποίο διακινείται σε σωληνώσεις συγκολλημένες στην πλάκα αυτή. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα μονωτικά στοιχεία, δηλαδή το γυάλινο κάλυμμα το οποίο εμποδίζει τις απώλειες θερμότητας από την πλάκα προς το περιβάλλον, αλλά και τα μονωτικά υλικά που εμποδίζουν τις απώλειες θερμότητας από τη σωλήνωση προς το περιβάλλον. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες διαχωρίζονται κυρίως σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση το ρευστό, σε συλλέκτες νερού και συλλέκτες αέρα [9][29].

Ένας άλλος τύπος ηλιακού συστήματος είναι ο συλλέκτης κενού. Η απορροφητική πλάκα, αφού συγκολληθεί με σωλήνες μεταφοράς ρευστού, τοποθετείται εντός κυλινδρικού υάλινου σωλήνα. Στη συνέχεια αφαιρείται ο αέρας από τον κυλινδρικό σωλήνα έτσι ώστε να εξασφαλιστούν συνθήκες κενού εντός αυτού. Η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το γυαλί και προσπίπτει στην απορροφητική πλάκα. Λόγω της κυλινδρικής γεωμετρίας και του μεγέθους του σωλήνα, η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα στην απορροφητική πλάκα σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η αφαίρεση του αέρα καθιστά τις θερμικές απώλειες από την πλάκα προς το περιβάλλον λόγω συναγωγής αμελητέες, ενώ η χαμηλή πίεση εντός του σωλήνα ελαχιστοποιεί της απώλειες θερμότητας λόγω αγωγής. Οι συλλέκτες κενού παρουσιάζουν αυξημένη απόδοση σε σχέση με τους απλούς ηλιακούς συλλέκτες. Αυτό ισχύει διότι παρουσιάζουν μειωμένες θερμικές απώλειες λόγω της ύπαρξης του κενού, αλλά και από το γεγονός ότι εκμεταλλεύονται τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία. Επιπλέον, η αποδοτικότητα τους αυξάνεται λόγω της κάθετης πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η κατασκευή τους παρουσιάζει δυσκολίες λόγω της απαίτησης δημιουργίας αλλά και διατήρησης κενού και ως εκ τούτου έχουν μεγαλύτερο κόστος [9][29].

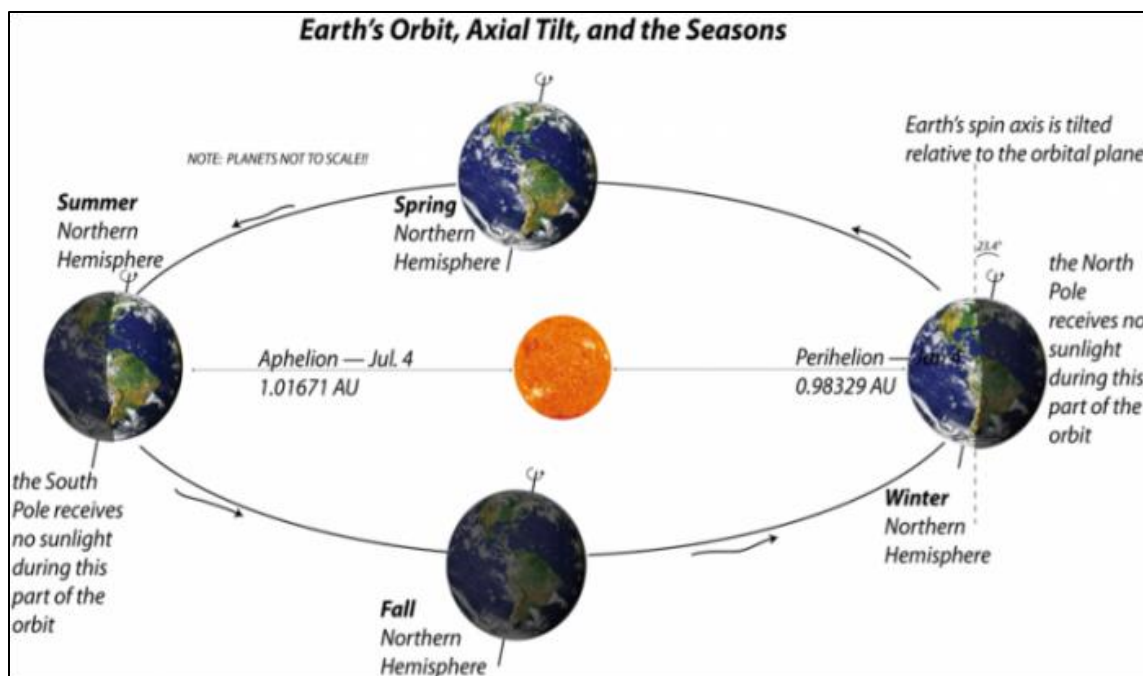
Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες, αποτελούν ένα τρίτο τύπο ηλιακών συλλεκτών. Η παρούσα εργασία ασχολείται με αυτό τον τύπο συλλέκτη και ειδικότερα με την εφαρμογή του ηλιακού πύργου. Γενικά, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε συγκεκριμένο σημείο στο οποίο βρίσκεται η πλάκα απορρόφησης. Αυτό συμβαίνει μέσω ανάκλασης ή και διάθλασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε άλλη επιφάνεια, η οποία ανάλογα με τον τύπο του συλλέκτη μπορεί να είναι ποικίλων γεωμετριών. Η πλέον γνωστή γεωμετρία είναι αυτή του κοίλου παραβολικού συλλέκτη, η οποία φαίνεται στην **Εικόνα 4**. Επιπλέον, υπάρχουν και οι συγκεντρωτές σύνθετης καμπυλότητας, όπως είναι οι παραβολοειδείς και οι σφαιρικού τύπου συγκεντρωτές. Μια πρωτότυπη κατασκευή συγκεντρωτικού συλλέκτη φαίνεται στην **Εικόνα 18**, η οποία εκμεταλλεύεται τη σφαιρική γεωμετρία για να εστιάσει την ηλιακή ακτινοβολία στο επιθυμητό σημείο. Σε πολλές εφαρμογές συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι επιθυμητή η κατασκευή αυτών με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας κίνησης, δηλαδή να έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται σε έναν ή δύο άξονες, έτσι ώστε να ακολουθούν την κίνηση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό, αυξάνει σημαντικά την αποδοτικότητα των συλλεκτών [29].



Εικόνα 18: Σφαιρικός συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης [31]

3.2. Ηλιακή ακτινοβολία

Ο ήλιος είναι το μεγαλύτερο αστέρι του ηλιακού συστήματος στο οποίο ανήκει η γη. Η γη περιστρέφεται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον ήλιο, ο οποίος αποτελεί τη μία εστία αυτής της έλλειψης. Ως συνέπεια, η απόσταση γης-ηλίου δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους. Στην **Εικόνα 19** παρουσιάζεται η θέση της γης για τέσσερις διαφορετικές μέρες του χρόνου, μία για κάθε εποχή. Η ελάχιστη απόσταση σημειώνεται τον Ιανουάριο στα 147,1 εκατομμύρια χιλιόμετρα (το επονομαζόμενο περιήλιο) ενώ η μέγιστη σημειώνεται τον Ιούλιο στα 152,1 εκατομμύρια χιλιόμετρα (το επονομαζόμενο αφήλιο). Ο ήλιος αποτελείται σχεδόν από όλα τα χημικά στοιχεία τα οποία βρίσκονται σε αέρια φάση, με το υδρογόνο (H_2) να κυριαρχεί σε ποσοστό 80%. Οι τεράστιες πιέσεις και θερμοκρασίες που επικρατούν στον ήλιο οδηγούν τα στοιχεία σε χημικές αντιδράσεις. Η διάμετρος του ηλίου είναι δύσκολο να προσδιορισθεί επακριβώς, λόγω της άστατης κατάστασης που επικρατεί στην επιφάνεια του κατά τις χημικές αντιδράσεις. Η ακτίνα του ηλίου εκτιμάται στα $(6,960 \pm 0,001) \times 10^8 \text{ km}$. Λόγω του τεράστιου μεγέθους του ηλίου και του πολύ υψηλού ρυθμού των χημικών αντιδράσεων, εντέλει ο ρυθμός έκκλησης ενέργειας από τον ήλιο προσδιορίζεται στα $3,8 \times 10^{23} \text{ kW}$ [29][33].



Εικόνα 19: Απόσταση γης-ηλίου σε αστρονομικές μονάδες ($1\text{au}=149.597.871\text{km}$) [34]

Η ηλιακή σταθερά είναι η ισχύς που δέχεται μια επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρας, όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα σε αυτή και η απόσταση γης-ηλίου βρίσκεται στη μέση της τιμής. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι $G_{sc}=1353\text{W/m}^2$. Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται η ίδια επιφάνεια κατά τη διάρκεια του έτους μεταβάλλεται λόγω της μεταβαλλόμενης απόστασης γης-ηλίου και υπολογίζεται από την **Εξίσωση (1)** [32].

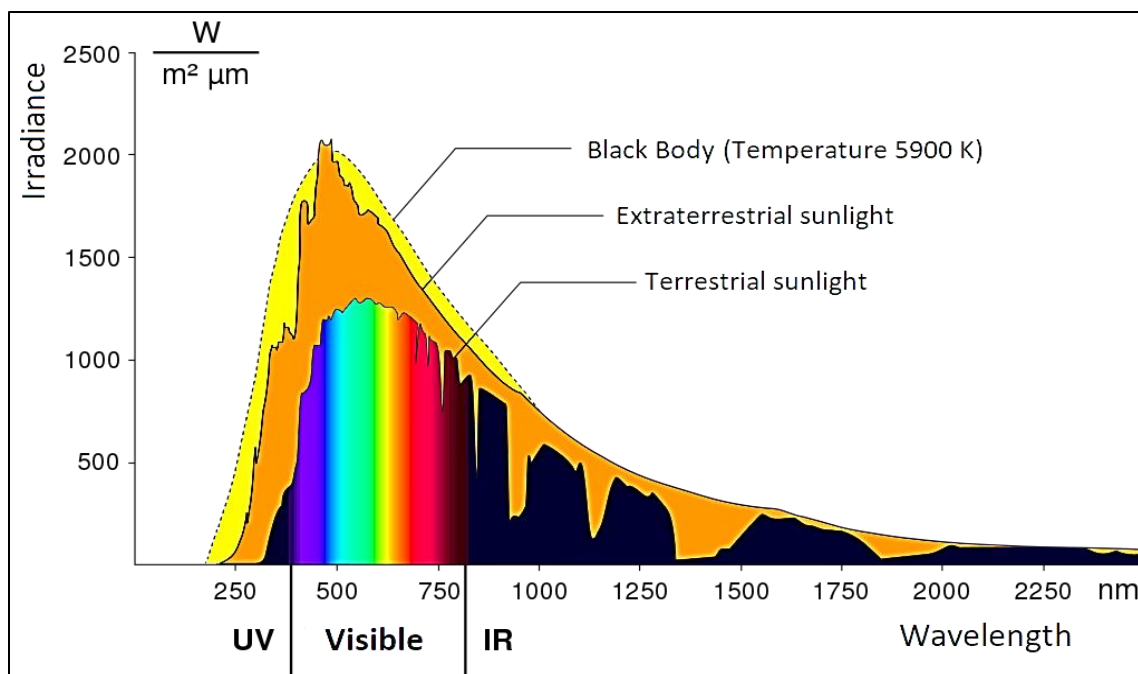
$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right) \quad (1)$$

όπου:

G_{on} = ηλιακή ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας [W/m^2]

n = $1 \div 365$ ημέρα του έτους [-]

Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6**. Το ορατό φάσμα βρίσκεται στην περιοχή 380nm με 780nm. Τα μήκη κύματος μεγαλύτερα από 780nm βρίσκονται στην περιοχή υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ τα μήκη κύματος μικρότερα από 380nm στην αντίστοιχη υπεριώδη. Όπως φαίνεται, το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας βρίσκεται στην περιοχή του ορατού φάσματος και της υπέρυθρης ακτινοβολίας, καθώς αυτή φτάνει στη γη εξασθενημένη λόγω της αλληλεπίδρασης της με την ατμόσφαιρα [32].



Σχήμα 6: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας [35]

3.2.1. Ηλιακές γωνίες

Η θέση του ηλίου, αλλά και η κλίση της συλλεκτικής επιφάνειας, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ικανότητα εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Ως εκ τούτου, ορίζονται οι ακόλουθες γωνίες με σκοπό τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που εντέλει προσπίπτει στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Στη συνέχεια παρατίθενται οι ορισμοί των βασικών ηλιακών γωνιών, ενώ στην **Εικόνα 20** φαίνεται η σχηματική απεικόνιση [32].

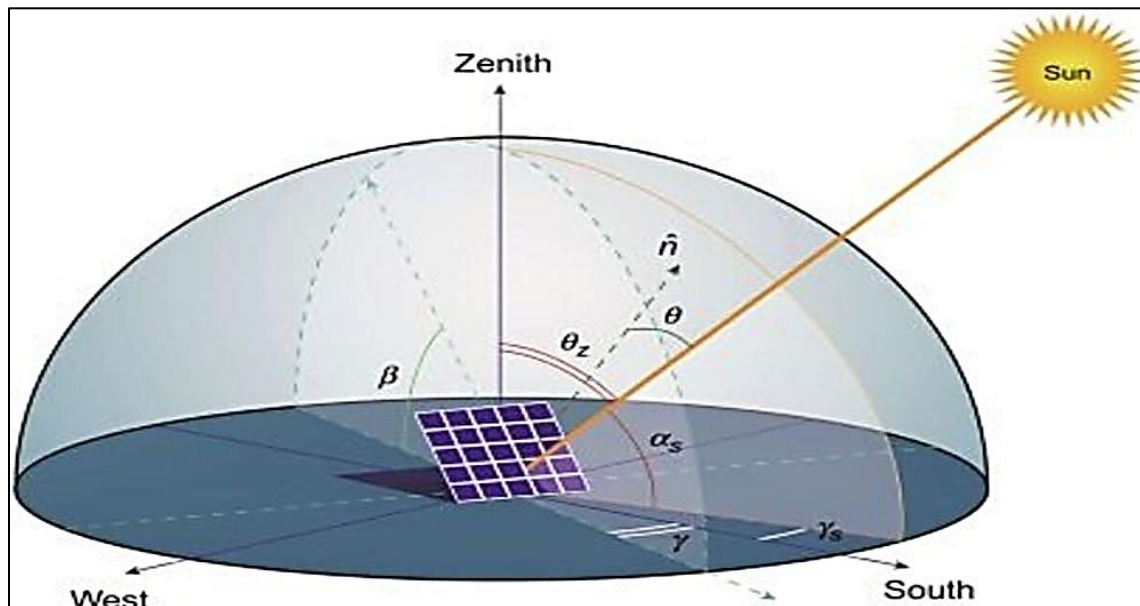
Γωνία ζηνίθ (θ_z): Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατακόρυφου του παρατηρητή και της ευθείας όρασης του ηλίου. Ως ευθεία όρασης ηλίου ορίζεται η ευθεία που ενώνει νοητά τον παρατηρητή με τη θέση του ήλιου στον ουρανό. Οι τιμές που λαμβάνει είναι $0 \leq \theta_z \leq 90^\circ$, με την τιμή $\theta_z = 90^\circ$ να λαμβάνεται κατά την ανατολή του ηλίου [32].

Ηλιακό ύψος (α): Η συμπληρωματική γωνία της θ_z [32].

Αζιμούθιο ηλίου (γ_s): Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και του νότιου γεωγραφικού προσανατολισμού. Οι τιμές που λαμβάνει είναι $-90^\circ \leq \gamma_s \leq 90^\circ$. Κατά το ηλιακό μεσημέρι η τιμή της $\gamma_s = 0^\circ$ [32].

Αζιμούθιο επιφάνειας (γ): Η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο και του νότιου γεωγραφικού προσανατολισμού. Οι τιμές που λαμβάνει είναι $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$. Η τιμή $\gamma = 0$ αντιστοιχεί στο νότιο προσανατολισμό, ενώ η τιμή $\gamma = 90^\circ$ στο δυτικό προσανατολισμό [32].

Κλίση επιπέδου (θ): Η γωνία που σχηματίζει η συλλεκτική επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Οι τιμές που λαμβάνει είναι $0 \leq \beta \leq 180^\circ$. Για το οριζόντιο επίπεδο η τιμή είναι $\beta=0$, ενώ για τιμές $\beta > 90^\circ$ η επιφάνεια βλέπει προς τα κάτω. Τέτοιες γωνίες βρίσκουν εφαρμογή σε συλλέκτες διπλής όψεως [32].

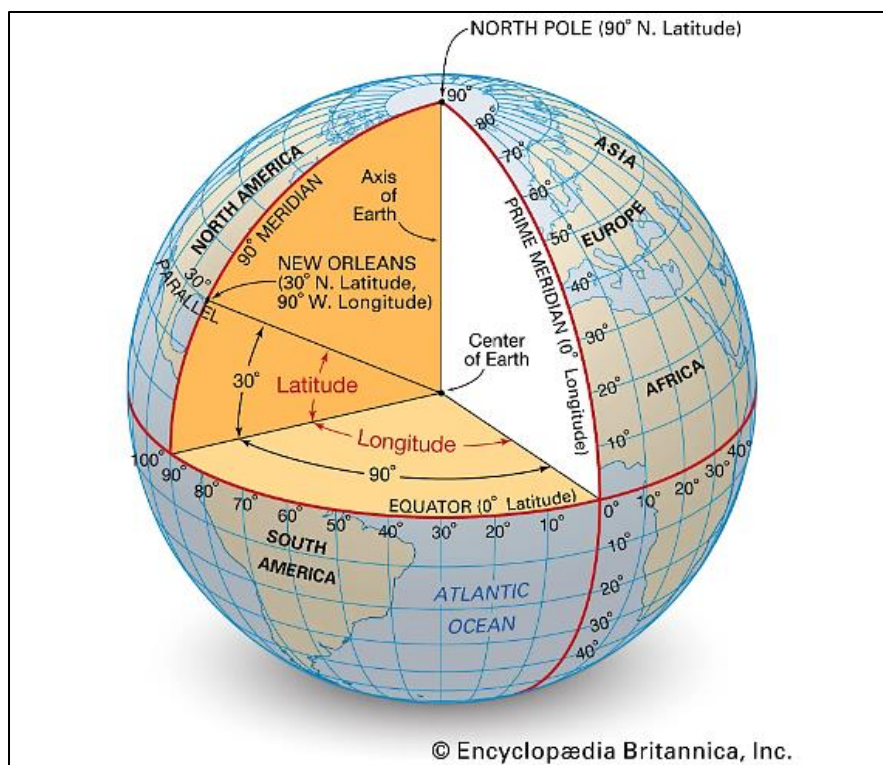


Εικόνα 20: Ηλιακές γωνίες ηλίου και συλλεκτικής επιφάνειας [36]

Όπως έχει προαναφερθεί, σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα επίπεδο παίζει και η γεωγραφική θέση. Οι δύο γωνίες που περιγράφουν επακριβώς αυτή τη θέση είναι το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος. Ο ορισμός των δύο αυτών γωνιών δίνεται στη συνέχεια, ενώ στην **Εικόνα 21** παρουσιάζονται παραστατικά [32].

Γεωγραφικό πλάτος (ϕ): Η γωνία που σχηματίζεται από ένα επιφανειακό σημείο της γης προς το επίπεδο του ισημερινού. Οι τιμές που λαμβάνει είναι $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$, με $\phi=0$ το επίπεδο του ισημερινού και $\phi > 0$ το βόρειο ημισφαίριο [32].

Γεωγραφικό μήκος (λ): Η γωνία που σχηματίζεται από τον μεσημβρινό που διέρχεται ένα επιφανειακό σημείο της γης προς τον πρώτο μεσημβρινό. Οι τιμές που λαμβάνει βρίσκονται στο εύρος $-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$, με $\lambda=0$ τον πρώτο μεσημβρινό (μεσημβρινός του Greenwich) και $\lambda > 0$ το δυτικό ημισφαίριο [32].



Εικόνα 21: Γεωγραφικό μήκος λ (Longitude) και γεωγραφικό πλάτος φ (Latitude) [37]

Ως ηλιακή απόκλιση (δ) ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται από τη θέση του ηλίου ως προς το επίπεδο του ισημερινού κατά το ηλιακό μεσημέρι. Η ηλιακή απόκλιση υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (2)**, και οι τιμές που λαμβάνει είναι $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ [32].

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (2)$$

όπου:

δ = ηλιακή απόκλιση [$^\circ$]

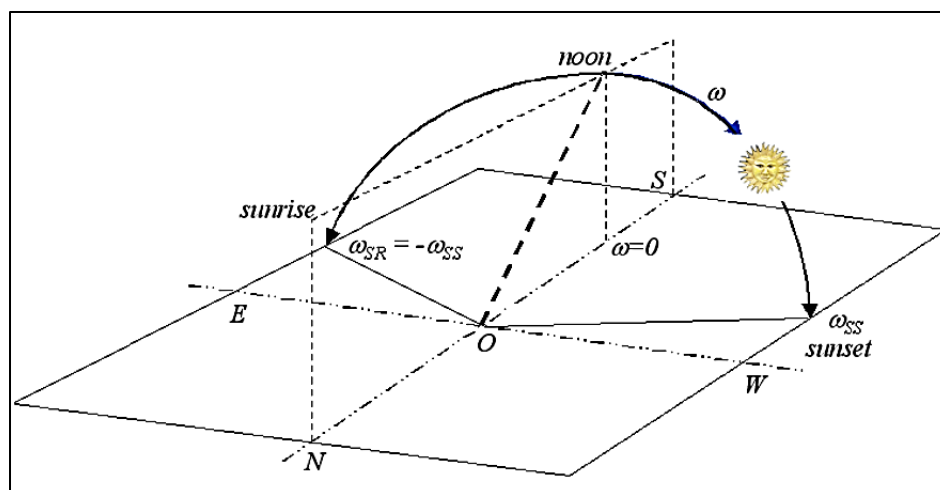
n = $1 \div 365$ ημέρα του έτους [-]

Καθώς η γη περιστρέφεται περί τον άξονα της, εισάγεται η έννοια της ωριαίας γωνίας (ω) που ορίζεται ως η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου προς δύση ή ανατολή. Η γη περιστρέφεται περί τον άξονα της με $0,25^\circ/\text{min}$. Η ωριαία γωνία υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (3)**. Η τιμή $\omega=0$ αντιστοιχεί στο ηλιακό μεσημέρι, όταν δηλαδή ο ήλιος βρίσκεται πάνω από τον αντίστοιχο τοπικό μεσημβρινό. Για ώρες μετά την δωδεκάτη μεσημβρινή λαμβάνει θετικές τιμές. Στην **Εικόνα 22** παρουσιάζεται σχηματικά η ωριαία γωνία [32].

$$\omega = 0,25 \cdot (\text{λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (3)$$

όπου:

ω = ωριαία γωνία [$^\circ$]



Εικόνα 22: Σχηματική αναπαράσταση ωριαίας γωνίας [38]

3.2.2. Ηλιακός χρόνος

Ως ηλιακός χρόνος (t_{sol}) ορίζεται ο μετρούμενος χρόνος μόνο κατά τις ώρες μεταξύ ανατολής και δύσης του ηλίου. Ως ηλιακό μεσημέρι ορίζεται η στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται πάνω από τον τοπικό μεσημβρινό. Ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει απαραίτητα με τον πραγματικό χρόνο που μετρά το ρολόι (t_{clock}). Η συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών χρόνων υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (4)**, όπου το θετικό πρόσημο αντιστοιχεί στο δυτικό ημισφαίριο. Ο διορθωτικός όρος (E) αντιπροσωπεύει τη διόρθωση λόγω της κίνησης της γης γύρω από τον ήλιο [32].

$$t_{sol} = t_{clock} \pm 4(\lambda_{st} - \lambda_{loc}) + E \quad (4)$$

όπου:

λ_{st} = γεωγραφικό μήκος επόμενου κύριου μεσημβρινού [$^{\circ}$]

λ_{loc} = γεωγραφικό μήκος παρατηρητή [$^{\circ}$]

$E = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B$ [min]

$B = \frac{360 \cdot (n-81)}{364}$ [$^{\circ}$]

$n = 1 \div 365$ ημέρα του έτους [-]

Η διάρκεια της ημέρας σε ώρες (N) υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (5)**. Για τον υπολογισμό αυτό εισάγεται η έννοια της ωριαίας γωνίας δύσης ή ανατολής (ω_s) [32].

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (5)$$

όπου:

$\cos \omega_s = -\tan \varphi \cdot \tan \delta$

φ = γεωγραφικό πλάτος [$^{\circ}$]

δ = ηλιακή απόκλιση [$^{\circ}$]

3.2.3. Γωνία πρόσπτωσης

Η γωνία πρόσπτωσης (θ) ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των ηλιακών ακτινών που προσπίπτουν σε μία επιφάνεια και του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας αυτής. Η επιθυμητή τιμή της γωνίας αυτής είναι $\beta=0$, δηλαδή οι ηλιακές ακτίνες να προσπίπτουν κάθετα στη συλλεκτική επιφάνεια. Η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται ως μία τριγωνομετρική συνάρτηση των ηλιακών γωνιών που ορίστηκαν στο εδάφιο 3.2.1. Η σχέση αυτή δίνεται από την **Εξίσωση (6)** στη γενική της μορφή [32].

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (6)$$

όπου:

θ = γωνία πρόσπτωσης [$^{\circ}$]

δ = ηλιακή απόκλιση [$^{\circ}$]

φ = γεωγραφικό πλάτος [$^{\circ}$]

β = κλίση συλλεκτικής επιφάνειας [$^{\circ}$]

γ = αζιμούθιο συλλέκτη [$^{\circ}$]

ω = ωριαία γωνία [$^{\circ}$]

Υποθέτοντας οριζόντια επιφάνεια, δηλαδή $\beta=0$, τότε η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται εξ' ορισμού με τη γωνία ζενίθ (θ_z). Η **Εξίσωση (7)** προκύπτει απλοποιώντας την **Εξίσωση (6)** και οδηγεί στον υπολογισμό της γωνίας ζενίθ (θ_z) [32].

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (7)$$

Με στόχο την βελτίωση της απόδοσης, τα φωτοβολταϊκά ή και τα συγκεντρωτικά ηλιακά μπορεί να εδράζονται σε βάσεις οι οποίες διαθέτουν ενσωματωμένο μηχανισμό κίνησης. Η κίνηση μπορεί να είναι σε έναν ή δύο άξονες. Οι πιθανές κινήσεις που μπορεί να επιτρέψει μια τέτοια βάση είναι η στροφή από ανατολή προς δύση ή από κάτω προς τα πάνω, αλλά και η οριζόντια μετατόπιση. Τέτοια συστήματα κρίνονται σχεδόν απαραίτητα σε εγκαταστάσεις με συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες. Για συλλέκτη που μπορεί να περιστρέφεται περί έναν οριζόντιο άξονα στη διεύθυνση ανατολής-δύσης και με τη δυνατότητα συνεχούς ρύθμισης κατά τη διάρκεια της ημέρας, η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (8)**, ενώ για αντίστοιχη ρύθμιση στη διεύθυνση βορρά-νότου υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (9)**. Για συλλέκτη που περιστρέφεται περί άξονα γύρω από άξονα παράλληλο προς τον άξονα της γης και με δυνατότητα συνεχούς ρύθμισης κατά τη διάρκεια της ημέρας, η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (10)**. Στην περίπτωση που επιτρέπεται κίνηση σε δύο άξονες, η γωνία πρόσπτωσης $\theta=0$ καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας [32].

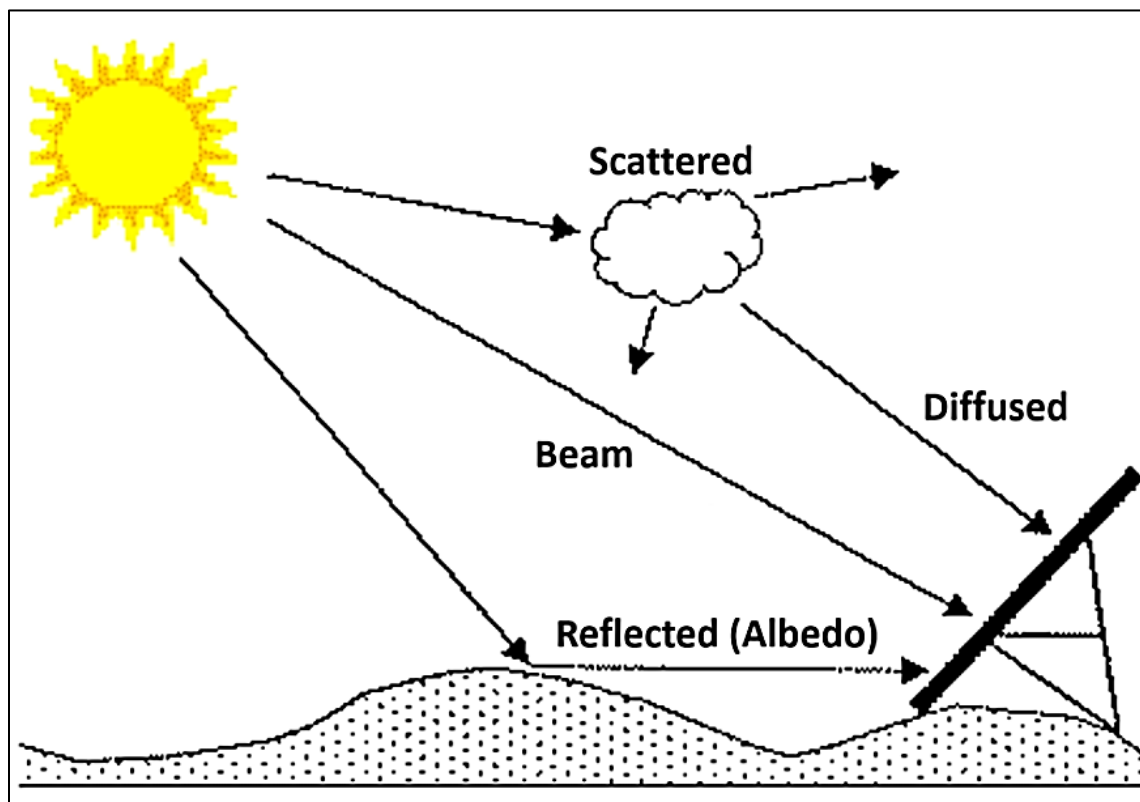
$$\cos \theta = (1 - (\cos \delta \sin \omega)^2)^{0,5} \quad (8)$$

$$\cos \theta = [(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega)^2 + (\cos \delta \sin \omega)^2]^{0,5} \quad (9)$$

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (10)$$

3.2.4. Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία που εντέλει προσπίπτει σε μία συλλεκτική επιφάνεια αποτελείται από τρεις συνιστώσες, την άμεση, τη διάχυτη και την ανακλώμενη από το έδαφος. Η άμεση ακτινοβολία είναι αυτή που φτάνει στη γη απ' ευθείας από τον ήλιο. Αντίθετα, η διάχυτη ακτινοβολία είναι αυτή που φτάνει στη γη ενώ προηγουμένος έχει διαχυθεί στην ατμόσφαιρα λόγω νέφωσης αλλά και των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας, όπως για παράδειγμα της σκόνης. Η ανακλώμενη ακτινοβολία είναι το μέρος της άμεσης ακτινοβολίας το οποίο αρχικά δεν προσέπεσε στη συλλεκτική επιφάνεια, αλλά λόγω του ανάγλυφου του εδάφους ή κάποιας γεωμετρίας ανακλάστηκε και εντέλει προσέπεσε. Έτσι, η ανακλώμενη ακτινοβολία δεν είναι μέρος της ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας, αλλά προσμετράται όσον αφορά κάποια συλλεκτική επιφάνεια. Στην **Εικόνα 23** παρουσιάζονται σχηματικά οι συνιστώσες της ακτινοβολίας [32].



Εικόνα 23: Συνιστώσες ακτινοβολίας, άμεση (beam), διάχυτη (diffuse) και ανακλώμενη (albedo) [39]

Για την αποφυγή σύγχυσης, εισάγονται κάποιοι δείκτες ακτινοβολίας, έτσι ώστε κάθε σύμβολο να μπορεί να ερμηνεύεται απλά και με σαφήνεια. Οι δείκτες αυτοί αφορούν στο χαρακτηρισμό της ακτινοβολίας ως προς τη διάρκεια αλλά και ως προς το είδος και την επιφάνεια. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι συνηθέστεροι δείκτες [32].

G = στιγμιαία ακτινοβολία [W/m^2]

I = ωριαία ακτινοβολία [W/m^2]

H = ημερήσια ακτινοβολία [W/m^2]

(b) = άμεση ακτινοβολία

(d) = διάχυτη ακτινοβολία

(r) = ανακλώμενη ακτινοβολία

(n) = κάθετη ακτινοβολία

(T) = ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου

(o) = ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας

3.2.5. Ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης

Η ακτινοβολία που φτάνει τελικά στην επιφάνεια της γης είναι σαφώς μειωμένη σε σχέση με αυτή που υπάρχει διαθέσιμη εκτός ατμόσφαιρας, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ ακτινοβολίας και ατμόσφαιρας. Η ακτινοβολία που δέχεται μια υποθετική επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρας όταν οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν κάθετα σε αυτή υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (11)** για στιγμιαία, την **Εξίσωση (12)** για ωριαία και την **Εξίσωση (13)** για ημερήσια τιμή αντίστοιχα [32].

$$G_o = G_{on} \cos \theta_z \quad (11)$$

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} \cdot 10^{-6} \cdot G_{on} \cdot [\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \varphi \sin \delta] \quad (12)$$

$$H_o = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} \cdot 10^{-6} \cdot G_{on} \cdot [\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta] \quad (13)$$

όπου:

G_o = Στιγμιαία ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας [W/m^2]

I_o = Ωριαία ενέργεια εκτός ατμόσφαιρας [MJ/m^2]

H_o = Ημερήσια ενέργεια εκτός ατμόσφαιρας [MJ/m^2]

Η εξασθένηση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα οφείλεται στη διάχυση που προκαλείται από τα μόρια του αέρα, τη νέφωση και τη σκόνη. Επιπλέον αυτών, παρατηρείται απορρόφηση ακτινοβολίας στις διάφορες ζώνες της ατμόσφαιρας λόγω της ύπαρξης μορίων όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το όζον (O_3). Η εξασθένηση αυτή ποσοτικοποιείται με την εισαγωγή ενός εμπειρικού συντελεστή, του δείκτη αιθριότητας (K_T). Ο δείκτης αυτός επιτρέπει τους υπολογισμούς σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν αναλυτικές

μετρήσεις για την ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης. Χρησιμοποιώντας την **Εξίσωση (14)**, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου (H). Αντίστοιχη σχέση ισχύει και για ωριαία τιμή. Επιπλέον, ορίζεται η μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία της ημέρας (\bar{H}) που αντιστοιχεί σε ημερήσια τιμή για τη μέση ημέρα του μήνα και υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (15)** [32].

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (14)$$

$$\overline{K_T} = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (15)$$

όπου:

H = ημερήσια ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου [J/m^2]

3.2.6. Ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια

Οι περισσότερες συλλεκτικές επιφάνειες βρίσκονται υπό κλίση, καθώς αυτό αυξάνει την αποδοτικότητα τους λόγω της βελτίωσης της γωνίας πρόσπτωσης σε αυτές. Ο λόγος ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου (R) επιτρέπει τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που εντέλει δέχεται κάποια συλλεκτική επιφάνεια. Ο λόγος αυτός για την άμεση ακτινοβολία (R_b) υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (16)**. Ο αντίστοιχος όρος διάχυσης (R_d) δεν είναι εύκολα υπολογίσιμος. Έτσι, η συνολική ακτινοβολία που δέχεται μια κεκλιμένη επιφάνεια στην επιφάνεια της γης υπολογίζεται από την **Εξίσωση (17)** η οποία προέκυψε με βάση την εργασία των Liu and Jordan (1963) [32][40].

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (16)$$

$$G_T = G_b R_b + G_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_b + G_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (17)$$

όπου:

ρ = ανακλαστικότητα του εδάφους [-]

β = γωνία κλίσης συλλεκτικής επιφάνειας [$^\circ$]

Από την **Εξίσωση (17)** προκύπτει η ανάγκη υπολογισμού της διάχυτης συνιστώσας ακτινοβολίας (G_d). Ο λόγος της διάχυτης προς την ολική ημερήσια ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης υπολογίζεται από την **Εξίσωση (18)** με βάση τη συσχέτιση που κατέληξαν οι Collares-Pereira and Rabl (1979). Επομένως, με βάση την **Εξίσωση (19)** υπολογίζεται ο ημερήσιος λόγος κεκλιμένης προς οριζόντια επιφάνεια (R) και με βάση την **Εξίσωση (20)** η ημερήσια ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου [32][41].

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} \text{αν } K_T \leq 0,17 \text{ τότε } 0,99 \\ \text{αλλιώς αν } 0,17 < K_T \leq 0,75 \text{ τότε } 1,188 - 2,272K_T + 9,473K_T^2 - 21,865K_T^3 + 14,648K_T^4 \\ \text{αλλιώς αν } 0,75 < K_T \leq 0,80 \text{ τότε } 0,54K_T + 0,632 \\ \text{αλλιώς } 0,2 \end{cases} \quad (18)$$

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) R_b + \frac{H_d}{H} \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (19)$$

$$H_T = R \cdot H \quad (20)$$

όπου:

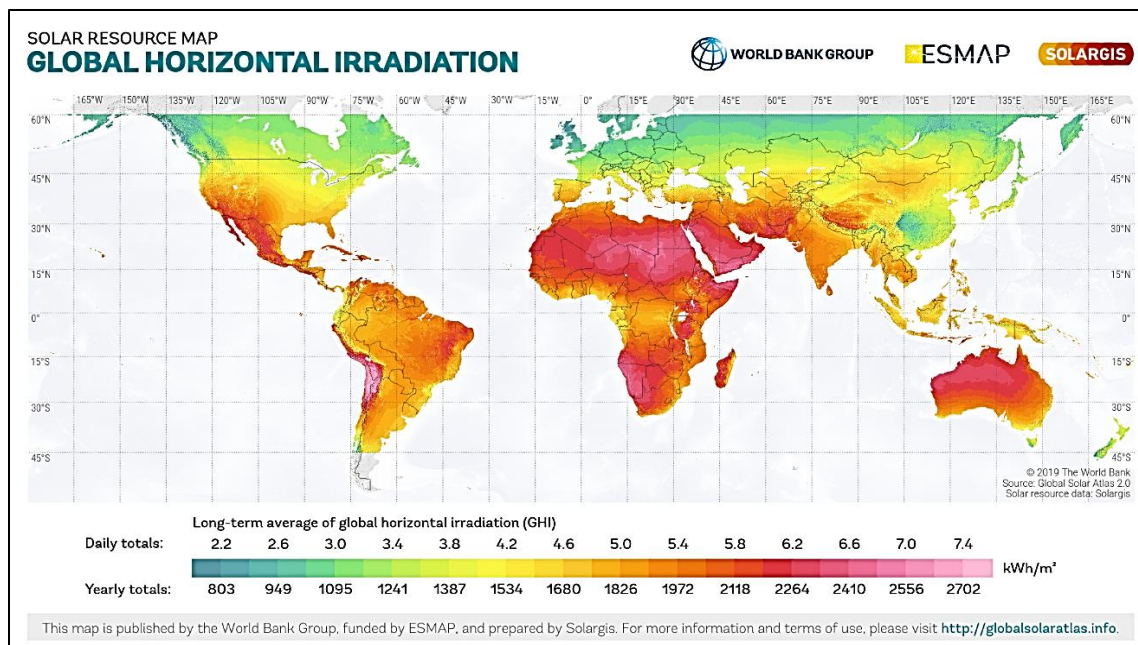
K_T = ημερήσιος δείκτης αιθριότητας [-]

ρ = ανακλαστικότητα του εδάφους [-]

β = κλίση συλλεκτικής επιφάνειας [°]

3.2.7. Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας

Η επ' ακριβώς γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάποια γεωγραφική θέση είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και την ανάλυση βιωσιμότητας ενός ηλιακού συστήματος. Οι δύο κύριες κατηγορίες μετρητικών οργάνων είναι τα πυρανόμετρα (pyranometer) και τα πυρηλιόμετρα (pyrheliometer). Το πυρανόμετρο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας, ενώ έχει τη δυνατότητα διαχωρισμού της σε άμεση και διάχυτη. Αντίθετα, το πυρηλιόμετρο με χρήση ειδικού σκιάστρου περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διάχυτη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να μπορεί να μετρήσει την άμεση ακτινοβολία με σχετικά μεγάλη ακρίβεια. Στην **Εικόνα 24** παρουσιάζεται η πυκνότητα ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας στον παγκόσμιο χάρτη. Επιπλέον, με χρήση του μετρητικού οργάνου sunshine switch είναι δυνατός ο προσδιορισμός της διάρκειας της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια μιας μέρας. Επίσης, υπάρχουν ειδικά μετρητικά όργανα που μπορούν να κάνουν μέτρηση ευρείας ζώνης φάσματος, χρησιμοποιώντας φίλτρα για την αποκοπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συγκεκριμένων συχνοτήτων [29].



Εικόνα 24: Πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου στην επιφάνεια της γης ανά το παγκόσμιο [42]

3.3. Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα

Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενα εδάφια, τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται την άμεση ακτινοβολία την οποία συλλέγουν απευθείας στο δέκτη, αλλά ταυτόχρονα συγκεντρώνουν και την ανακλώμενη σε αυτόν. Επιπλέον, υπάρχουν εφαρμογές οι οποίες συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία μέσω της διάθλασης. Τα συστήματα αυτά έχουν ως πρωταρχικό στόχο τη θέρμανση κάποιου ρευστού, έτσι ώστε αυτό να αναβαθμιστεί θερμοδυναμικά αυξάνοντας τη θερμοκρασία του. Βασικός στόχος τέτοιων συστημάτων είναι να εστιάσουν και να συγκεντρώσουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε μικρή επιφάνεια απορρόφησης, έτσι ώστε να αναπτυχθεί υψηλή θερμοκρασία. Η θερμική ενέργεια που θα φέρει πλέον το ρευστό μπορεί στη συνέχεια να αξιοποιηθεί με ποικίλους τρόπους, όπως για παράδειγμα θέρμανση και ψύξη, επεξεργασία μετάλλων, διάφορες χημικές διεργασίες αλλά και ηλεκτροπαραγωγή με την αξιοποίηση ενός θερμοδυναμικού κύκλου [43].

3.3.1. Βασικά χαρακτηριστικά συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων

Ένας συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από δύο κύρια μέρη, το δέκτη και τον συγκεντρωτή. Ο δέκτης αποτελείται κυρίως από την απορροφητική επιφάνεια μέσω της οποίας η θερμότητα μεταφέρεται στο ρευστό. Η μορφή του μπορεί να είναι σωληνοειδής ή σημειακή ανάλογα με το είδος του συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη. Ένα μέρος της άμεσης ακτινοβολίας προσπίπτει απευθείας στο δέκτη, όμως ένα άλλο μεγάλο μέρος αυτής προσπίπτει στο συγκεντρωτή, ο οποίος ανακλά την ακτινοβολία με σκοπό να την εστιάσει στο δέκτη. Ο συγκεντρωτής είναι συνήθως μια επιφάνεια με πολύ υψηλή

ανακλαστικότητα. Γενικά, κατηγοριοποιείται με βάση κάποια κριτήρια. Αρχικά εάν είναι ανακλαστικός, δηλαδή σαν κάτοπτρο, ή διαθλαστικός, δηλαδή σαν φακός εστίασης. Επίσης εάν είναι επιμήκης, δηλαδή εστιάζει σε κάποιο σωλήνα, ή εάν είναι κυκλικός, δηλαδή εστιάζει σε κάποιο σημείο. Επιπλέον, εάν είναι συνεχής ή τμηματικός και τέλος εάν είναι με είδωλο ή χωρίς [32].

Το βασικό χαρακτηριστικό μέγεθος τέτοιων ηλιακών συστημάτων είναι ο λόγος συγκέντρωσης (C). Ο υπολογισμός του γίνεται με βάση την **Εξίσωση (21)** και η οποία εκφράζει το λόγο της επιφάνειας του ανοίγματος που προσπίπτει η άμεση ακτινοβολία προς την επιφάνεια του δέκτη. Ο λόγος αυτός μπορεί να πάρει από πολύ μικρές τιμές (μερικές δεκάδες) έως πολύ μεγάλες (μερικές δεκάδες χιλιάδες). Ο λόγος συγκέντρωσης για τους επιμήκεις συγκεντρωτές (C_{2D}) υπολογίζεται διαφορετικά σε σχέση με τους κυκλικούς (C_{3D}). Οι δύο αυτοί λόγοι συγκέντρωσης συσχετίζονται με βάση την **Εξίσωση (22)**. Ο μέγιστος λόγος συγκέντρωσης ($C_{2D,max}$) για επιμήκεις συγκεντρωτές υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (23)**, όπου $\theta_s=0,27^\circ$ η ημιγωνία όρασης ηλίου από τη γη. Επομένως, η μέγιστη τιμή του λόγου συγκέντρωσης για επιμήκης εφαρμογές είναι περίπου $C_{2D,max}=212$ και για κυκλικούς $C_{3D,max}=45000$. Αυτό που θα πρέπει να γίνει αντιληπτό είναι ότι όσο μεγαλύτερος ο λόγος συγκέντρωσης, τόσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί στο ρευστό που διακινεί ο δέκτης και ταυτόχρονα τόσο μεγαλύτερο το κόστος μιας τέτοιας συσκευής. Επιπλέον, παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος συντήρησης και λειτουργίας σε σχέση με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες [32].

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (21)$$

όπου:

C = λόγος συγκέντρωσης [-]

A_a = εμβαδόν επιφάνειας ανοίγματος [m^2]

A_r = εμβαδόν επιφάνειας απορροφητήρα [m^2]

$$C_{3D} = C_{2D}^2 \quad (22)$$

$$C_{2D} = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad (23)$$

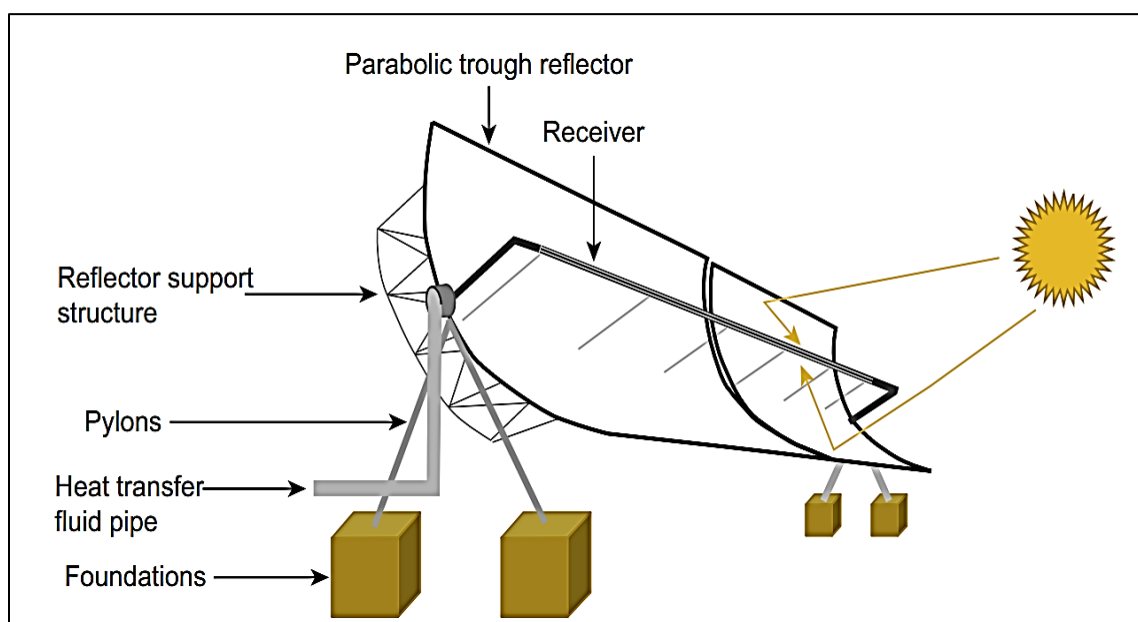
3.3.2. Κύριες τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων

Κυρίαρχες τεχνολογίες στο πεδίο των ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων είναι οι κοίλοι παραβολικοί συλλέκτες (parabolic trough concentrator ή PTC), οι συλλέκτες Fresnel, οι παραβολοειδείς συλλέκτες (parabolic dish) και οι συλλέκτες κεντρικού δέκτη γνωστοί και ως εφαρμογές με ηλιακό πύργο (central receiver system ή CRS ή solar power tower ή SPT). Οι δύο πρώτες τεχνολογίες είναι γραμμικής εστίασης με επιμήκη δέκτη, ενώ οι δύο τελευταίες είναι σημειακής εστίασης. Στις εφαρμογές γραμμικής εστίασης είναι απαραίτητη η κίνηση των συλλεκτών σε τουλάχιστον ένα άξονα, ενώ στις εφαρμογές σημειακής

εστίασης συνήθως απαιτείται η κίνηση σε δύο άξονες, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα. Σημαντική παρατήρηση για την αποδοτικότητα ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί ότι όσο η μέγιστη θερμοκρασία που αποδίδεται στο ρευστό αυξάνεται, τόσο αυξάνεται η αποδοτικότητα του συστήματος στη μετατροπή της θερμότητας σε παραγόμενο έργο (από τον ορισμό του βαθμού απόδοσης του Carnot), αλλά ταυτόχρονα μειώνεται σημαντικά η αποδοτικότητα μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα. Συνεπώς, θα πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός κατά το σχεδιασμό της εγκατάστασης [43].

3.3.3. Κοίλος παραβολικός συλλέκτης (PTC)

Η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος είναι ο κοίλος παραβολικός συλλέκτης (PTC). Είναι η τεχνολογία η οποία έχει μελετηθεί και εφαρμοστεί στην πράξη περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη με επιτυχή αποτελέσματα. Ο ανακλαστήρας είναι παραβολικού σχήματος, με τον δέκτη να είναι γραμμικός και κυλινδρικού σχήματος. Η ανακλαστική επιφάνεια πρέπει να είναι υψηλής ανακλαστικότητας, έτσι ώστε να εστιάζει υψηλό ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο δέκτη. Ο δέκτης εξωτερικά αποτελείται από επιφάνεια υψηλής διαπερατότητας, δηλαδή κάποιο γυαλί, έτσι ώστε η ακτινοβολία που συγκεντρώνεται επ' αυτού να τον διαπερνά και να προσπίπτει εντέλει στον απορροφητήρα. Ο απορροφητήρας (προφανώς και αυτός κυλινδρικού σχήματος) είναι μια μαύρη επιφάνεια υψηλής απορροφητικότητας και χαμηλού συντελεστή εκπομπής. Εντός αυτής, κυκλοφορεί το ρευστό το οποίο και παραλαμβάνει τη θερμότητα μέσω του απορροφητήρα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του. Στις πλείστες εφαρμογές, το ρευστό αυτό είναι νερό, αέρας ή κάποιο θερμικό λάδι (thermal oil). Στην **Εικόνα 25** παρουσιάζεται ένας PTC και τα κύρια μέρη αυτού [35].



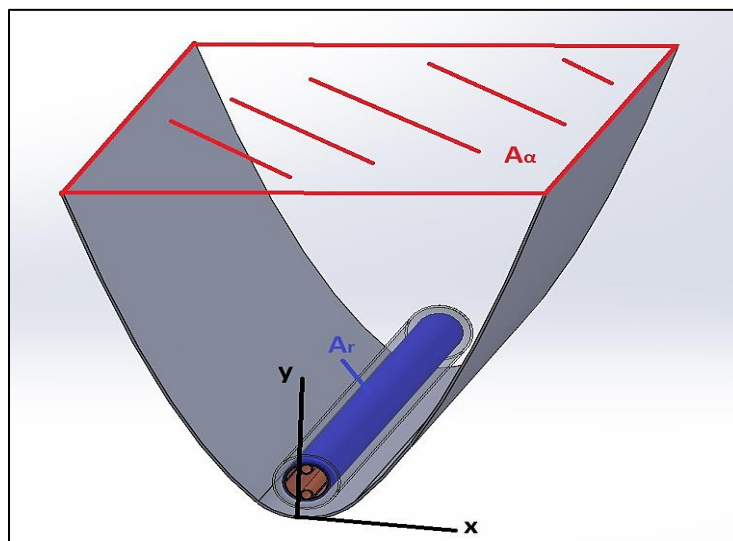
Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση κοίλου παραβολικού συλλέκτη (PTC) [43]

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του που εμπλέκονται στους ενεργειακούς υπολογισμούς καθορίζονται από το παραβολικό κάτοπτρο και τον κυλινδρικό δέκτη. Η **Εξίσωση (24)** αντιπροσωπεύει την εξίσωση της παραβολής, όπου (x) η εφαπτόμενη διάσταση στη παραβολή, (y) η κάθετη διάσταση και (a) η εστιακή απόσταση αυτής. Το εμβαδό ανοίγματος (A_{α}) είναι η νοητή ορθογώνια επιφάνεια που σχηματίζεται στην κορυφή του παραβολικού κατόπτρου, ενώ η επιφάνεια του απορροφητήρα (A_r) είναι η κυλινδρική παράπλευρη επιφάνεια αυτού. Στην **Εικόνα 26** παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση ενός PTC στην οποία φαίνονται κάποια κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά [44].

$$x^2 = 4ay \quad (24)$$

όπου:

a = εστιακή απόσταση [m]



Εικόνα 26: Κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά PTC σχεδιασμένου στο λογισμικό Solidworks 2021

Η αποδοτικότητα ενός PTC εκφράζεται μέσω του οπτικού βαθμού απόδοσης (η_o), ο οποίος εκφράζει το λόγο της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται εντέλει από τον απορροφητήρα προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον PTC μέσω του ανοίγματος (A_{α}). Η **Εξίσωση (25)** δίνει αυτή τη συσχέτιση. Η **Εξίσωση (26)** είναι η εξίσωση του οπτικού βαθμού απόδοσης (η_o), ο οποίος τελικά υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη διάφορες λειτουργικές και γεωμετρικές παραμέτρους [29].

$$\eta_o = \frac{Q_{abs}}{Q_{sol}} \quad (25)$$

όπου:

Q_{abs} = απορροφούμενη θερμότητα από τον απορροφητήρα του δέκτη [W]

Q_{sol} = ισχύς άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει στον άνοιγμα του απορροφητήρα [W]

$$\eta_o = \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot F_{el} \cdot F_s \cdot K(i) \quad (26)$$

όπου:

ρ = ανακλαστικότητα καθαρού ανακλαστήρα [-]

τ = διαπερατότητα γυάλινου εξωτερικού σωλήνα δέκτη [-]

α = απορροφητικότητα δέκτη [-]

γ = παράγοντας σύλληψης [-]

F_{el} = παράγοντας τελικών απωλειών [-]

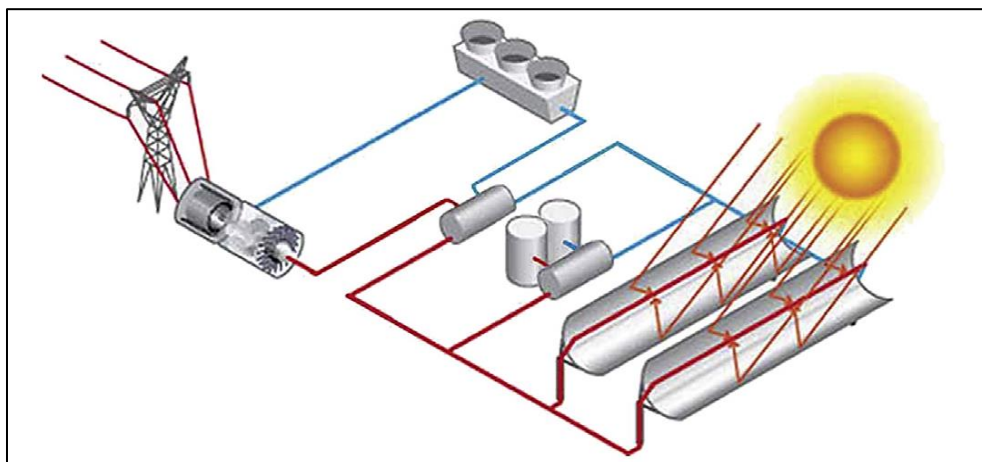
F_s = παράγοντας σκόνης [-]

$K(i)$ = συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης [-]

Η άμεση ακτινοβολία που διαπερνά το νοητό επίπεδο (A_a) αρχικά προσπίπτει στην ανακλαστική επιφάνεια, όπου ανακλάται και ανακατευθύνεται προς το δέκτη. Η φυσική αυτή διεργασία ποσοτικοποιείται μέσω του συντελεστή ανακλαστικότητας (ρ) της παραβολικής επιφάνειας. Στη συνέχεια, ένα ποσοστό αυτής καταφέρνει να διαπεράσει το εξωτερικό κυλινδρικό γυαλί του δέκτη και εντέλει προσπίπτει στην επιφάνεια του απορροφητήρα. Η φυσική αυτή διεργασία ποσοτικοποιείται μέσω του συντελεστή διαπερατότητας (τ) του καλύμματος του δέκτη, δηλαδή του γυαλιού. Έπειτα, ένα μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο δέκτη απορροφάται από αυτόν λόγω της απορροφητικότητας (α) του απορροφητήρα. Ο παράγοντας σύλληψης (intercept factor ή γ) εκφράζει το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας που εντέλει φτάνει στον δέκτη, καθώς ένα μέρος αυτής δεν φτάνει σε αυτόν λόγω πιθανών γεωμετρικών και σχηματικών ατελειών του παραβολικού κατόπτρου. Η γωνία πρόσπτωσης στο συλλέκτη επηρεάζει σημαντικά τον οπτικό βαθμό απόδοσης και η επίδραση αυτής ποσοτικοποιείται μέσω του συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης $K(i)$. Ένα μέρος του δέκτη δεν φωτίζεται με ανακλώμενη ακτινοβολία, αφού οι προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες δεν εκτρέπονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι απώλειες αυτές εκφράζονται μέσω του παράγοντα τελικών απωλειών (F_{el}) ο οποίος είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης. Τέλος, εισάγεται ο παράγοντας σκόνης ο οποίος ποσοτικοποιεί την επίδραση της σκόνης η οποία επικάθεται στην ανακλαστική επιφάνεια. Συνεπώς, ο οπτικός βαθμός απόδοσης ενός PTC μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της άμεσης επίδρασης του από τη γωνία πρόσπτωσης [29].

Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο, οι θερμικές απώλειες ενός ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος οφείλονται στην αγωγή, τη συναγωγή και στην ακτινοβολία μεταξύ δέκτη και περιβάλλοντος. Η αγωγή συναντάται κυρίως μεταξύ δέκτη και στηριγμάτων αυτού. Η συναγωγή περιορίζεται με τη δημιουργία κενού μεταξύ απορροφητήρα και δέκτη. Όμως, οι απώλειες λόγω συναγωγής μεταξύ εξωτερικού γυαλιού και περιβάλλοντος δεν μπορούν να περιοριστούν και είναι ανάλογες της ταχύτητας του ανέμου στην εξωτερική επιφάνεια του δέκτη. Επίσης, εάν η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο ρευστό είναι πολύ υψηλή (για παράδειγμα μεγαλύτερη των 400°C) τότε οι απώλειες ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις απώλειες λόγω συναγωγής και έτσι η δημιουργία κενού κρίνεται άσκοπη. Αυτό ισχύει σε μεγάλους PTCs. Η παρούσα εργασία δεν αφορά τους PTCs και επομένως δεν γίνεται εκτενής ανάλυση των θερμικών

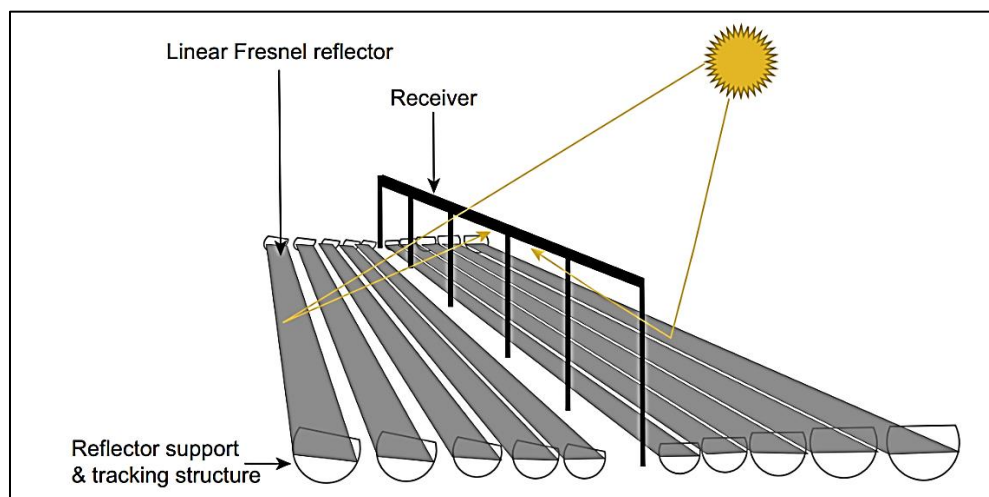
απωλειών τους. Στην **Εικόνα 27** παρουσιάζεται μια τυπική εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής με χρήση PTCs [44].



Εικόνα 27: Σχηματική διάταξη τυπικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής με χρήση PTCs [43]

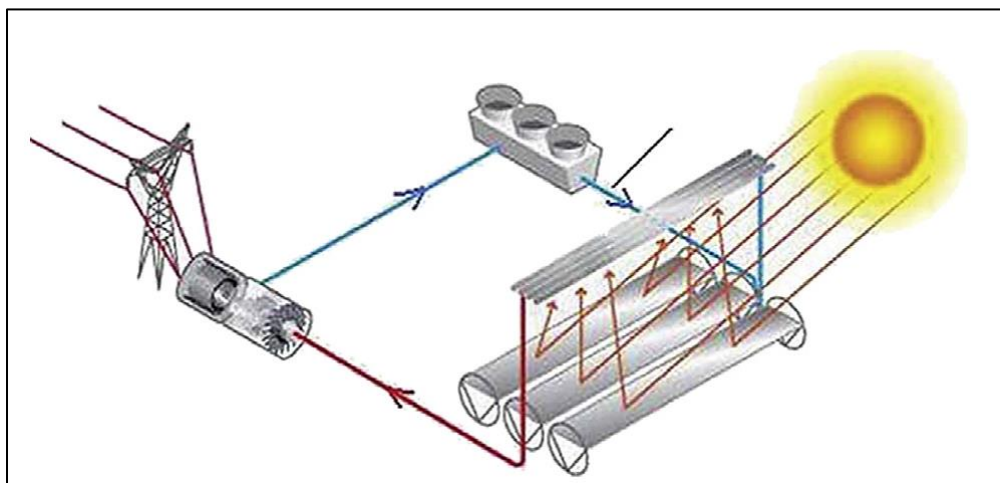
3.3.4. Ηλιακός συλλέκτης Fresnel

Ο ηλιακός συγκεντρωτικός συλλέκτης Fresnel είναι παρόμοιας φιλοσοφίας με τον PTC, με ειδοποιό διαφορά τη διακοπτόμενη κατασκευαστική μορφολογία του κατόπτρου του. Ο ανακλαστήρας αποτελείται από πολλά τμήματα τα οποία είναι επίπεδου ή ελαφρώς παραβολικού σχήματος και φέρει το κάθε ένα τον δικό του μηχανισμό κίνησης (συνήθως σε έναν άξονα). Ο δέκτης είναι κυλινδρικού σχήματος και αποτελείται (από το εξωτερικό προς το εσωτερικό) από το κυλινδρικό γυαλί, κενό το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του γυαλιού και του απορροφητήρα και το ρευστό το οποίο ρέει εντός του απορροφητήρα. Στην **Εικόνα 28** παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός ηλιακού συλλέκτη Fresnel [43].



Εικόνα 28: Σχηματική αναπαράσταση ηλιακού συλλέκτη Fresnel [43]

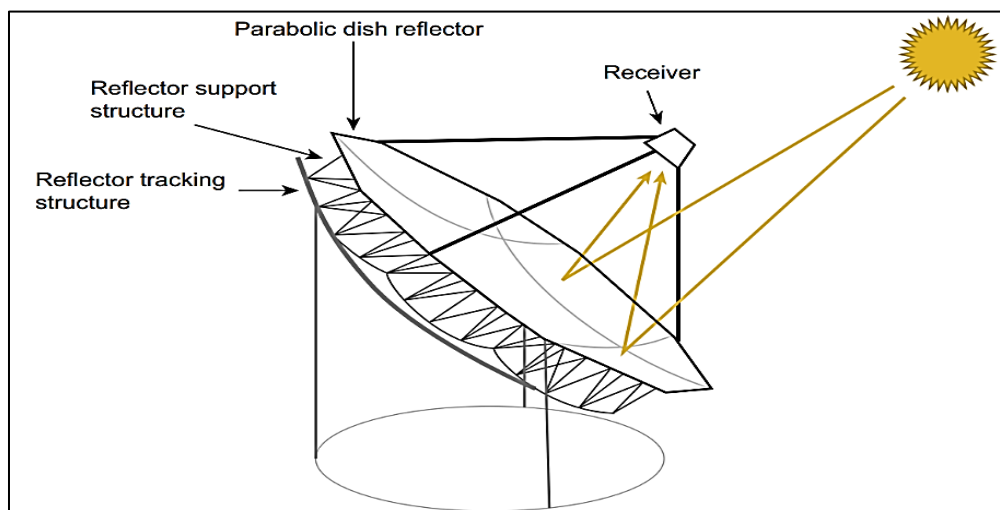
Οι θερμικές απώλειες του δέκτη προσεγγίζονται με παρόμοιο τρόπο με αυτό των PTC, όπως αυτός παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο. Για τον υπολογισμό του οπτικού βαθμού απόδοσης του λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα διακριτού ελέγχου στα τμήματα του ανακλαστήρα. Η παρούσα εργασία δεν αναφέρεται στη χρήση τέτοιου τύπου συλλεκτών. Στην **Εικόνα 29** παρουσιάζεται μια τυπική εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής με χρήση Fresnel [34].



Εικόνα 29: Σχηματική διάταξη τυπικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής με χρήση συλλέκτη Fresnel [43]

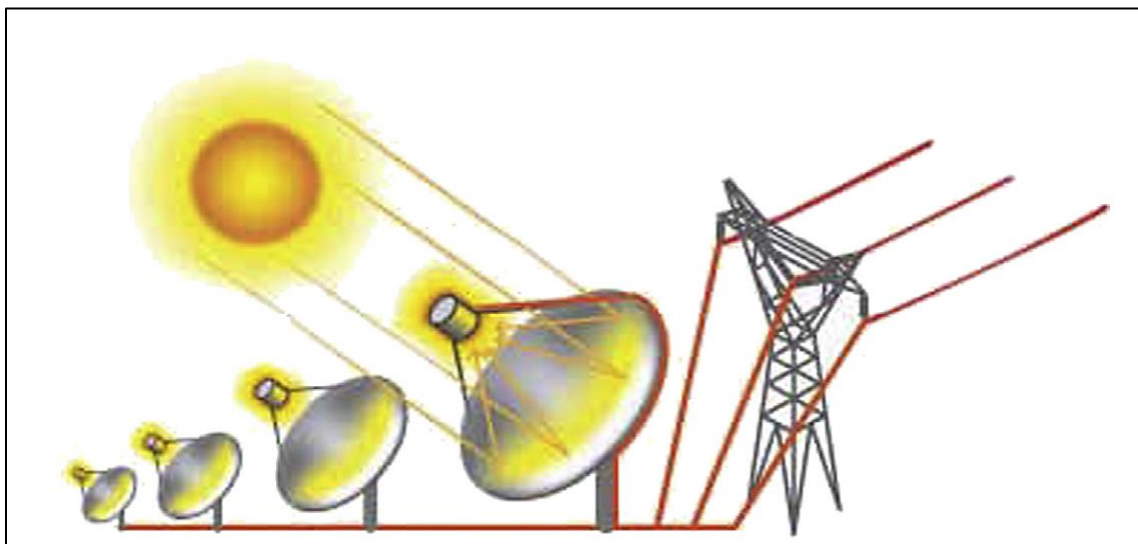
3.3.5. Παραβολοειδής συγκεντρωτής

Ο παραβολοειδής συγκεντρωτής (dish collector) αποτελείται από έναν κεντρικό δέκτη και έναν ανακλαστήρα, ο οποίος μπορεί να είναι συνεχής ή να αποτελείται από τμήματα τα οποία ενώνονται για το σχηματισμό ενός τέτοιου σχήματος. Στην **Εικόνα 30** παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός παραβολοειδούς συλλέκτη [43].



Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση παραβολοειδούς ηλιακού συλλέκτη [43]

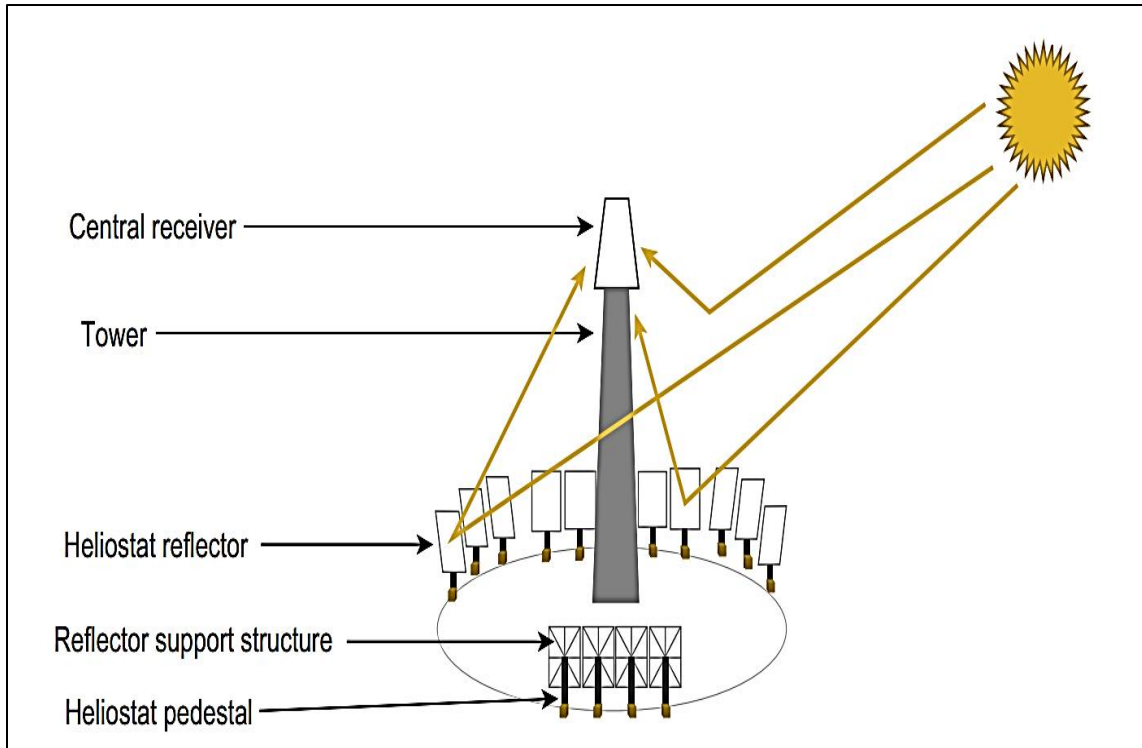
Γενικότερα, στους σημειακούς συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες επιλέγεται σύστημα κίνησης διπλού άξονα. Έτσι, δέκτης και ανακλαστήρας ακολουθούν τον ήλιο καθ' όλη του τη διαδρομή στη διάρκεια της ημέρας. Σε αντίθεση με τους υπόλοιπους τύπους συγκεντρωτικών συλλεκτών, ο κυρίαρχος συνδυασμός των παραβολοειδών είναι με θερμοδυναμικό κύκλο Stirling. Η παρούσα εργασία δεν αναφέρεται στη χρήση τέτοιων συλλεκτών. Στην **Εικόνα 31** παρουσιάζεται μια τυπική εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής με χρήση παραβολοειδούς συγκεντρωτή [43].



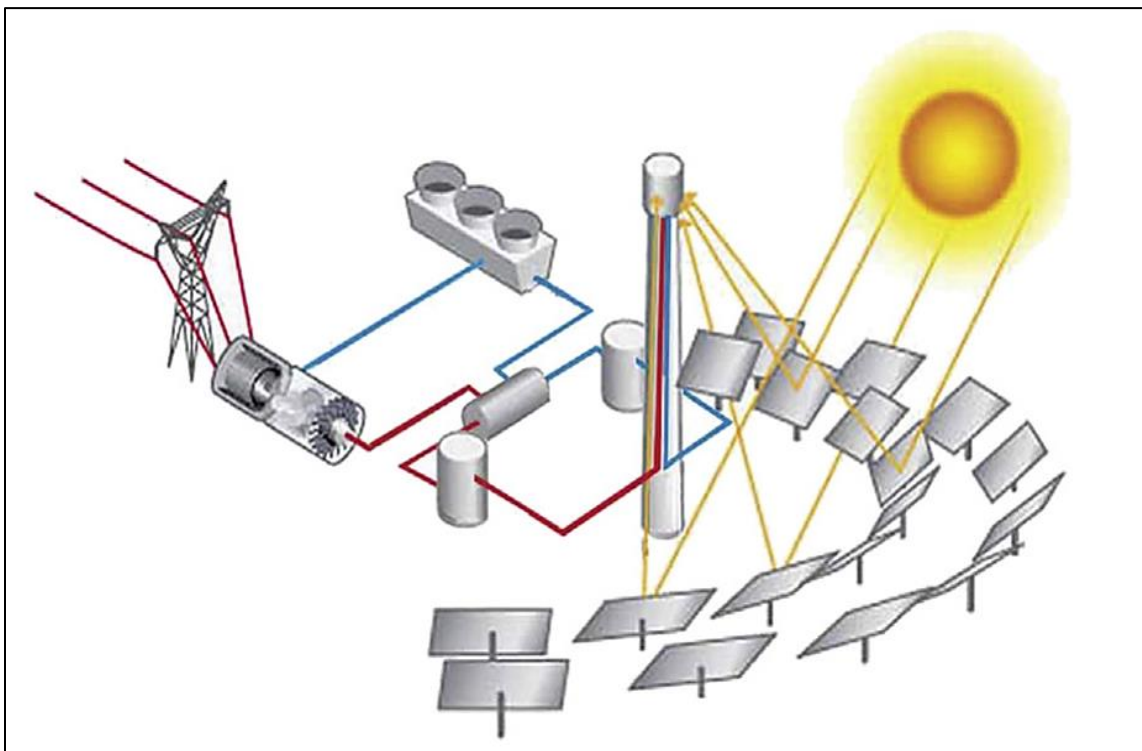
Εικόνα 31: Σχηματική διάταξη τυπικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής με χρήση παραβολοειδούς ηλιακού συλλέκτη [43]

3.3.6. Συστήματα κεντρικού δέκτη

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα κεντρικού δέκτη αποτελούνται από πολλά κάτοπτρα τα οποία εστιάζουν την ακτινοβολία σε ένα κοινό σημείο, τον κεντρικό δέκτη. Τα κάτοπτρα αυτά ονομάζονται καθρέφτες (mirrors) ή ηλιοστάτες (heliostats). Αυτές οι εγκαταστάσεις χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη έκταση γης την οποία δεσμεύουν έτσι ώστε να τοποθετηθούν οι ηλιοστάτες, αλλά και άλλα μέρη της εγκατάστασης τα οποία είναι μεγάλου μεγέθους, όπως ο πύργος και οι διάφορες δεξαμενές. Τέτοιες εγκαταστάσεις ενδείκνυνται για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών (500-800°C). Τέτοιες εφαρμογές συναντώνται ως πηγή ενέργειας σε ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς. Στην **Εικόνα 32** παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός ηλιακού συγκεντρωτή με κεντρικό δέκτη. Αυτές οι εγκαταστάσεις ονομάζονται και εγκαταστάσεις ηλιακού πύργου (solar power tower ή SPT), λόγω της μορφολογίας του κεντρικού δέκτη. Στην **Εικόνα 33** παρουσιάζεται μια τυπική εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ηλιακού πύργου [43].



Εικόνα 32: Σχηματική αναπαράσταση ηλιακού συγκεντρωτή κεντρικού δέκτη [43]



Εικόνα 33: Σχηματική διάταξη τυπικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ηλιακού πύργου [43]

4. Συγκεντρωτικό σύστημα ηλιακού πύργου

4.1. Οπτικός βαθμός απόδοσης συστήματος ηλιακού πύργου

Ο οπτικός βαθμός απόδοσης ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος κεντρικού δέκτη ή ηλιακού πύργου (STP) ορίζεται στη γενική του μορφή με τον ίδιο τρόπο που ορίζεται για κάθε ηλιακό συγκεντρωτικό σύστημα, δηλαδή σύμφωνα με την **Εξίσωση (26)**. Όμως, όπως και στην περίπτωση του PTC, ο οπτικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη γεωμετρικές και χωροταξικές παραμέτρους. Ο οπτικός βαθμός απόδοσης εντέλει υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (27)**. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι ο οπτικός βαθμός απόδοσης είναι διαφορετικός για κάθε ηλιοστάτη. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διαφορετική γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε ηλιοστάτη και ενισχύεται από το γεγονός ότι οι ηλιοστάτες δεσμεύουν μεγάλη έκταση γης. Έτσι, σε κάποια χρονική στιγμή, ένας ηλιοστάτης δύναται να αποδίδει μέγιστη ακτινοβολία στον κεντρικό δέκτη, την ίδια ώρα που κάποιος άλλος πολύ μικρότερη, λόγω του προσανατολισμού και της θέσης του. Αυτή η ιδιότητα του πεδίου των ηλιοστατών παρίσταται σχηματικά στην **Εικόνα 34**, όπου ο ηλιοστάτης A (heliostat A) παρουσιάζει μικρότερες απώλειες από τον ηλιοστάτη B (heliostat B) λόγω της μικρότερης γωνίας πρόσπτωσης θ [44].

$$\eta_o = \eta_{\text{mirror}} \cdot \eta_{\text{atm}} \cdot \eta_{\text{spillage}} \cdot \eta_{\text{cosine}} \cdot \eta_{\text{S\&B}} \quad (27)$$

όπου:

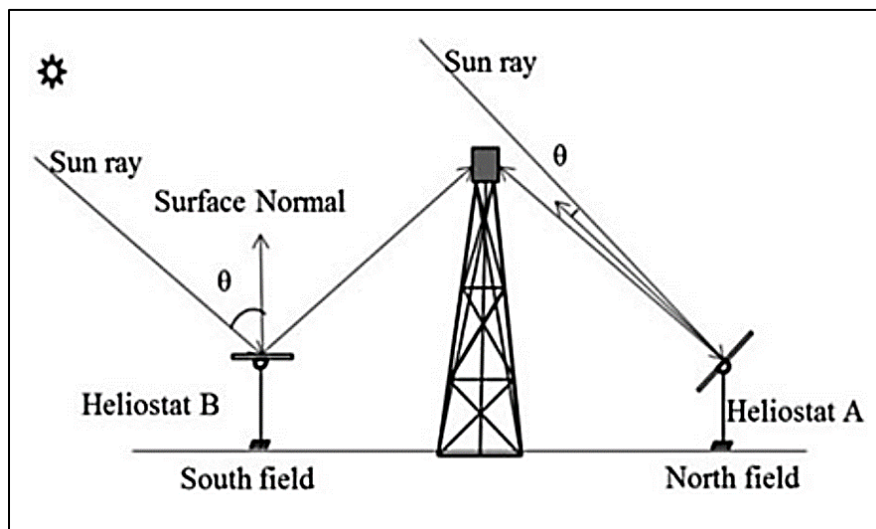
η_{mirror} = βαθμός απόδοσης ανακλαστικότητας ηλιοστάτη [-]

η_{atm} = βαθμός απόδοσης απόσβεσης στην ατμόσφαιρα [-]

η_{spillage} = βαθμός απόδοσης λόγω σφαλμάτων [-]

η_{cosine} = βαθμός απόδοσης γωνίας πρόσπτωσης [-]

$\eta_{\text{S\&B}}$ = βαθμός απόδοσης σκίασης και παρεμπόδισης [-]

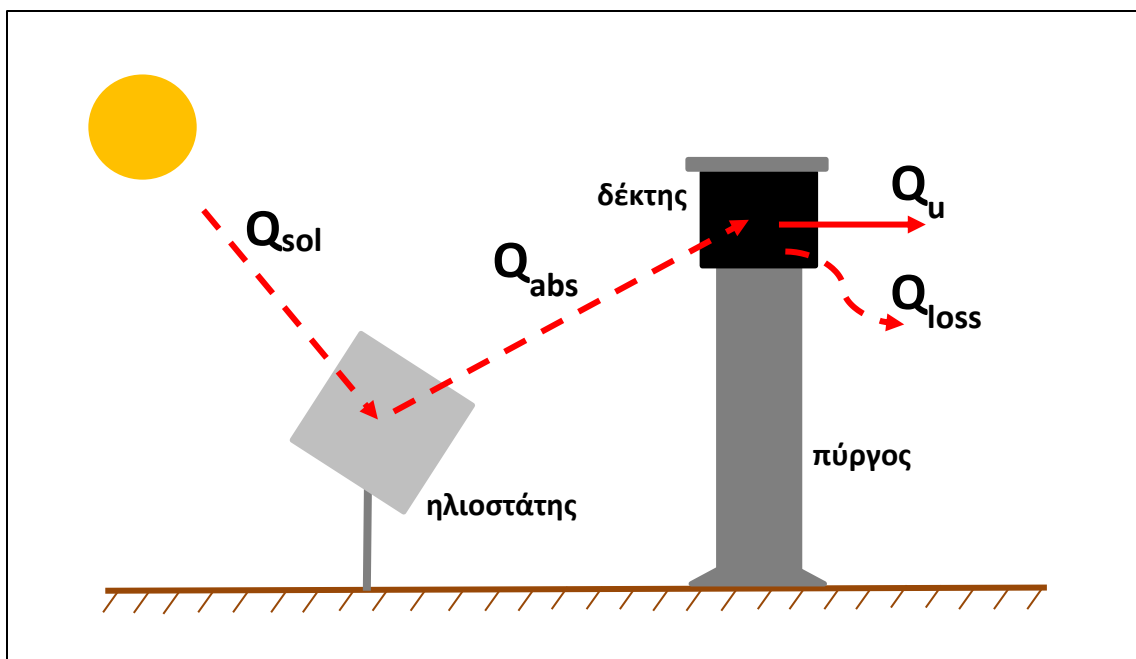


Εικόνα 34: Επίδραση γωνίας πρόσπτωσης στην αποδοτικότητα των ηλιοστατών [44]

Ο βαθμός απόδοσης ανακλαστικότητας (η_{mirror}) εκφράζει το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας που ανακλάται από τον ηλιοστάτη σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Εξαρτάται ισχυρά από το είδος του υλικού και την ποιότητα της επιφάνειας του ηλιοστάτη. Ενδεικτικές τιμές είναι $\eta_{\text{mirror}}=0.80\div 0.95$. Ο βαθμός απόδοσης απόσβεσης στην ατμόσφαιρα (η_{atm}) εκφράζει το ποσοστό ακτινοβολίας το οποίο, ενώ έχει ανακλαστεί, δεν φτάνει στον κεντρικό δέκτη αλλά είτε απορροφάται είτε διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται κυρίως από την απόσταση του ηλιοστάτη σε σχέση με τον κεντρικό δέκτη. Όσο αυτή αυξάνεται, ο βαθμός απόδοσης απόσβεσης στην ατμόσφαιρα μειώνεται. Ενδεικτικές τιμές είναι $\eta_{\text{atm}}=0.85\div 0.95$. Ο βαθμός απόδοσης λόγω σφαλμάτων (η_{spillage}) εκφράζει τις απώλειες που προκύπτουν λόγω διαφόρων σφαλμάτων, όπως για παράδειγμα του προσανατολισμού του ηλιοστάτη και της κίνησης του προκειμένου να παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου. Εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του ηλιοστάτη και την εστιακή του απόσταση. Όσο πιο απομακρυσμένος είναι ο ηλιοστάτης, τόσο μικρότερος είναι ο βαθμός απόδοσης των σφαλμάτων. Επίσης, όσο αυξάνεται το μέγεθος του ηλιοστάτη τόσο ο βαθμός απόδοσης λόγω σφαλμάτων βαίνει μειούμενος. Ο βαθμός απόδοσης γωνίας πρόσπτωσης (η_{cosine}) εκφράζει τις απώλειες λόγω του προσανατολισμού του ηλιοστάτη. Εξαρτάται από τη θέση και τη γωνία μεταξύ ήλιου, ηλιοστάτη και κεντρικού δέκτη. Στο βόρειο ημισφαίριο, η απόδοση των ηλιοστατών αυξάνεται όταν αυτοί τοποθετούνται στη βόρεια πλευρά του δέκτη. Καθώς ο ήλιος θα βρίσκεται απέναντι τους, οι ακτίνες του θα προσπίπτουν σχεδόν κάθετα σε αυτούς και ταυτόχρονα θα μπορούν να τις ανακλούν σχεδόν κάθετα προς τον δέκτη. Αυτή η πρακτική παρουσιάζει κάποιες άλλες απώλειες κυρίως λόγω της σκίασης του πύργου που στηρίζει τον κεντρικό δέκτη. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης σκίασης και παρεμπόδισης (shading and blocking, $\eta_{\text{s\&b}}$) εκφράζει τις απώλειες που προκύπτουν από τη χωροθέτηση της εγκατάστασης. Η σκίαση μπορεί να επέλθει κυρίως λόγω του πύργου, αλλά και σπανιότερα από τη σκίαση μεταξύ των ηλιοστατών. Όσο η απόσταση του ηλιοστάτη από τον κεντρικό δέκτη αυξάνεται, ο βαθμός απόδοσης σκίασης αυξάνεται, αλλά δεσμεύεται περισσότερη γη για τη συνολική εγκατάσταση. Συμπερασματικά, η μεγιστοποίηση του οπτικού βαθμού απόδοσης είναι ένα πολυσύνθετο και πολυπαραμετρικό πρόβλημα [44].

4.2. Θερμική ανάλυση ηλιακού πύργου

Η θερμική ανάλυση ενός συστήματος κεντρικού δέκτη μπορεί να προσεγγιστεί με τη μορφή αλγεβρικών εξισώσεων που εκφράζουν ροές θερμότητας του συστήματος. Οι εξισώσεις αυτές αντιστοιχούν στη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, την απορροφούμενη ενέργεια από τον κεντρικό δέκτη του ηλιακού πύργου, αλλά και την ωφέλιμη ενέργεια που καταλήγει εντέλει στο ρευστό μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας που βρίσκεται στο εσωτερικό της κυλινδρικής επιφάνειας του δέκτη. Στην **Εικόνα 35** παρουσιάζεται μια απλοϊκή σχηματική απεικόνιση των θερμορμών σε ένα σύστημα που αποτελείται από έναν ηλιοστάτη και έναν ηλιακό πύργο [45].



Εικόνα 35: Σχηματική απεικόνιση θερμορών συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος ηλιακού πύργου

Ο οπτικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την **Εξίσωση (27)**. Η προσπίπτουσα στον ηλιοστάτη ηλιακή ακτινοβολία (Q_{sol}) υπολογίζεται από την **Εξίσωση (28)**, δεδομένου ότι η άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει στον ηλιοστάτη είναι γνωστή από μακροχρόνιες μετρήσεις. Από τον ορισμό του οπτικού βαθμού απόδοσης, δηλαδή την **Εξίσωση (25)**, υπολογίζεται η απορροφούμενη από τον δέκτη του ηλιακού πύργου ισχύς (Q_{abs}). Η σχέση αυτή επαναδιατυπώνεται στην **Εξίσωση (29)** για διευκόλυνση του αναγνώστη. Επίσης, η απορροφούμενη ισχύς υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (30)** και ισούται με το άθροισμα της ωφέλιμης ισχύος (Q_u) και των θερμικών απωλειών του δέκτη (Q_{loss}). Η ωφέλιμη ισχύς εκφράζεται με δύο τρόπους, αφενός με βάση την **Εξίσωση (31)** από την πλευρά του ρευστού και αφετέρου με βάση την **Εξίσωση (32)**. Ο δείκτης (s) αντιστοιχεί στο τηγμένο άλας (molten salt), του οποίου οι ιδιότητες περιγράφονται στη συνέχεια. Η μέση θερμοκρασία του ρευστού (T_{fm}) υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (33)**. Οι θερμικές απώλειες (Q_{loss}) υπολογίζονται με βάση την **Εξίσωση (34)** ως το άθροισμα των απωλειών λόγω συναγωγής (Q_{conv}), οι οποίες υπολογίζονται από την **Εξίσωση (35)** και ακτινοβολίας (Q_{rad}), οι οποίες υπολογίζονται από την **Εξίσωση (36)** [45].

$$Q_{sol} = A_{mirror} G_b \quad (28)$$

όπου:

Q_{sol} = ισχύς άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας [W]

A_{mirror} = επιφάνεια ηλιοστάτη [m^2]

G_b = άμεση ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2]

$$Q_{abs} = \eta_o Q_{sol} \quad (29)$$

όπου:

Q_{abs} = απορροφούμενη ισχύς από τον δέκτη [W]

$$Q_{abs} = Q_u + Q_{loss} \quad (30)$$

όπου:

Q_u = ωφέλιμη ισχύς [W]

Q_{loss} = θερμικές απώλειες δέκτη [W]

$$Q_u = \dot{m}_s C_{ps} (T_{out} - T_{in}) \quad (31)$$

όπου:

\dot{m}_s = παροχή μάζας τηγμένου άλατος [kg/s]

C_{ps} = ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση τηγμένου άλατος [J/kg/K]

T_{out} = θερμοκρασία εξόδου τηγμένου άλατος από τον δέκτη [K]

T_{in} = θερμοκρασία εισόδου τηγμένου άλατος στον δέκτη [K]

$$Q_u = (UA)_{ex} (T_r - T_{fm}) \quad (32)$$

όπου:

$(UA)_{ex}$ = σταθερά εναλλάκτη θερμότητας δέκτη [W/K]

T_r = θερμοκρασία επιφάνειας δέκτη [K]

T_{fm} = μέση θερμοκρασία τηγμένου άλατος [K]

$$T_{fm} = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \quad (33)$$

όπου:

T_{out} = θερμοκρασία εξόδου τηγμένου άλατος από τον δέκτη [K]

T_{in} = θερμοκρασία εισόδου τηγμένου άλατος στον δέκτη [K]

$$Q_{loss} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (34)$$

όπου:

Q_{conv} = θερμικές απώλειες λόγω συναγωγής [W]

Q_{rad} = θερμικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας [W]

$$Q_{conv} = A_r h_{out}(T_r - T_{\infty}) \quad (35)$$

όπου:

A_r = εμβαδόν παράπλευρης επιφάνειας δέκτη [m^2]

h_{out} = συντελεστής συναγωγής δέκτη-αέρα περιβάλλοντος [$W/m^2/K$]

T_{∞} = θερμοκρασία περιβάλλοντος [K]

$$Q_{rad} = A_r \epsilon_r \sigma (T_r^4 - T_{\infty}^4) \quad (36)$$

όπου:

ϵ_r = συντελεστής εκπομπής δέκτη [-]

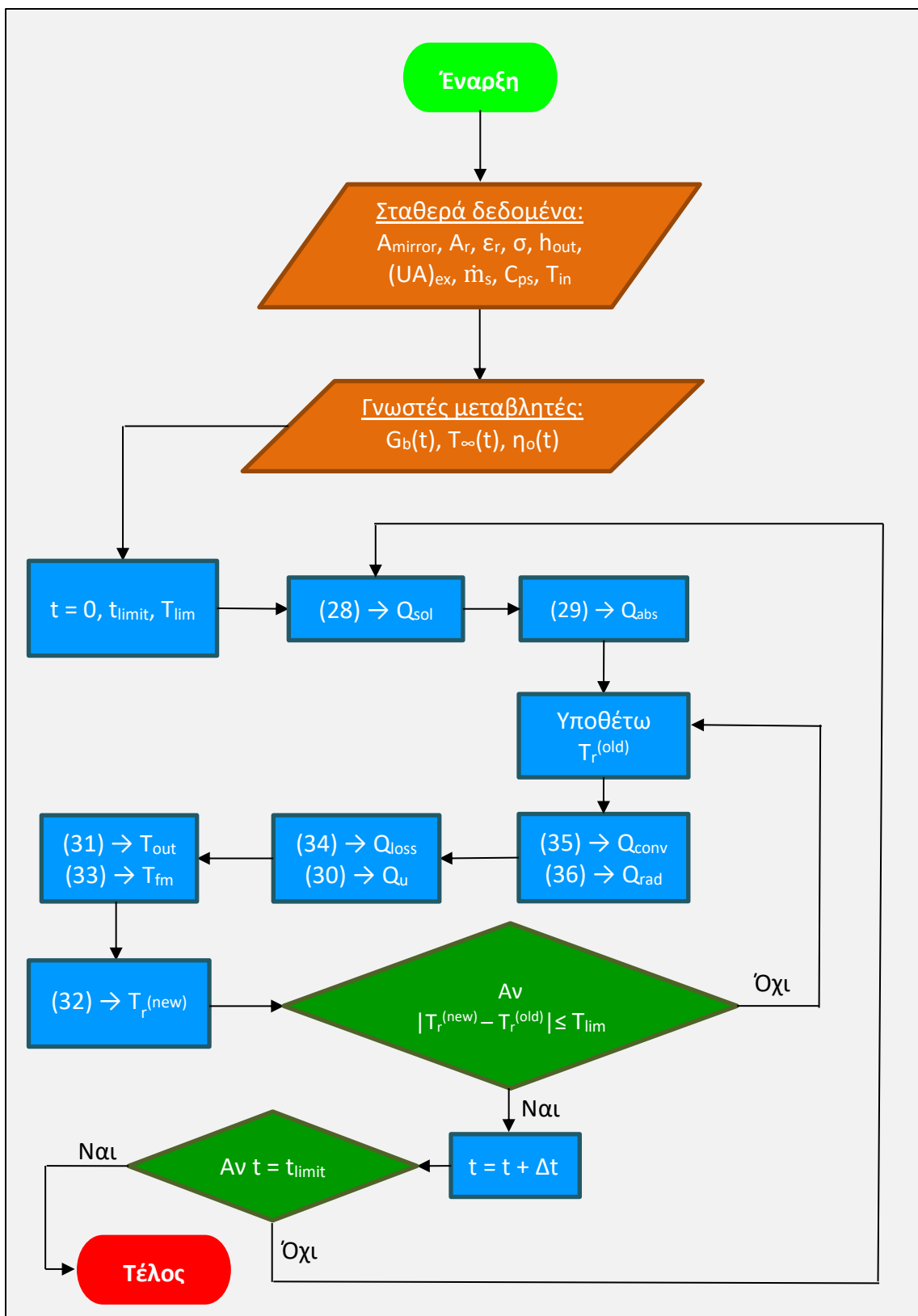
$\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ σταθερά Stefan-Boltzmann [$W/m^2/K^4$]

4.3. Αριθμητική επίλυση θερμοροών ηλιακού πύργου

Στο παρόν εδάφιο προτείνεται μια αλγοριθμική διαδικασία επίλυσης του συστήματος εξισώσεων που παρουσιάστηκε στο αμέσως προηγούμενο εδάφιο. Στον **Πίνακα 1** παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των γνωστών μεταβλητών του προβλήματος από τις άγνωστες, οι οποίες και θα πρέπει να υπολογιστούν κατά τη διαδικασία επίλυσης. Ο διαχωρισμός αυτός στηρίζεται σε κάποιες παραδοχές. Για παράδειγμα, το ότι κάποιες μεταβλητές θεωρούνται ανεξάρτητες του χρόνου είναι μία παραδοχή, αφού πολλές από αυτές είναι στην πραγματικότητα συναρτήσεις της θερμοκρασίας η οποία είναι κατ' εξοχήν μεταβαλλόμενο μέγεθος στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Όμως, θεωρώντας ότι το σύστημα εξισώσεων επιλύεται για κάθε χρονική στιγμή ξεχωριστά, η μέθοδος αυτή είναι εφαρμόσιμη και πρακτική για μια κατ' αρχήν εκτίμηση αποτελεσμάτων. Η τιμή της T_{in} θεωρείται γνωστή, αφού αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία του τηγμένου άλατος στη δεξαμενή κατάντη του πύργου. Στο **Σχήμα 7** παρουσιάζεται η προτεινόμενη διαδικασία επίλυσης σε μορφή λογικού διαγράμματος. Η επιλογή του t_{limit} εξαρτάται από την χρονοσειρά των διαθέσιμων μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπως επίσης και η επιλογή του χρονικού βήματος Δt . Όσο μικρότερο το χρονικό βήμα, τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια στους υπολογισμούς [45].

Πίνακας 1: Μεταβλητές συστήματος εξισώσεων θερμοροών ηλιακού πύργου

Γνωστές μεταβλητές	$G_b(t), T_{\infty}(t), \eta_o(t)$
Γνωστές σταθερές	$A_{mirror}, A_r, \epsilon_r, \sigma, h_{out}, (UA)_{ex}, \dot{m}_s, C_{ps}, T_{in}$
Άγνωστες μεταβλητές	$Q_{sol}, T_r, Q_{rad}, Q_{conv}, Q_{loss}, T_{fm}, T_{out}, Q_u, Q_{abs}$
Εξισώσεις επίλυσης	Εξίσωση (28) έως Εξίσωση (36)



Σχήμα 7: Λογικό διάγραμμα υπολογισμών θερμορών συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος ηλιακού πύργου

Η αρχικοποίηση της θερμοκρασίας του δέκτη (T_r) θα πρέπει να βρίσκεται σε λογικά πλαίσια, αλλιώς υπάρχει το ενδεχόμενο ο αλγόριθμος να μη συγκλίνει. Μια καλή προσέγγιση στην αρχικοποίηση θα μπορούσε να είναι ότι η θερμοκρασία αυτή είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_∞) κατά 30K. Επιπλέον, σε περίπτωση που δεν ισχύει το κριτήριο σύγκλισης, η νέα υπόθεση που θα γίνει για τη θερμοκρασία του δέκτη θα μπορούσε να είναι η νέα υπολογιζόμενη από την **Εξίσωση (32)** ή η μέση τιμή της διαφοράς νέας με παλιά τιμή. Το όριο σύγκλισης της θερμοκρασίας (T_{lim}) είναι αυθαίρετο. Ενδεικτική τιμή είναι $T_{lim}=0,01K$. Όσο μικρότερο, τόσο ακριβέστερη λύση αλλά και αυξημένο υπολογιστικό κόστος [45].

4.4. Ιδιότητες τηγμένου άλατος

Το τηγμένο άλας (molten salt) είναι το ρευστό το οποίο διακινείται στο σύστημα του δέκτη. Αποτελεί το θερμό ρευστό το οποίο, μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, θα αποδώσει τη θερμότητα του σε ένα κρύο ρευστό το οποίο στη συνέχεια θα λειτουργήσει ως εργαζόμενο μέσο σε ένα θερμοδυναμικό κύκλο. Ουσιαστικά, είναι μια χημική ένωση η οποία σε κανονικές συνθήκες έχει δομή στερεού άλατος, αλλά σε υψηλές θερμοκρασίες ρευστοποιείται. Σε εφαρμογές ηλιακού πύργου προτιμάται έναντι άλλων ρευστών διότι παρουσιάζει κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα ως προς το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας και τις θερμοδυναμικές του ιδιότητες. Οι δύο αυτές παράμετροι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα της εγκατάστασης και ως άμεση συνέπεια το κόστος λειτουργίας αυτής [46].

Γενικά, σε ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα γίνεται χρήση διάφορων ρευστών. Το νερό είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο ρευστό κυρίως λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητας του αλλά και του χαμηλού του κόστους εξαιτίας της αφθονίας του. Το βασικό του μειονέκτημα είναι το χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του, το οποίο σε κανονικές συνθήκες είναι 0-100°C. Για να αυξηθεί θα πρέπει να αυξηθεί η πίεση του, γεγονός που αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης κυρίως λόγω αυξημένων αναγκών αντοχής των υλικών. Μια άλλη κατηγορία είναι τα θερμικά λάδια (thermal oils). Βρίσκουν μεγάλη χρήση σε εφαρμογές PTC, αλλά το ανώτερο θερμοκρασιακό τους όριο δεν ξεπερνά τους 300°C, αφού πέραν αυτό καθίστανται θερμοδυναμικά ασταθή. Έτσι, σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής όπου οι απαιτήσεις σε θερμοκρασία είναι πολύ μεγαλύτερες δεν αποτελούν μια καλή λύση. Συμπερασματικά, η καλύτερη επιλογή για συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα κεντρικού δέκτη τα οποία προορίζονται για ηλεκτροπαραγωγή είναι το τηγμένο άλας [46].

Τα τηγμένα άλατα χωρίζονται σε πέντε βασικές κατηγορίες, τα αλκαλικά νιτρικά άλατα (alkaline nitrate salts), τα αλκαλικά ανθρακικά άλατα (alkaline carbonate salts), τα αλκαλικά θειικά άλατα (alkaline sulphate salts), τα αλκαλικά χλωριούχα άλατα (alkaline chloride salts) και τα αλκαλικά υδροξείδια άλατα (alkaline hydroxide salts). Οι τρεις βασικές θερμοδυναμικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα τηγμένο άλας είναι το σημείο τήξης, η πυκνότητα αλλά και η ειδική του θερμοχωρητικότητα. Οι ιδιότητες του ρευστού

βελτιώνονται με τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων αλάτων. Το σημείο τήξης είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερο έτσι ώστε να αποφευχθεί το σενάριο στερεοποίησης του άλατος που θα οδηγούσε σε φραγή της διακίνησης αυτού, το οποίο θα μπορούσε να συμβεί σε περίπτωση παρατεταμένης νέφωσης. Η πυκνότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και προσεγγίζεται ως γραμμική εξάρτηση αυτής. Η **Εξίσωση (37)** είναι η εξίσωση υπολογισμού της πυκνότητας τηγμένου άλατος ανεξαρτήτου κατηγορίας. Τέλος, η θερμοχωρητικότητα εκφράζει την απαιτούμενη ενέργεια που χρειάζεται ένα κιλό ρευστού για να αυξήσει τη θερμοκρασία του κατά 1°C. Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται ενδεικτικά εύρη τιμών των τριών αυτών παραμέτρων για κάθε κατηγορία τηγμένου άλατος [46][47].

$$\rho_s = A_s - B_s \cdot T \quad (37)$$

όπου:

ρ_s = πυκνότητα [kg/m³]

A_s = αρχική πυκνότητα στους 0°C [kg/m³]

B_s = μεταβολή πυκνότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [kg/m³/°C]

Πίνακας 2: Ιδιότητες τηγμένων αλάτων [46]

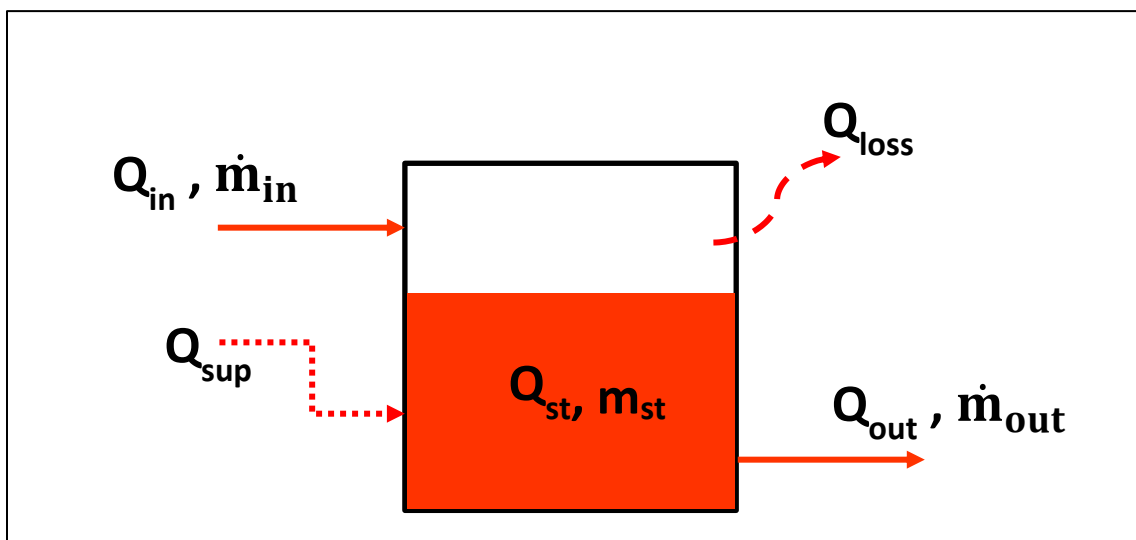
Κατηγορία	Σημείο τήξης [°C]	Αρχική πυκνότητα A_s [kg/m ³]	Μεταβολή πυκνότητας B_s [kg/m ³ /°C]	Θερμοχωρητικότητα στους 500°C [J/kg/K]
Νιτρικά	52 - 590	1922 - 2334	0,556 - 0,773	1400 - 2175
Ανθρακικά	397 - 990	2303 - 2511	0,448 - 0,599	1510 - 2500
Χλωριούχα	487 - 801	1766 - 2436	0,432 - 0,742	900 - 1480
Υδροξείδια	170 - 427	1600 - 1650	0,443 - 0,471	1820 - 2210

4.5. Δεξαμενή αποθήκευσης τηγμένου άλατος

Η δεξαμενή αποθήκευσης (thermal energy storage, TES) είναι μία από τις βασικότερες συνιστώσες ενός ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος. Η χρήση της επιτρέπει την μετάβαση της παραγωγής από τις ώρες υψηλής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στις ώρες υψηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Επιπλέον, συμβάλει στη σταθεροποίηση του όλου συστήματος. Οι συνήθεις κατηγορίες των υλικών τα οποία αποθηκεύουν είναι τρεις. Η πρώτη είναι τα υλικά αισθητής θερμικής αποθήκευσης (sensible heat storage, SHS) με παράδειγμα υλικά όπως το νερό, ο αέρας ή το σκυρόδεμα. Ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα τηγμένα άλατα, το «solar salt», ανήκει σε αυτή την κατηγορία. Αυτά τα υλικά είναι τα πλέον διαδεδομένα και χρησιμοποιούμενα σε τέτοιες εγκαταστάσεις. Η δεύτερη κατηγορία είναι τα υλικά λανθάνουσας θερμικής αποθήκευσης (latent heat storage, LHS) γνωστά και ως υλικά αλλαγής φάσης, όπως για παράδειγμα τα οργανικά ή μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξης, ενώ η τελευταία κατηγορία είναι τα θερμοχημικά υλικά θερμικής αποθήκευσης (thermochemical heat storage, THS) όπως για παράδειγμα τα ροφητικά υλικά. Τα LHS υπερτερούν έναντι των SHS λόγω της υψηλότερης

πυκνότητας αποθήκευσης αλλά και της περιορισμένης σε έκταση αλλαγής φάσης του υλικού. Επιπλέον, παρουσιάζουν μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, το οποίο οδηγεί σε μικρότερες θερμικές απώλειες. Το βασικό τους μειονέκτημα συναντάται στο ότι επιτρέπουν αποθήκευση περιορισμένης διάρκειας (μερικών ωρών). Τα υλικά THS δεν είναι τόσο ευρέως χρησιμοποιούμενα, αλλά αναμένεται να έχουν σημαντική αξιοποίηση κυρίως λόγω της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χωρίς απώλειες. Είναι εξαιρετικά σημαντικό οι απώλειες θερμότητας να περιοριστούν όσο το δυνατό περισσότερο διότι όσο αυτές αυξάνονται, απαιτούνται μεγαλύτερες εκτάσεις συλλεκτικής επιφάνειας στο σύστημα για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας [48][49].

Στις περισσότερες εφαρμογές κεντρικού δέκτη με διακίνηση τηγμένου άλατος, ο κεντρικός δέκτης είναι συνδεδεμένος με δύο δεξαμενές αποθήκευσης. Η μία βρίσκεται ανάντη του κεντρικού δέκτη και διαμέσου της διακινείται το θερμό τηγμένο άλας, ενώ η άλλη βρίσκεται κατάντη του κεντρικού δέκτη διακινώντας διαμέσου της το κρύο τηγμένο άλας. Στην **Εικόνα 36** παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση των ροών μάζας και ενέργειας σε μία τέτοια δεξαμενή [50].



Εικόνα 36: Σχηματική απεικόνιση θερμορών δεξαμενής αποθήκευσης τηγμένου άλατος

Το σύστημα της δεξαμενής περιγράφεται από τους ισολογισμούς μάζας και ενέργειας του τηγμένου άλατος που διακινεί. Ο ισολογισμός μάζας περιγράφεται με βάση την εξίσωση της συνέχειας, δηλαδή την **Εξίσωση (38)**, ενώ ο ισολογισμός της ισχύος με βάση την **Εξίσωση (39)**. Η ισχύς που εισέρχεται στη δεξαμενή αποθήκευσης (Q_{in}) υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (40)** και κατ' αντιστοιχία η εξερχόμενη ισχύς (Q_{out}) με βάση την **Εξίσωση (41)**. Η **Εξίσωση (42)** εκφράζει τις απώλειες θερμότητας (Q_{loss}), ενώ η ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (43)**. Η ενέργεια θέρμανσης της δεξαμενής (Q_{sup}) αντιπροσωπεύει μια υποστηρικτική μονάδα για τη δεξαμενή. Σε περίπτωση που η θερμοκρασία εντός της δεξαμενής πλησιάσει το κατώτερο

όριο, δηλαδή τη θερμοκρασία τήξης του τηγμένου άλατος, τότε ενεργοποιείται με σκοπό να προσδώσει θερμότητα στη δεξαμενή έτσι ώστε να αποφευχθεί η περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας του άλατος εντός αυτής [50].

$$\dot{m}_{st} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (38)$$

όπου:

\dot{m}_{st} = ρυθμός αποθήκευσης μάζας στο εσωτερικό της δεξαμενής [kg/s]

\dot{m}_{in} = εισερχόμενη ροή μάζας στη δεξαμενή [kg/s]

\dot{m}_{out} = εξερχόμενη ροή μάζας από τη δεξαμενή [kg/s]

$$Q_{st} = Q_{in} + Q_{sup} - Q_{loss} - Q_{out} \quad (39)$$

όπου:

Q_{st} = αποθηκευμένη θερμική ισχύς στη δεξαμενή [W]

Q_{in} = εισερχόμενη θερμική ισχύς στη δεξαμενή [W]

Q_{sup} = προσδιδόμενη εξωτερική ισχύς δεξαμενής [W]

Q_{loss} = απώλειες θερμότητας δεξαμενής [W]

Q_{out} = εξερχόμενη ισχύς δεξαμενής [W]

$$Q_{in} = \dot{m}_{in} C_{ps} (T_{in} - T_{\infty}) \quad (40)$$

όπου:

C_{ps} = ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση τηγμένου άλατος [J/kg/K]

T_{in} = θερμοκρασία εισόδου τηγμένου άλατος [K]

$$Q_{out} = \dot{m}_{out} C_{ps} (T_{st} - T_{\infty}) \quad (41)$$

όπου:

T_{st} = θερμοκρασία τηγμένου άλατος εντός της δεξαμενής [K]

$$Q_{loss} = (UA)_t (T_{st} - T_{\infty}) \quad (42)$$

όπου:

$(UA)_t$ = συντελεστής θερμικών απωλειών δεξαμενής [W/K]

T_{∞} = θερμοκρασία περιβάλλοντος [K]

$$Q_{st} = \rho_s \cdot C_{ps} \cdot V \cdot \dot{T}_{st} \quad (43)$$

όπου:

ρ_s = πυκνότητα τηγμένου άλατος [kg/m³]

V = όγκος τηγμένου άλατος στη δεξαμενή [m³]

5. Θερμοδυναμικοί κύκλοι αερίων

5.1. Θερμικοί σταθμοί μετατροπής ενέργειας

Η ηλεκτροπαραγωγή μεγάλης κλίμακας στηρίζεται κυρίως στις διεργασίες ενός θερμοδυναμικού κύκλου αερίων. Τέτοιες εγκαταστάσεις είναι γνωστές ως θερμικοί σταθμοί μετατροπής ενέργειας ή συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Οι συμβατικές αυτές μονάδες στηρίζονται στη διεργασία της καύσης, κατά την οποία η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε θερμότητα η οποία στη συνέχεια προσφέρεται ως πηγή σε κάποιο θερμοδυναμικό κύκλο έτσι ώστε να μετατραπεί σε μηχανική και εντέλει σε ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμότητα της καύσης αναβαθμίζει θερμοδυναμικά κάποιο αέριο, το οποίο εκτονώνεται σε ένα στρόβιλο του οποίου ο άξονας είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι είτε στερεά, όπως για παράδειγμα ο άνθρακας, είτε υγρά, όπως για παράδειγμα πετρέλαιο, είτε αέρια, με κυρίαρχο αέριο καύσιμο το φυσικό αέριο. Το βασικό πλεονέκτημα αυτών των μονάδων είναι η σταθερότητα που προσφέρουν ως μονάδες βάσης στο ενεργειακό μείγμα λόγω της ελεγχόμενης ροής καυσίμου. Επιπλέον, τα συμβατικά καύσιμα παρουσιάζουν πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Τα βασικά τους μειονεκτήματα όμως είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα καθώς επίσης και η εξαντλησιμότητα των φυσικών πόρων αλλά και η εξάρτηση από τις χώρες που τους κατέχουν. Έτσι, υπάρχει η βούληση προς όσο το δυνατό μεγαλύτερη αντικατάσταση αυτών από σταθμούς στηριζόμενους στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εκμετάλλευση της θερμότητας μέσω συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων είναι μια από τις προτεινόμενες λύσεις, η οποία όμως για να καταλήξει σε ηλεκτροπαραγωγή θα πρέπει να συνδυαστεί με κάποιο θερμοδυναμικό κύκλο αερίου [51].

5.2. Θερμοδυναμικά αξιώματα

Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι αερίων, όπως και όλες οι θερμοδυναμικές διεργασίες, διέπονται από τα θερμοδυναμικά αξιώματα ή θερμοδυναμικούς νόμους. Τα βασικά θερμοδυναμικά αξιώματα είναι τρία, αλλά υπάρχει και το λεγόμενο μηδενικό θερμοδυναμικό αξίωμα. Καμία θερμοδυναμική διεργασία δεν δύναται να παραβιάσει κάποιο από τα τέσσερα αυτά αξιώματα, τα οποία θα πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα. Τα τέσσερα θερμοδυναμικά αξιώματα διατυπώνονται και περιγράφονται στη συνέχεια [51].

1^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα: Η ενέργεια δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται, δύναται μόνο να μετατραπεί από μια μορφή ενέργειας σε μια άλλη. Το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα αποτελεί ουσιαστικά τη διατύπωση της αρχής διατήρησης της ενέργειας. Ως άμεση συνέπεια αυτού του αξιώματος προκύπτει ότι δεν μπορεί να παραχθεί έργο ή να διεκπεραιωθεί κάποια θερμοδυναμική διεργασία χωρίς την προσφορά ενέργειας στο σύστημα [51].

2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα: Είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μια συσκευή που να λειτουργεί σε κύκλο και θα αφαιρεί θερμότητα από ένα σώμα, θα την προσφέρει ακριβώς ίση σε ένα άλλο, χωρίς οποιοδήποτε άλλο αποτέλεσμα (διατύπωση Clausius). Αυτό σημαίνει ότι είναι αδύνατη η κατασκευή μιας μηχανής η οποία θα αφαιρεί θερμότητα από ένα σώμα και θα την προσφέρει σε άλλο χωρίς την πρόσδοση μηχανικού έργου. Το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα έρχεται να συμπληρώσει το πρώτο. Μια μηχανή είναι κατασκευάσιμη εάν δεν παραβιάζει κανένα από τα δύο αξιώματα [51].

3^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα: Η εντροπία ενός συστήματος του οποίου η θερμοκρασία βρίσκεται στο απόλυτο μηδέν της θερμοκρασιακής κλίμακας Kelvin, είναι μηδέν. Βέβαια, η εντροπία σε ένα σύστημα συνήθως εκφράζεται ως διαφορά εντροπίας μεταξύ δύο καταστάσεων του συστήματος [51].

Μηδενικό θερμοδυναμικό αξίωμα: Αν δύο σώματα βρίσκονται σε θερμοκρασιακή ισορροπία με ένα τρίτο, τότε αναγκαστικά θα βρίσκονται και μεταξύ τους. Βασική προϋπόθεση αποτελεί η μη ύπαρξη άλλης θερμικής αντίδρασης μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα κάποια χημική αντίδραση. Το μηδενικό θερμοδυναμικό αξίωμα θεμελιώνει την έννοια της θερμοκρασίας [51].

5.3. Κατηγορίες θερμοδυναμικών κύκλων

Μία πρώτη γενική διάκριση των θερμοδυναμικών κύκλων αποτελεί το εάν είναι ιδανικοί ή όχι. Ένας ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος αποτελείται από πλήρως εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες, αλλά δεν είναι απαραίτητα και εξωτερικά αντιστρεπτές. Μια θερμοδυναμική διεργασία θεωρείται αναστρέψιμη όταν θα μπορούσε να εκτελεστεί με αντίθετη φορά, οδηγώντας την ενέργεια ενός συστήματος από την τελική στην αρχική κατάσταση, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Οι αντιστρεπτές διεργασίες παρουσιάζουν τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης, ο οποίος και εξαρτάται από τη μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά του συστήματος. Στην πραγματικότητα, οι περισσότερες θερμοδυναμικές διεργασίες είναι μη ιδανικές κυρίως λόγω απωλειών στο στρόβιλο, το συμπιεστή, το συμπυκνωτή αλλά και στις σωληνώσεις. Οι απώλειες αυτές εκφράζονται μέσω των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης των μηχανών [51].

Μια δεύτερη διάκριση θερμοδυναμικών κύκλων αποτελεί το εάν είναι ανοικτοί ή κλειστοί. Ένα θερμοδυναμικό σύστημα θεωρείται κλειστό εάν δεν συναλλάσσει μάζα με το περιβάλλον του. Αντίθετα, ένα ανοικτό θερμοδυναμικό σύστημα συναλλάσσει θερμότητα, έργο και μάζα με το περιβάλλον του. Οι περισσότεροι θερμοδυναμικοί κύκλοι που αξιοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή είναι κλειστοί ως προς τη συναλλαγή μάζας, δηλαδή το ρευστό που διακινείται δεν εξέρχεται από αυτούς. Τέτοιοι θερμοδυναμικοί κύκλοι είναι για παράδειγμα ο κύκλος Clausius-Rankine και ο κύκλος Brayton, ενώ αντίθετα ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος ανοικτός κύκλος είναι ο κύκλος Joule (ουσιαστικά η ανοικτή μορφή του κύκλου Brayton) [51].

5.3.1. Θερμοδυναμικός κύκλος Carnot

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Carnot είναι ένας ολικά εσωτερικά και εξωτερικά αντιστρέπτος κύκλος. Για τον λόγο αυτό, δεν έχει καμία πρακτική εφαρμογή, αφού καμία πραγματική εγκατάσταση δεν θα μπορούσε να λειτουργεί αναστρέψιμα λόγω απωλειών που υπάρχουν εξαιτίας τριβών και θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά, ο κύκλος Carnot παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού ο βαθμός απόδοσης του κύκλου καθορίζει τον μέγιστο δυνατό βαθμό απόδοσης που μπορεί να έχει ένας πραγματικός κύκλος ο οποίος λειτουργεί μεταξύ ενός ζεύγους χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας ίδιο με του αντίστοιχου κύκλου Carnot. Ο βαθμός απόδοσης του Carnot υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (44)**. Στην **Εικόνα 37** παρουσιάζεται σχηματικά η αναστρέψιμη μηχανή του Carnot. Κατά την δεξιόστροφη ροή του ρευστού στον κλειστό κύκλο Carnot, η μηχανή λειτουργεί ως εργοπαραγωγός, ενώ κατά την αντίστροφη λειτουργία ως ψυκτικός κύκλος ή αντλία θερμότητας. Στην **Εικόνα 38** παρουσιάζονται τα διαγράμματα πίεσης-όγκου και θερμοκρασίας-εντροπίας του κύκλου Carnot [51][52].

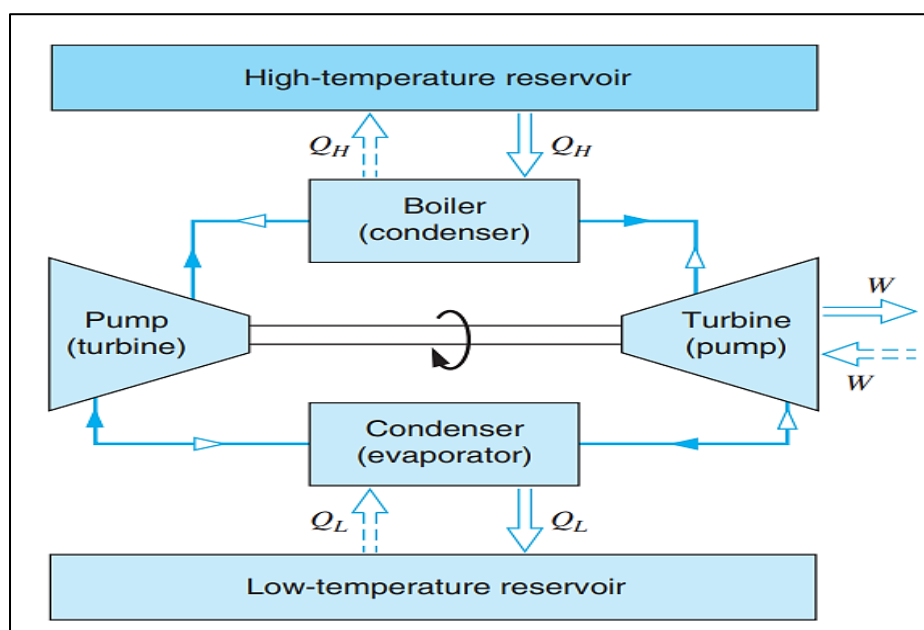
$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (44)$$

όπου:

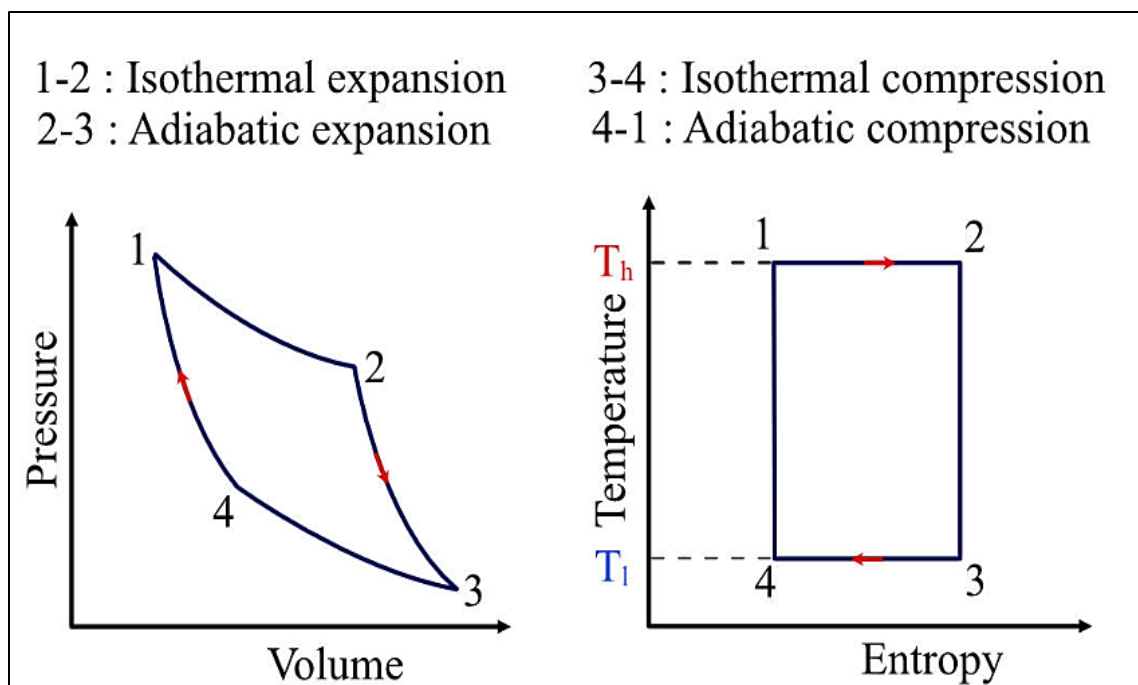
η_c = βαθμός απόδοσης κύκλου Carnot [-]

T_H = υψηλή θερμοκρασία κύκλου [K]

T_L = χαμηλή θερμοκρασία κύκλου [K]



Εικόνα 37: Αναστρέψιμη μηχανή Carnot. Η δεξιόστροφη ροή (συνεχή και γεμάτα βέλη) αντιστοιχεί στην εργοπαραγωγό μηχανή Carnot (heat engine) ενώ η αριστερόστροφη ροή (διακεκομμένα και λευκά βέλη) στη ψυκτική μηχανή Carnot (refrigerator) [51]



Εικόνα 38: Θερμοδυναμικός κύκλος Carnot. Αριστερά, το διάγραμμα μεταβολών πίεσης-όγκου και δεξιά το διάγραμμα μεταβολών θερμοκρασίας-εντροπίας [53]

5.3.2. Θερμοδυναμικός κύκλος Clausius-Rankine

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Clausius-Rankine αποτελεί τον βασικό εργοπαραγωγό κύκλο στους πλείστους θερμικούς σταθμούς. Στην απλούστερη του εκδοχή, το νερό θερμαίνεται σε ένα λέβητα και μεταπίπτει στην αέρια φάση είτε ως κορεσμένος είτε ως υπέρθερμος ατμός. Στη συνέχεια, εκτονώνεται σε έναν ατμοστρόβιλο, του οποίου ο άξονας είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια και η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος, ο εκτονωμένος πλέον ατμός, αφού πιθανώς έχει καταλήξει σε διφασικό μείγμα νερού, συμπυκνώνεται αποβάλλοντας θερμότητα προς το περιβάλλον μέχρι να μετατραπεί σε κορεσμένο ή υπόψυκτο υγρό. Τέλος, συμπιέζεται προς αύξηση της πίεσης του και εισέρχεται ξανά στο λέβητα. Επομένως, ο κύκλος Clausius-Rankine είναι ένας κατ' εξοχήν κλειστός θερμοδυναμικός κύκλος. Ο βαθμός απόδοσης του ιδανικού απλού κύκλου υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (45)**. Στην **Εικόνα 39** παρουσιάζεται σχηματικά η βασική διάταξη του ιδανικού κύκλου Clausius-Rankine καθώς επίσης και το αντίστοιχο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας [51][52].

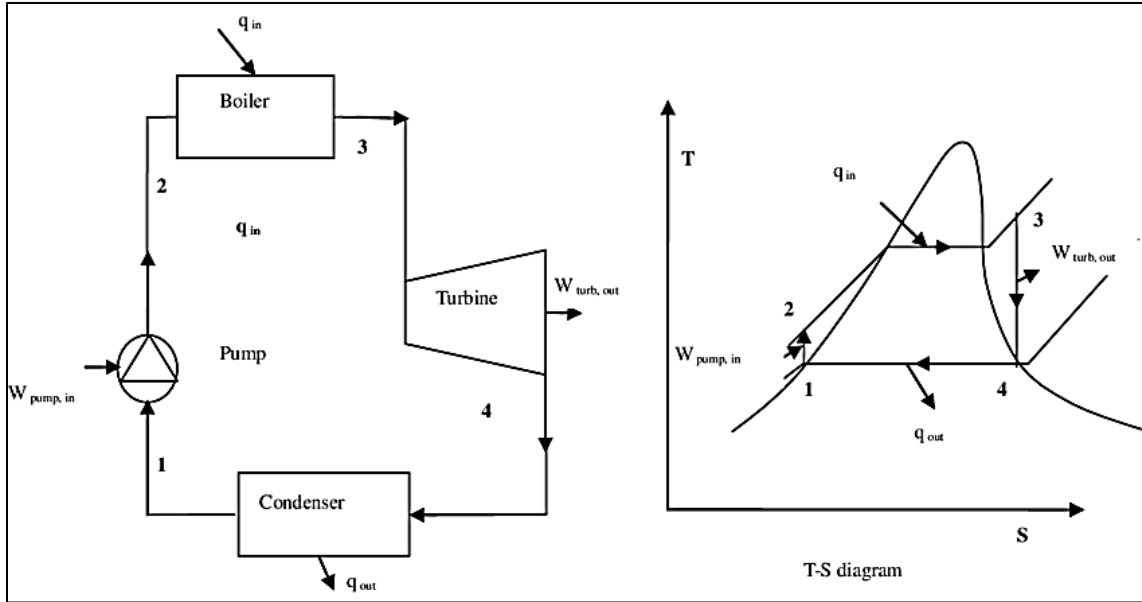
$$\eta_{\text{Rankine}} = 1 - \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \quad (45)$$

όπου:

η_{Rankine} = βαθμός απόδοσης κύκλου Clausius-Rankine [-]

Q_{out} = απορριπτόμενη θερμότητα στο συμπυκνωτή [W]

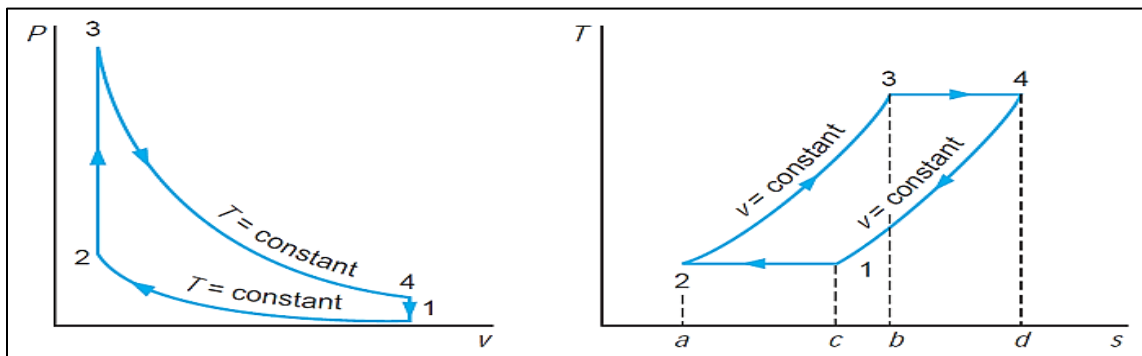
Q_{in} = προσδιδόμενη θερμότητα στο λέβητα [W]



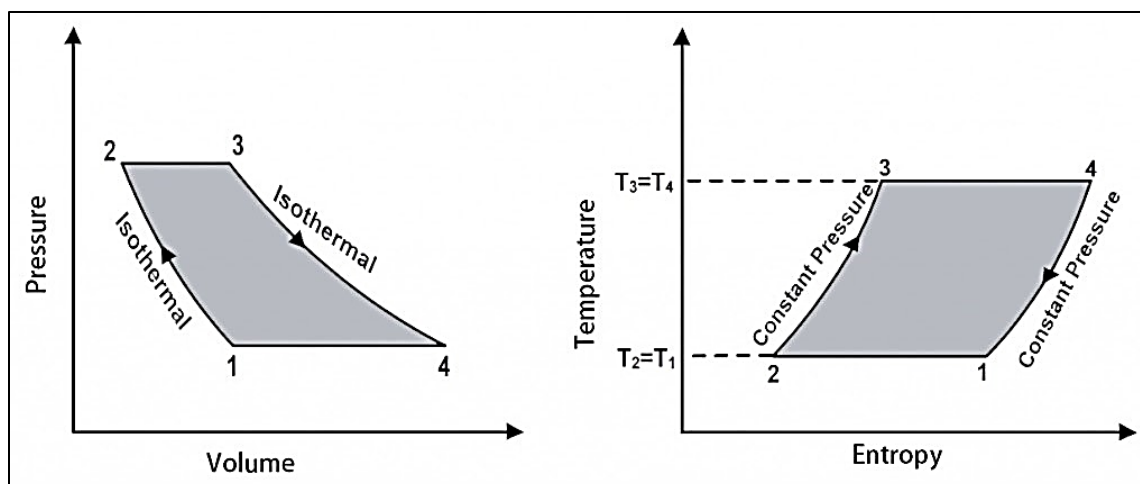
Εικόνα 39: Ιδανικός κύκλος Clausius-Rankine. Αριστερά, η σχηματική απεικόνιση ενός απλού κύκλου και δεξιά το διάγραμμα μεταβολών θερμοκρασίας-εντροπίας του [54]

5.3.3. Θερμοδυναμικός κύκλος Stirling-Ericsson

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Stirling-Ericsson είναι ένας κύκλος που αφορά αέρια ρευστά. Ουσιαστικά είναι δύο διαφορετικοί κύκλοι αλλά στηρίζονται σε παρόμοια φιλοσοφία. Αποτελούν και οι δύο τροποποίηση του κύκλου Carnot, αντικαθιστώντας τις ισεντροπικές διεργασίες. Ο κύκλος Stirling τις αντικαθιστά με ισόχωρες διεργασίες, δηλαδή σταθερού όγκου, ενώ ο κύκλος Ericsson με ισόθλιπτες ή ισοβαρείς διεργασίες, δηλαδή σταθερής πίεσης. Καθώς οι δύο αυτοί κύκλοι αποτελούν προέκταση του κύκλου Carnot στα αέρια, ο βαθμός απόδοσης και των δύο υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (44)**. Επιπλέον, οι κύκλοι αυτοί είναι μη πραγματικά κατασκευάσιμοι λόγω της υπόθεσης της πλήρους αναστρεψιμότητας των διεργασιών τους. Στην **Εικόνα 40** παρουσιάζονται τα διαγράμματα πίεσης-όγκου και θερμοκρασίας-εντροπίας του κύκλου Stirling, ενώ στην **Εικόνα 41** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα του κύκλου Ericsson.



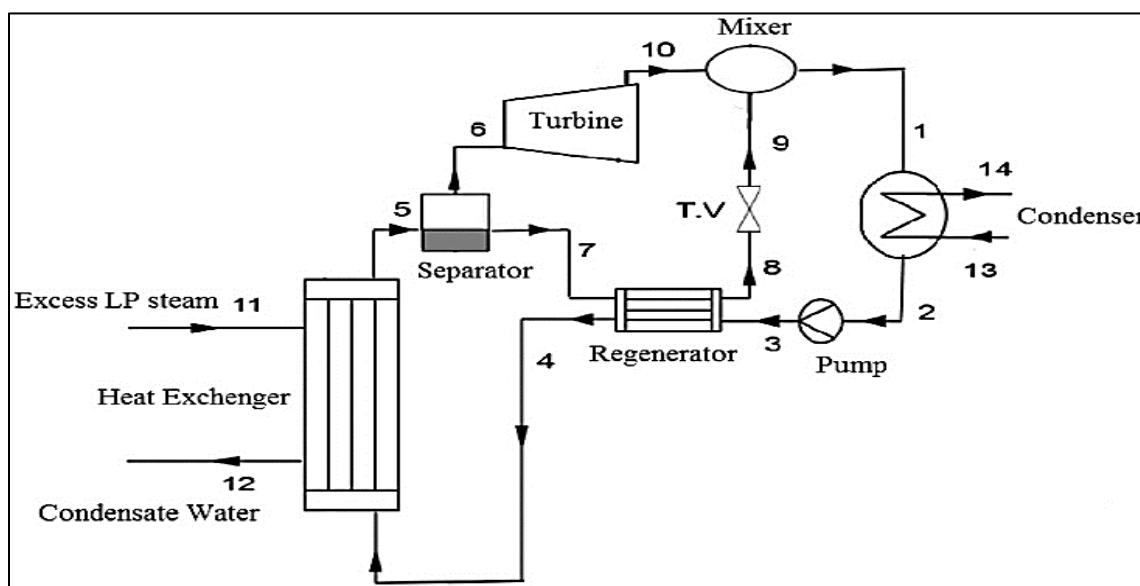
Εικόνα 40: Θερμοδυναμικός κύκλος Stirling. Αριστερά το διάγραμμα πίεσης-όγκου και δεξιά, το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας [55]



Εικόνα 41: Θερμοδυναμικός κύκλος Ericsson. Αριστερά, το διάγραμμα πίεσης-όγκου και δεξιά, το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας [56]

5.3.4. Θερμοδυναμικός κύκλος Kalina

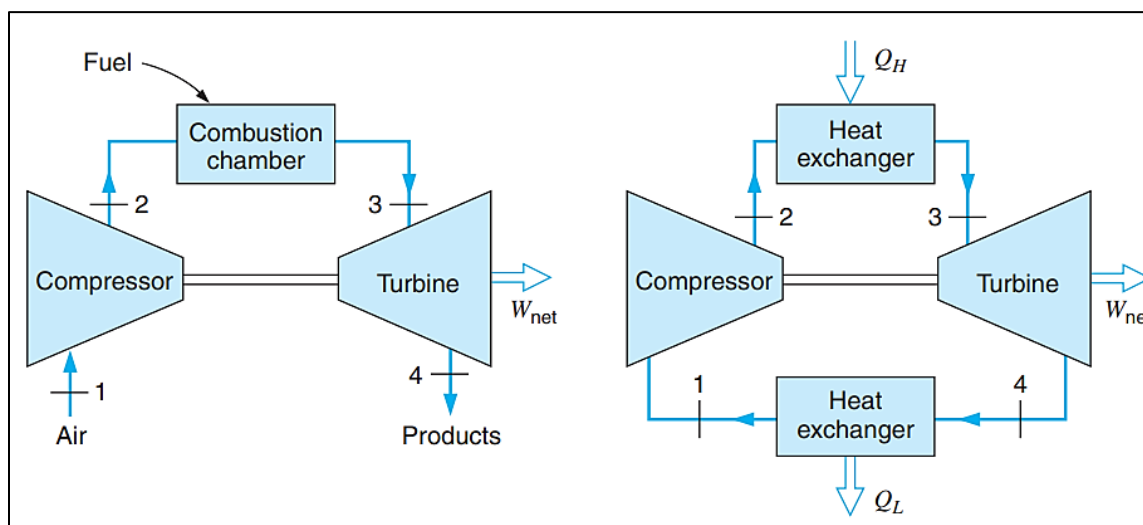
Ο θερμοδυναμικός κύκλος Kalina αποτελεί μια τροποποιημένη μορφή του θερμοδυναμικού κύκλου Clausius-Rankine. Αρχικά, δε χρησιμοποιείται μια καθαρή ουσία ως εργαζόμενο μέσο, αλλά αυτό αντικαθίσταται με μείγμα αμμωνίας-νερού. Στην **Εικόνα 42** παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα του κύκλου Kalina. Το μείγμα θερμαίνεται μέσα σε έναν μη ισοθερμικό ατμοποιητή όπου και διαχωρίζεται σε υγρό και ατμό. Ο ατμός, που είναι πιο πλούσιος σε αμμωνία, αφού υπερθερμανθεί εκτονώνεται σε ατμοστρόβιλο του οποίου ο άξονας είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια. Στη συνέχεια, ο ατμός απορροφάται από το ασθενές διάλυμα που είχε απομείνει στον ατμοποιητή και τελικά, μέσω αντλίας, οδηγείται και πάλι προς τον ατμοποίηση [57].



Εικόνα 42: Θερμοδυναμικός κύκλος Kalina [58]

5.3.5. Θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο κάποιο μονοφασικό αέριο. Ο κύκλος αυτός χαρακτηρίζεται ως κύκλος Joule όταν είναι ανοικτού τύπου, ενώ χαρακτηρίζεται ως κύκλος Brayton όταν είναι κλειστού τύπου. Ο κύκλος Joule χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο τον αέρα τον οποίο αναρροφά απευθείας από το περιβάλλον, γι' αυτό και είναι ανοικτό θερμοδυναμικό σύστημα. Αντίθετα, ο κύκλος Brayton μπορεί να χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο οποιοδήποτε αέριο. Στην **Εικόνα 43** παρουσιάζονται σχηματικά οι θερμοδυναμικοί κύκλοι Joule και Brayton [51].

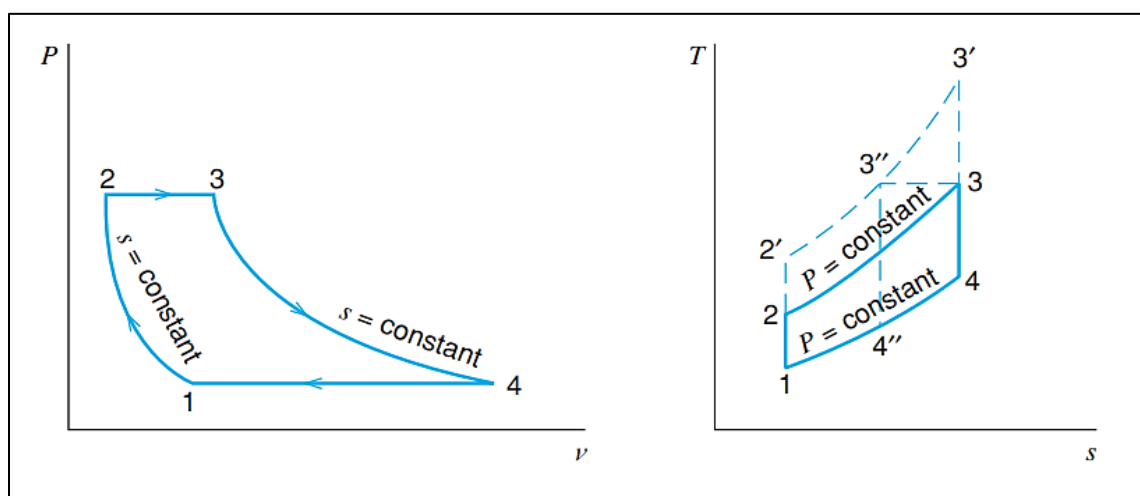


Εικόνα 43: Σχηματικά διαγράμματα θερμοδυναμικών κύκλων Joule (αριστερά) και Brayton (δεξιά) [51]

Στην είσοδο του θερμοδυναμικού κύκλου Joule αναρροφάται ατμοσφαιρικός αέρας περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, ο αέρας συμπιέζεται στον συμπιεστή αυξάνοντας την πίεση και τη θερμοκρασία του. Έπειτα, εισέρχεται στον θάλαμο καύσης όπου αναμειγνύεται με το καύσιμο (το οποίο βρίσκεται στην ίδια πίεση με τον συμπιεσμένο αέρα) και αναφλέγεται. Τα καυσαέρια της καύσης εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του θαλάμου καύσης είναι η υψηλότερη θερμοκρασία στον θερμοδυναμικό κύκλο. Στο τελευταίο στάδιο, τα καυσαέρια εκτονώνονται στον αεριοστρόβιλο και έπειτα εξέρχονται στο περιβάλλον. Στον ιδανικό θερμοδυναμικό κύκλο Joule, οι διεργασίες συμπίεσης και εκτόνωσης είναι ισεντροπικές, ενώ η διεργασία της καύσης είναι ισόθλιπτη. Αυτές οι υποθέσεις δεν ισχύουν στον πραγματικό κύκλο. Πέραν του περιορισμού του εργαζόμενου μέσου αποκλειστικά σε αέρα, ένα βασικό μειονέκτημα του κύκλου Joule είναι ότι τα καυσαέρια απορρίπτονται στο περιβάλλον σε υψηλή θερμοκρασία μερικών εκατοντάδων βαθμών κελσίου, αφήνοντας ένα αέριο υψηλής ενθαλπίας ανεκμετάλλευτο [59].

Στον θερμοδυναμικό κύκλο Brayton δεν γίνεται χρήση κάποιου θαλάμου καύσης, ενώ επίσης δεν υπάρχει καμία απόρριψη εργαζόμενου μέσου προς το περιβάλλον. Η καύση

αντικαθίσταται με έναν εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο γίνεται πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο από κάποια εξωτερική πηγή, όπως για παράδειγμα ένα σύστημα συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών. Το εργαζόμενο μέσο μπορεί να είναι οποιοδήποτε αέριο, με κυρίαρχη επιλογή το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Αφού εκτονωθεί στον αεριοστρόβιλο, το εργαζόμενο μέσο επιστρέφει στη διεργασία της συμπίεσης απορρίπτοντας πρώτα θερμότητα σε ένα δεύτερο εναλλάκτη. Αυτή η θερμότητα μπορεί να απορριφθεί στο περιβάλλον ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή σε κάποιον άλλο θερμοδυναμικό κύκλο, όπως για παράδειγμα σε έναν κύκλο Clausius-Rankine. Στον ιδανικό κύκλο Brayton οι διεργασίες συμπίεσης και εκτόνωσης είναι ισεντροπικές, ενώ οι διεργασίες πρόσδοσης και απόρριψης θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο είναι ισόθλιπτες. Στην **Εικόνα 44** παρουσιάζονται τα διαγράμματα πίεσης-όγκου και θερμοκρασίας-εντροπίας του θερμοδυναμικού κύκλου Brayton [59].



Εικόνα 44: Διαγράμματα πίεσης-όγκου (αριστερά) και θερμοκρασίας-εντροπίας (δεξιά) θερμοδυναμικού κύκλου Brayton [59]

Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Brayton υπολογίζεται από την **Εξίσωση (46)**, όπου r_p ο λόγος μέγιστης προς ελάχιστη πίεση του κύκλου. Η σχέση αυτή προκύπτει με βάση σημαντικές παραδοχές, όπως ισεντροπικές και αναστρέψιμες διεργασίες, αλλά και ιδιότητες τελείων αερίων και συγκεκριμένα του αέρα. Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται σημαντικά από τον λόγο πίεσης. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας στην **Εικόνα 44**, όσο ο λόγος πίεσης αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης [59].

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (46)$$

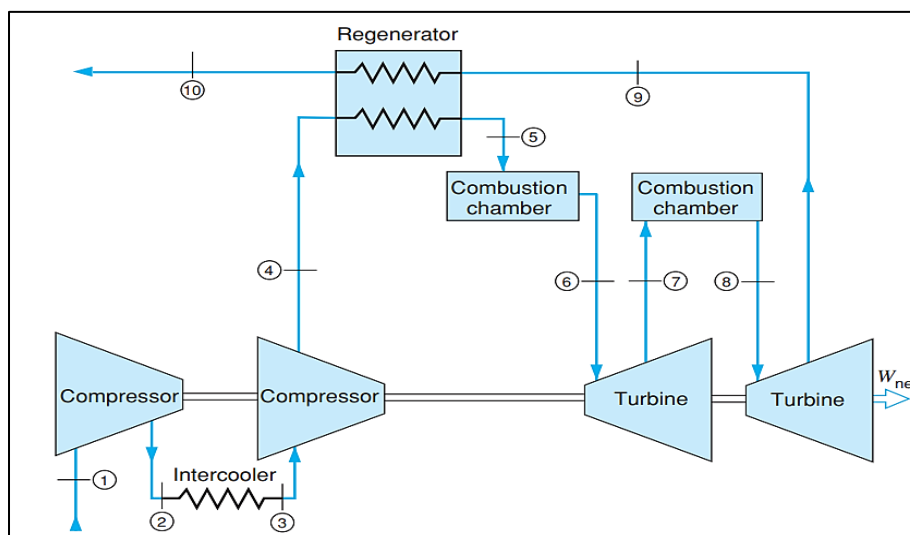
όπου:

$\eta_{th,Brayton}$ = θεωρητικός βαθμός απόδοσης κύκλου Brayton [-]

r_p = λόγος πίεσης κύκλου Brayton [-]

γ = ισεντροπικός εκθέτης αερίου [-]

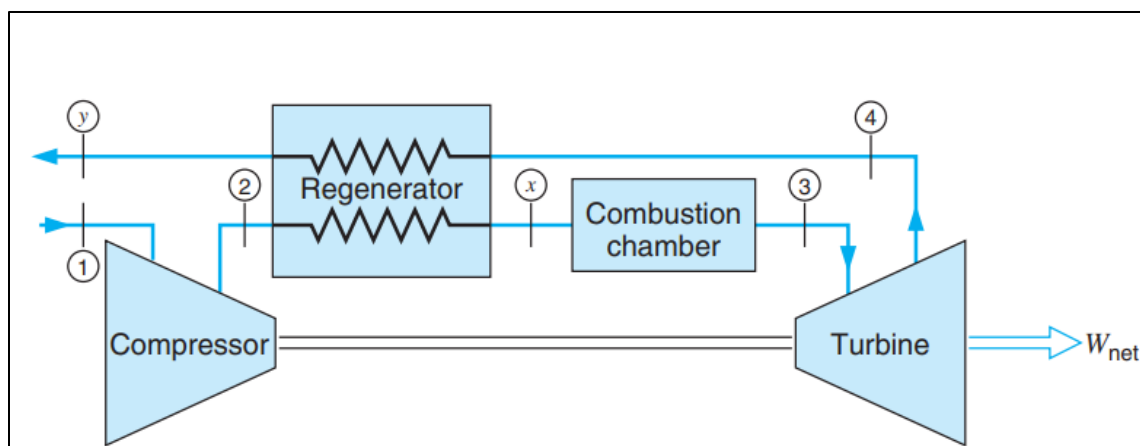
Όπως και ο θεωρητικός, έτσι και ο πραγματικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Brayton εξαρτάται ισχυρά από τον λόγο πίεσης. Επιπλέον, ο πραγματικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου η οποία εντοπίζεται στην είσοδο του στροβίλου. Η θερμοκρασία αυτή, η οποία εξαρτάται από τη μέγιστη πίεση, περιορίζεται λόγω της θερμικής αντοχής των υλικών στα πτερύγια του στροβίλου. Λόγω αυτού του περιορισμού, έχουν αναπτυχθεί άλλες μέθοδοι αύξησης του βαθμού απόδοσης ενός κύκλου Brayton, όπως για παράδειγμα η πολυβάθμια εκτόνωση, η ψύξη του εργαζόμενου μέσου αλλά και η αναγέννηση με τη χρήση εναλλάκτη. Στην **Εικόνα 45** παρουσιάζεται μια πιο σύνθετη διάταξη ενός ανοικτού κύκλου Joule με χρήση αναγέννησης (regeneration), ενδιάμεσης ψύξης (intercooling), πολυβάθμιας εκτόνωσης και αναθέρμανσης. Επίσης, ο πραγματικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται σημαντικά από τους ισοεντροπικούς βαθμούς απόδοσης των περιστρεφόμενων μερών, δηλαδή του συμπιεστή και του στροβίλου [59].



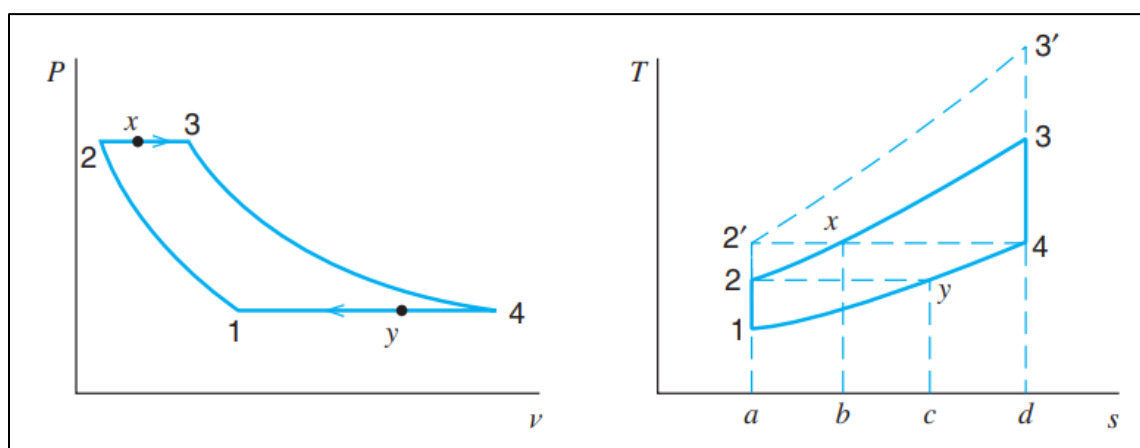
Εικόνα 45: Σύνθετη σχηματική διάταξη θερμοδυναμικού κύκλου Joule-Brayton [51]

5.3.6. Θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton με αναγέννηση

Ο βαθμός απόδοσης ενός πραγματικού κύκλου Joule-Brayton αυξάνεται με τη χρήση της διεργασίας της αναγέννησης. Στην **Εικόνα 46** παρουσιάζεται μια απλή σχηματική διάταξη ενός ανοικτού θερμοδυναμικού κύκλου Joule με απλή αναγέννηση. Στην **Εικόνα 47** παρουσιάζονται τα διαγράμματα πίεσης-όγκου και θερμοκρασίας-εντροπίας του αντίστοιχου κύκλου. Η διεργασία της αναγέννησης εκμεταλλεύεται την υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων που εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο, με σκοπό την προθέρμανση του εργαζόμενου μέσου που εξέρχεται από τον συμπιεστή, πριν αυτό οδηγηθεί στον θάλαμο καύσης ενός ανοικτού κύκλου ή στον εναλλάκτη θερμότητας ενός κλειστού κύκλου. Έτσι, απαιτείται μικρότερη πρόσδοση θερμότητας στον θάλαμο καύσης για την επίτευξη ίδιας θερμοκρασίας στην είσοδο του αεριοστρόβιλου, παράμετρος που επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης του κύκλου. Στην ιδανική περίπτωση, η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου μπορεί να φτάσει στη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον αεριοστρόβιλο [51].



Εικόνα 46: Σχηματική διάταξη θερμοδυναμικού κύκλου Joule με αναγέννηση [51]



Εικόνα 47: Διαγράμματα πίεσης-όγκου (αριστερά) και θερμοκρασίας-εντροπίας (δεξιά) θερμοδυναμικού κύκλου Joule με αναγέννηση [51]

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας στην **Εικόνα 47**, ο βαθμός απόδοσης επηρεάζεται από τον λόγο πίεσης του θερμοδυναμικού κύκλου. Θεωρώντας ιδανικό κύκλο αναγέννησης, δηλαδή ότι η θερμοκρασία εξόδου από τον αναγεννητή ισούται με τη θερμοκρασία εξόδου από τον αεριοστρόβιλο, ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (47)**. Επομένως, ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται από τον λόγο θερμοκρασιών μεταξύ εξόδου από τον συμπιεστή και εισόδου στον αεριοστρόβιλο. Ο βασικός περιορισμός αποτελεί και πάλι η μέγιστη θερμική αντοχή των υλικών του αεριοστρόβιλου [51].

$$\eta_{\text{th,reg}} = 1 - \frac{T_2}{T_3} \quad (47)$$

όπου:

$\eta_{\text{th,reg}}$ = θεωρητικός βαθμός απόδοσης κύκλου Joule με αναγέννηση [-]

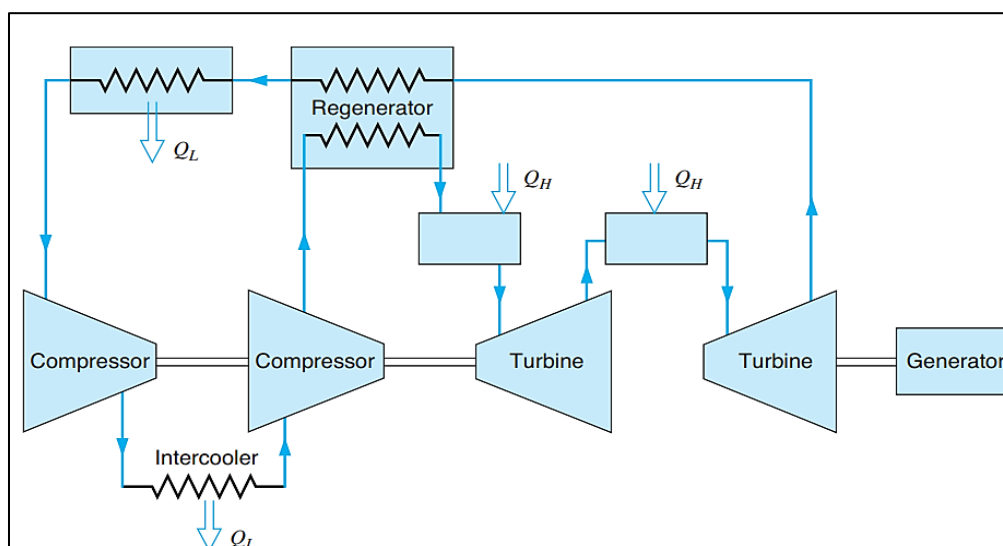
T_2 = θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή [K]

T_3 = θερμοκρασία εισόδου αεριοστρόβιλου [K]

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι η αναγέννηση γίνεται μετά την έξοδο του εργαζόμενου μέσου από το συμπιεστή. Σε περίπτωση που αυτή γίνει πριν την είσοδο στο συμπιεστή, τότε ο κύκλος εξαναγκάζεται να λειτουργεί με μικρότερη παροχή μάζας. Αυτό συμβαίνει διότι, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου η πυκνότητα του μειώνεται. Καθώς το μέγεθος του συμπιεστή είναι πεπερασμένο, αυτός πλέον δύναται να διακινεί μικρότερη παροχή μάζας. Η παροχή μάζας όμως είναι ευθέως ανάλογη της παραγόμενης ισχύς από τον στρόβιλο. Επομένως, κάνοντας αναγέννηση πριν τον συμπιεστή, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου επηρεάζεται αρνητικά. Αντίστοιχα, μειωμένη πυκνότητα συνεπάγεται αυξημένο ειδικό όγκο, ο οποίος οδηγεί σε αύξηση στο καταναλισκόμενο έργο στον συμπιεστή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο συμπιεστής τροφοδοτείται σε ισχύ από το παραγόμενο έργο στο στρόβιλο, αυτό μειώνει το καθαρά παραγόμενο έργο από τον θερμοδυναμικό κύκλο και κατά συνέπεια τον βαθμό απόδοσης [51].

5.3.7. Θερμοδυναμικός κύκλος Joule-Brayton με αναγέννηση και ψύξη

Επιπλέον της αναγέννησης, μια άλλη θερμοδυναμική διεργασία που συναντάται στους κύκλους Joule-Brayton με σκοπό την αύξηση του βαθμού απόδοσης είναι η ψύξη. Πιθανή ψύξη του εργαζόμενου μέσου μπορεί να γίνει σε δύο στάδια σε έναν τέτοιο κύκλο. Εάν η συμπίεση είναι πολυβάθμια, τότε είναι δυνατή η εφαρμογή ενδιάμεσης ψύξης (intercooling). Σε περίπτωση που ο κύκλος είναι κλειστός, τότε είναι δυνατή η ψύξη του εργαζόμενου μέσου πριν αυτό εισέλθει στο συμπιεστή (cooling). Στην **Εικόνα 48** παρουσιάζεται μια σχηματική διάταξη κλειστού θερμοδυναμικού κύκλου Brayton με πολυβάθμια συμπίεση και εκτόνωση, αναγέννηση, ενδιάμεση ψύξη και ψύξη του εργαζόμενου μέσου πριν τον συμπιεστή. Ψύχοντας το εργαζόμενο αέριο μέσο υπό σταθερή πίεση, ο ειδικός όγκος του μειώνεται. Έτσι, το απαιτούμενο καταναλισκόμενο έργο από τον συμπιεστή μειώνεται και ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κύκλου αυξάνεται [51].



Εικόνα 48: Σχηματική διάταξη κλειστού θερμοδυναμικού κύκλου Brayton με πολυβάθμια συμπίεση και εκτόνωση, αναγέννηση, ενδιάμεση ψύξη και ψύξη πριν τον συμπιεστή [51]

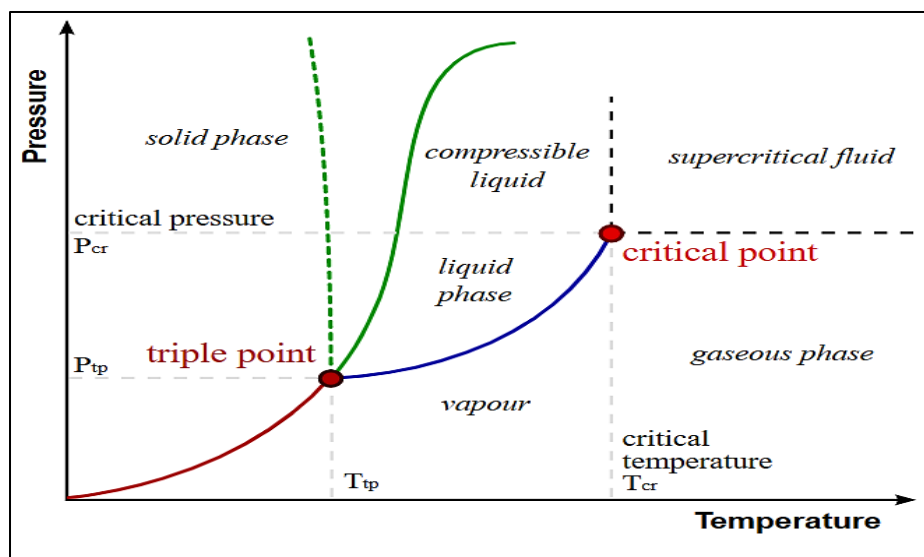
Σε μια διάταξη κοινού άξονα αεριοστροβίλου και συμπιεστή σε έναν κλειστό θερμοδυναμικό κύκλο Brayton, ο συμπιεστής περιστρέφεται με έργο που του προσφέρεται από τον αεριοστροβίλο. Το έργο συμπίεσης μπορεί να αποτελεί το 40%-80% του παραγόμενου έργου από τον αεριοστροβίλο. Αυτό, καταδεικνύει και τη σημασία των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης των δύο αυτών περιστρεφόμενων μηχανών. Εάν αυτοί είναι μικρότεροι από 60%, τότε όλο το παραγόμενο έργο του αεριοστροβίλου θα καταναλώνεται από τον συμπιεστή και ο βαθμός απόδοσης του κύκλου θα είναι μηδενικός [59].

5.4. Εργαζόμενα μέσα σε κλειστούς θερμοδυναμικούς κύκλους

Τα εργαζόμενα μέσα σε θερμοδυναμικούς κύκλους αερίων επιλέγονται με βάση τις ιδιότητες τους. Οι παράγοντες επιλογής αφορούν διάφορα χαρακτηριστικά του αερίου, βάσει των οποίων αυτά κατηγοριοποιούνται. Μια πρώτη παράμετρος αποτελούν οι φυσικοχημικές ιδιότητες του αερίου, όπως για παράδειγμα η τοξικότητα (toxicity) και η ευφλεκτότητα (flammability). Τα χαρακτηριστικά αυτά ποσοτικοποιούνται κατά κάποιο τρόπο μέσω του δείκτη ασφαλείας της ASHRAE (ASHRAE level for safety) με ένα γράμμα και έναν αριθμό. Η ασφαλέστερη κατηγορία είναι η A1. Μια δεύτερη παράμετρος αποτελεί η περιβαλλοντική επίπτωση που επιφέρει η χρήση του εκάστοτε εργαζόμενου μέσου. Οι δύο κυρίαρχοι δείκτες είναι ο ODP (ozone depleting potential) ο οποίος αφορά την επίδραση στην καταστροφή του όζοντος και ο GWP (global warming potential) ο οποίος αφορά την επίδραση στην αύξηση της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα. Συνήθως, ο δείκτης GWP αναφέρεται συγκριτικά ως προς το διοξείδιο του άνθρακα. Μια τρίτη παράμετρος είναι η συμπεριφορά του αερίου ως προς τη μεταφορά θερμότητας, δηλαδή το πόσο καλά η θερμότητα μεταφέρεται μέσω αυτού. Γενικά, η συμπεριφορά των καθαρών ουσιών είναι καλύτερη σε σύγκριση με αυτή των μειγμάτων [60].

5.4.1. Κρίσιμο σημείο

Το κρίσιμο σημείο (critical point) αποτελεί το τελευταίο σημείο σε μια καμπύλη ισορροπίας φάσης σε ένα διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας. Στην **Εικόνα 49** παρουσιάζεται ένα ποιοτικό σχήμα της καμπύλης ισορροπίας φάσεων μιας καθαρής ουσίας, στην οποία σημειώνεται το κρίσιμο σημείο. Το σημείο αυτό χαρακτηρίζεται από δύο μεγέθη, την κρίσιμη πίεση (p_{cr}) και την κρίσιμη θερμοκρασία (T_{cr}). Εάν μια καθνή ουσία έχει τιμές πίεσης και θερμοκρασίας μεγαλύτερες των τιμών αυτών, τότε βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση (supercritical fluid). Αυτό σημαίνει ότι οι δύο φάσεις, δηλαδή η υγρή και η αέρια, δεν μπορούν να διαχωριστούν ή να διακριθούν. Επιπλέον, οι ιδιότητες της ουσίας αυτής δεν είναι ούτε αυτές της αέριας φάσης ούτε αυτές της υγρής, αλλά δημιουργείται ένα νέο σύμπλεγμα ιδιοτήτων [51].



Εικόνα 49: Κρίσιμο σημείο καθαρής ουσίας σε διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας [61]

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται κάποιες ιδιότητες που αφορούν καθαρές ουσίες αλλά και μείγματα, όπως για παράδειγμα οι ιδιότητες του κρίσιμου σημείου. Αυτό που ξεχωρίζει είναι η πολύ χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία του διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με τις εξαιρετικές περιβαλλοντικές του ιδιότητες [60].

Πίνακας 3: Ιδιότητες χημικών ουσιών και ενώσεων [60]

Όνομα	ASHRAE No.	Χημικό σύμβολο	T_{cr} [°C]	p_{cr} [bar]	ASHRAE level for safety	ODP (rel. R11)	GWP (rel. CO2)
Διοξείδιο του άνθρακα	R744	CO ₂	31	73,8	A1	0	1
Νερό	R718	H ₂ O	374	22,1	A1	0	-
Βουτάνιο	R600	C ₄ H ₁₀	152	37,9	A3	0	0
Αμμωνία	R717	NH ₃	133	112,8	B2	0	<1
Υδροφθοράνθρακας	R134a	CH ₂ FCF ₃	101	40,7	A1	0	1300
Ζεοτροπικό μείγμα	R407C	R32/R125/R134a (23%/25%/52%)	87	48,2	A1	0	1600

5.4.2. Το διοξείδιο του άνθρακα σε συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα

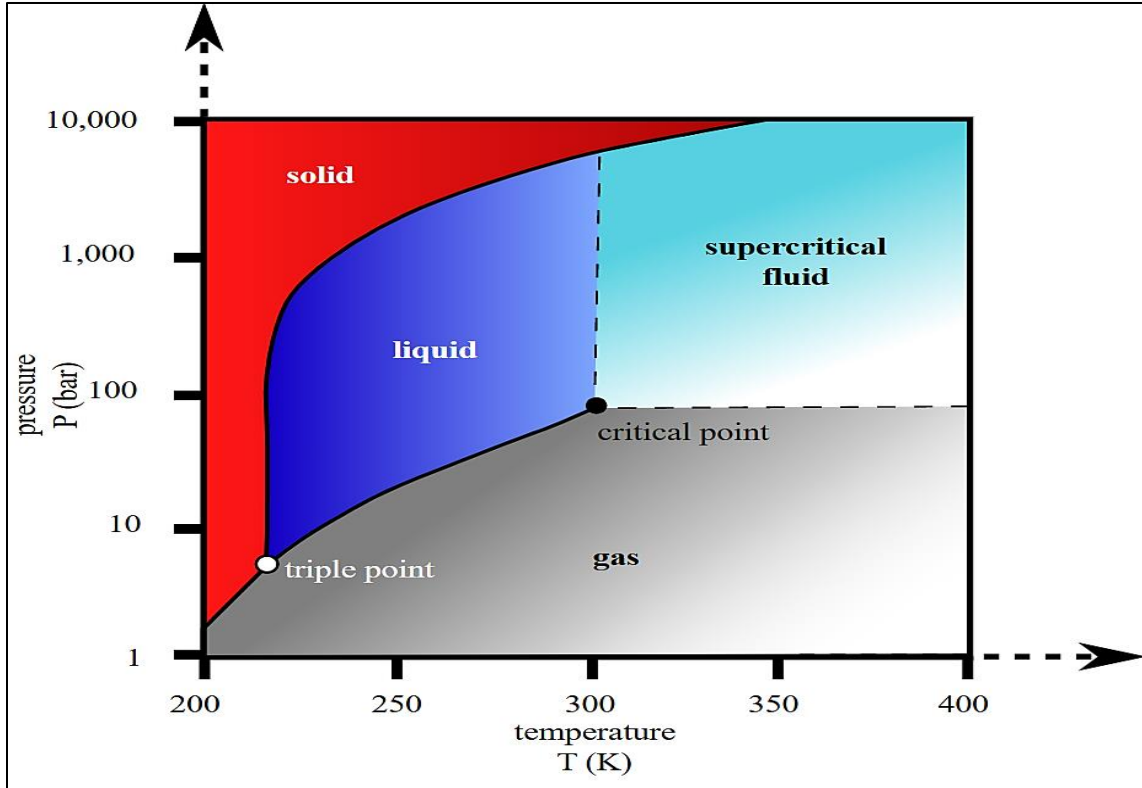
Ανάλογα με την επιλογή του τύπου του συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος καθορίζεται και η γεωμετρία του δέκτη. Η γεωμετρία αυτή επηρεάζει σημαντικά την υψηλή θερμοκρασία που προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο. Σε περίπτωση που επιλεγεί σύστημα υψηλού λόγου συγκέντρωσης, όπως είναι τα συστήματα κεντρικού δέκτη, τότε αντίστοιχα υψηλός θα πρέπει να είναι και ο συντελεστής συναγωγής μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του δέκτη και του ρευστού. Σε αντίθετη περίπτωση, οι υψηλές θερμοκρασίες

που θα αναπτύσσονται στον δέκτη δεν θα απάγονται από το εργαζόμενο μέσο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλών θερμοκρασιακών διαφορών στα τμήματα του δέκτη. Αυτό, οδηγεί σε σημαντικά μεγάλες θερμικές απώλειες αλλά και σε έντονες θερμικές καταπονήσεις λόγω διαστολής στα επιμέρους τμήματα του δέκτη. Γι' αυτό, εάν η επιλογή είναι παραβολικός συγκεντρωτικός συλλέκτης ή συγκεντρωτικός συλλέκτης Fresnel, επιλέγεται ρευστό με μικρό συντελεστή συναγωγής θερμότητας, όπως για παράδειγμα τα θερμικά λάδια. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι το άνω όριο στη θερμοκρασία που αναπτύσσεται, η οποία θα πρέπει να είναι μικρότερη των 400°C. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το νερό. Όμως, σε περιοχές που η ηλιακή ακτινοβολία είναι σημαντικά υψηλή συνήθως το νερό είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί λόγω της λειψυδρίας που παρατηρείται σε τέτοιες περιοχές [51].

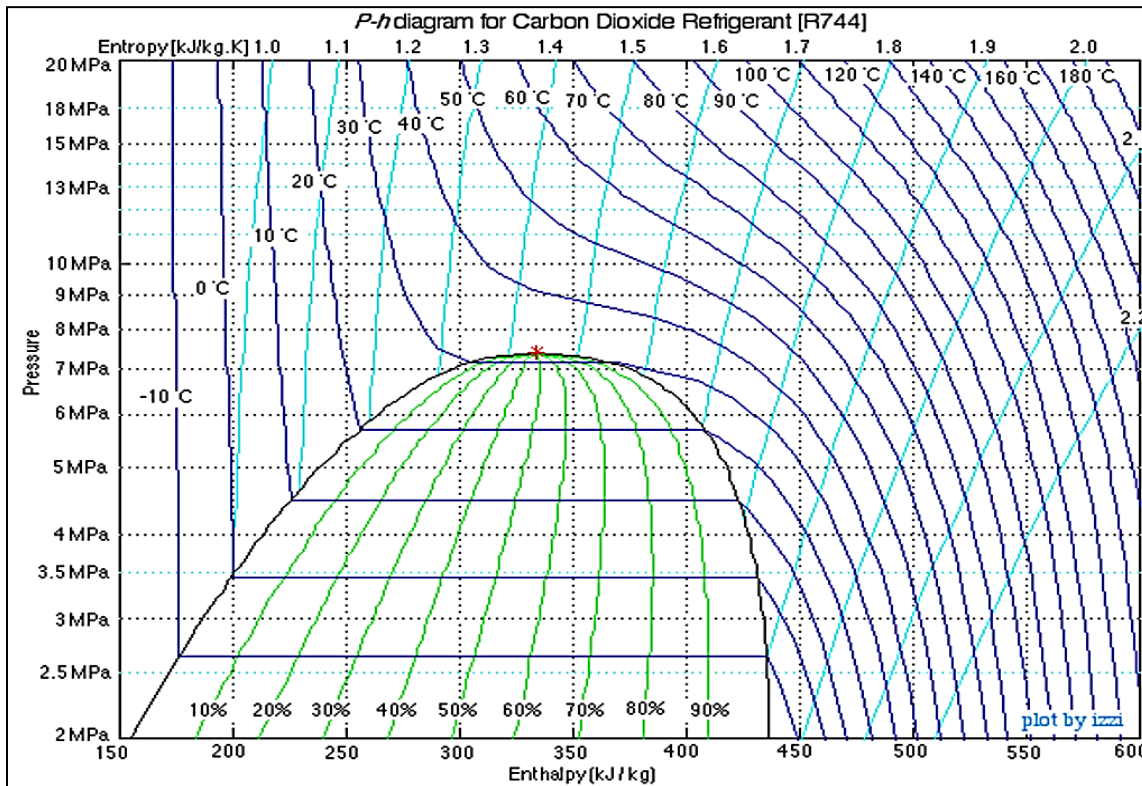
Αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου συνεπάγεται αύξηση στον βαθμό απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου αερίου που συνεργάζεται με το ηλιακό συγκεντρωτικό σύστημα. Επομένως, είναι επιθυμητή η χρήση εργαζόμενων μέσων που μπορούν να φτάσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Μια καλή λύση για εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων είναι τα αέρια εργαζόμενα μέσα. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η χαμηλή τους πυκνότητα. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη αύξησης της πίεσης για να μειωθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια που απαιτείται για τη διακίνηση του αερίου. Έτσι, απαιτούνται σωληνώσεις μεγαλύτερου πάχους, ενώ υπάρχει και ο κίνδυνος διαρροών στις φλάντζες των σημείων σύνδεσης των σωληνώσεων [51].

Ένα συνηθισμένο αέριο που επιλέγεται ως ρευστό σε ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα, είτε απευθείας, είτε ως εργαζόμενο μέσο σε συζευγμένο θερμοδυναμικό κύκλο, είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Η χρήση του διοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζει κάποια βασικά πλεονεκτήματα που το καθιστούν ελκυστικό. Αρχικά, είναι φιλικό προς το περιβάλλον, αφού αποτελεί συστατικό του ατμοσφαιρικού αέρα, ενώ είναι ένα πολύ ασφαλές εργαζόμενο μέσο αφού δεν είναι ούτε τοξικό, ούτε διαβρωτικό, ούτε εύφλεκτο και ούτε εκρηκτικό. Επιπλέον, βρίσκεται σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον, πράγμα που το καθιστά ως μια πολύ οικονομικά ανταγωνιστική επιλογή λόγω του χαμηλού του κόστους. Επιπρόσθετα, έχουν ήδη διεξαχθεί πολλές μελέτες που αφορούν τις θερμοχημικές ιδιότητες του [60].

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του διοξειδίου του άνθρακα εντοπίζεται στο κρίσιμο του σημείο. Στην **Εικόνα 50** παρουσιάζεται το διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας του διοξειδίου του άνθρακα, ενώ στην **Εικόνα 51** παρουσιάζεται το διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας. Οι τιμές κρίσιμης πίεσης και θερμοκρασίας φαίνονται στον **Πίνακα 3**. Η σχετικά υψηλή του κρίσιμη πίεση οδηγεί στη δημιουργία ενός συμπαγούς συστήματος θερμοδυναμικού κύκλου, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί το μέγεθος του αναγεννητή. Η σχετικά χαμηλή του κρίσιμη θερμοκρασία επιτρέπει την αξιοποίηση πηγών χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει την εύκολη δημιουργία ενός θερμοδυναμικού κύκλου που θα βρίσκεται στην υπερκρίσιμη περιοχή (μέρος αυτού ή και ολόκληρος), γεγονός που οδηγεί στην αποφυγή προβλημάτων που παρατηρούνται κατά την αλλαγή φάσης μιας ουσίας στις διάφορες διεργασίες ενός θερμοδυναμικού κύκλου [60].

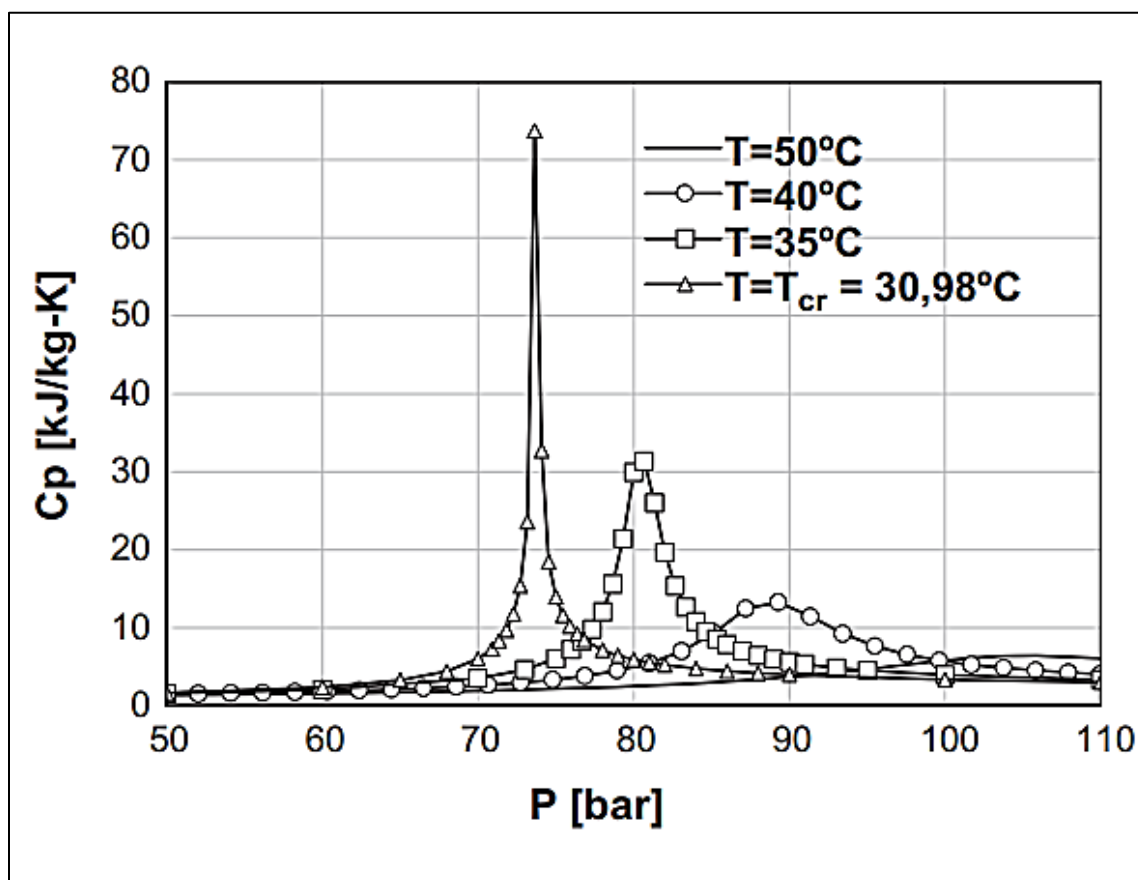


Εικόνα 50: Διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας διοξειδίου του άνθρακα [62]

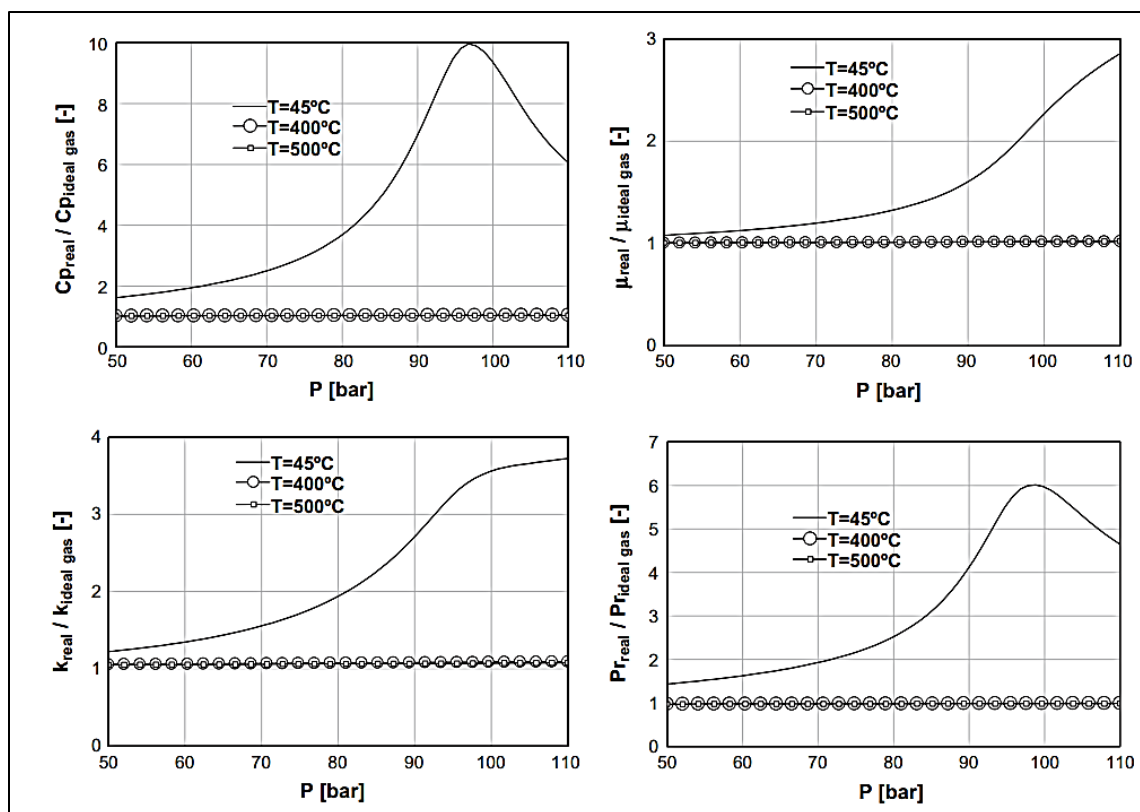


Εικόνα 51: Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας διοξειδίου του άνθρακα [63]

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 51**, κοντά στο κρίσιμο σημείο η ισοθερμοκρασιακή καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια. Αυτό, συνεπάγεται σημαντική αύξηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση (C_p) του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό προκύπτει θεωρητικά από τον ορισμό του C_p , αφού παρόλο που η ενθαλπία αυξάνεται, η θερμοκρασία δεν παρουσιάζει ουσιαστική διαφορά. Στην **Εικόνα 52** παρουσιάζεται η μεταβολή του C_p του διοξειδίου του άνθρακα ως προς την πίεση για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας. Μια άλλη ενδιαφέρουσα ιδιότητα του διοξειδίου του άνθρακα είναι πως, σε υψηλές θερμοκρασίες, συμπεριφέρεται ως ένα ιδανικό αέριο, δηλαδή οι ιδιότητες του πραγματικού αερίου προσεγγίζουν αυτές του τελείου αερίου. Στην **Εικόνα 53** παρουσιάζεται η σύγκριση κάποιων θερμοδυναμικών μεγεθών μεταξύ πραγματικού και ιδανικού αερίου για το διοξείδιο του άνθρακα σε διάφορες θερμοκρασίες [64].

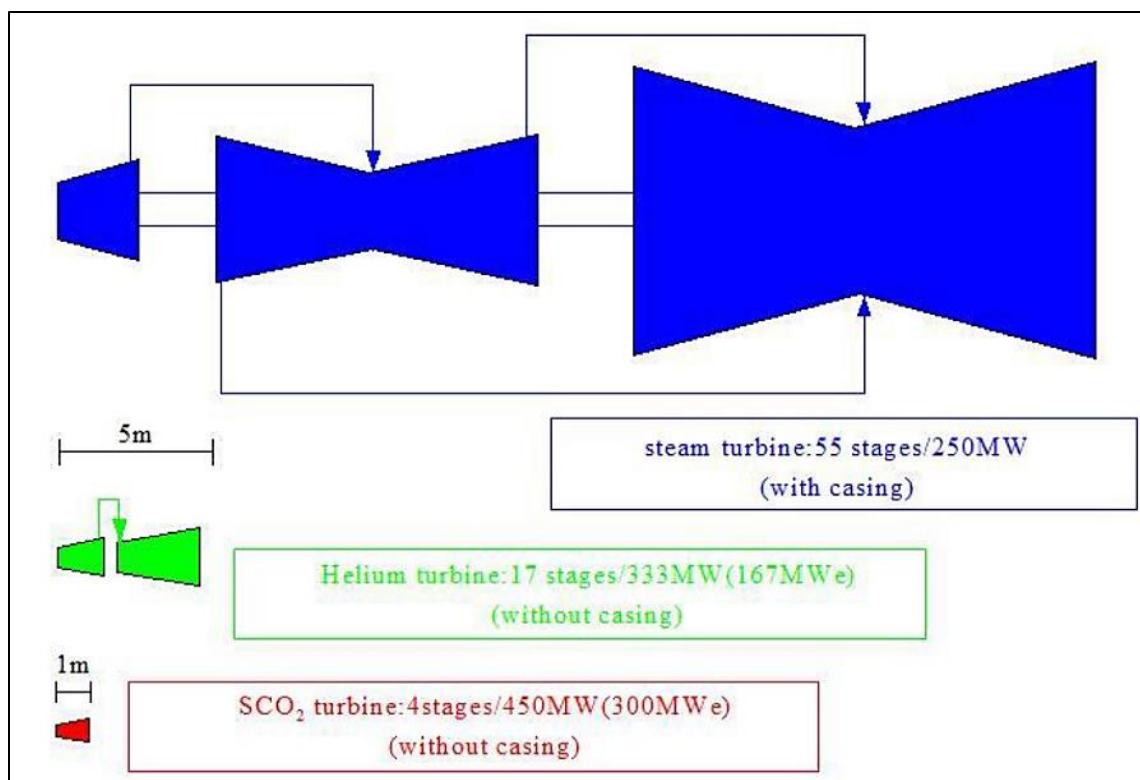


Εικόνα 52: Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ως συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας για το διοξείδιο του άνθρακα [64]



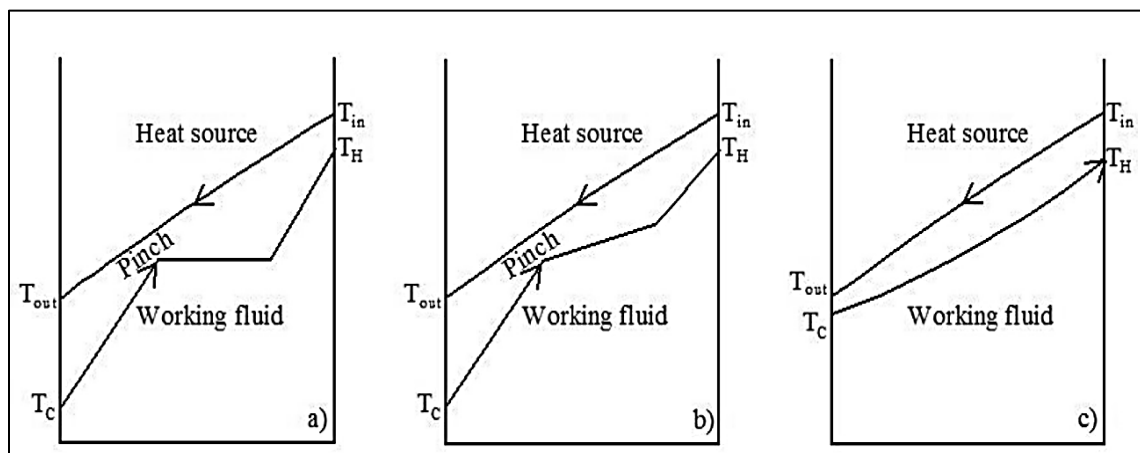
Εικόνα 53: Σύγκριση θερμοδυναμικών μεγεθών μεταξύ πραγματικού και τελείου αερίου διοξειδίου του άνθρακα σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση (πάνω αριστερά), του δυναμικού ιξώδους (πάνω δεξιά), της θερμικής αγωγιμότητας (κάτω αριστερά) και του αριθμού Prandtl (κάτω δεξιά) [64]

Όταν ένα αέριο βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση, οι ιδιότητες του δεν είναι ούτε αυτές της αέριας, ούτε αυτές της υγρής φάσης. Συγκεκριμένα, κατά τη διεργασία της εκτόνωσης, το υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα (SCO_2) έχει τις ιδιότητες ενός αερίου αλλά με την πυκνότητα ενός ρευστού. Λόγω της υψηλής πυκνότητας, η χρήση υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους του αεριοστρόβιλου της εγκατάστασης. Στην **Εικόνα 54** παρουσιάζεται η διαφορά στο μέγεθος μεταξύ στρόβιλων που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή για διάφορα εργαζόμενα μέσα. Όπως φαίνεται, ο αεριοστρόβιλος που χρειάζεται για την εκτόνωση του υπερκρίσιμου διοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ μικρότερος από τους αντίστοιχους άλλων εγκαταστάσεων [65].



Εικόνα 54: Σύγκριση μεγέθους στροβίλου για εργαζόμενο μέσο ατμό (*steam*), ήλιο (*helium*) και υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα (*SCO₂*) [65]

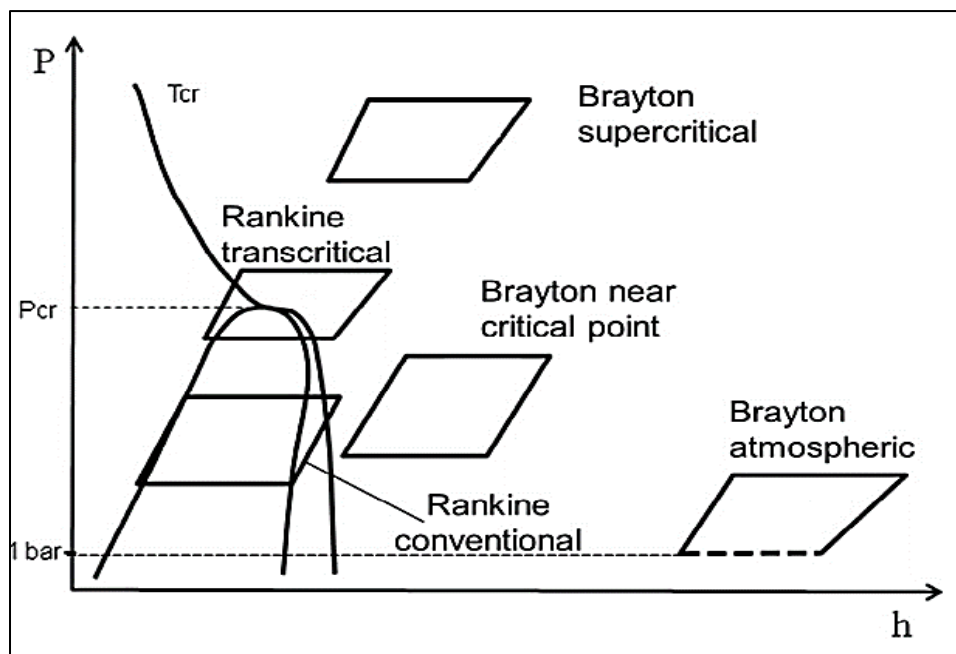
Ένα τελευταίο πλην όμως σημαντικό πλεονέκτημα της επιλογής υπερκρίσιμου ρευστού ως εργαζόμενο μέσο, είναι η δυνατότητα αποφυγής του γονάτου της καμπύλης (*pinch point*). Αυτό συμβαίνει λόγω της κλίσης της καμπύλης θερμοκρασίας κοντά στο κρίσιμο σημείο. Η περίπτωση αυτή φαίνεται στην **Εικόνα 55**. Το προφίλ της μεταβολής της θερμοκρασίας για το υπερκρίσιμο ρευστό είναι πιο κοντά στο αντίστοιχο προφίλ της πηγής θερμότητας ενός ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος [65].



Εικόνα 55: Θερμοκρασιακό προφίλ πηγής θερμότητας ως προς καθαρή ουσία (a), ζεotropικό ρευστό (b) και υπερκρίσιμο ρευστό (c) [65]

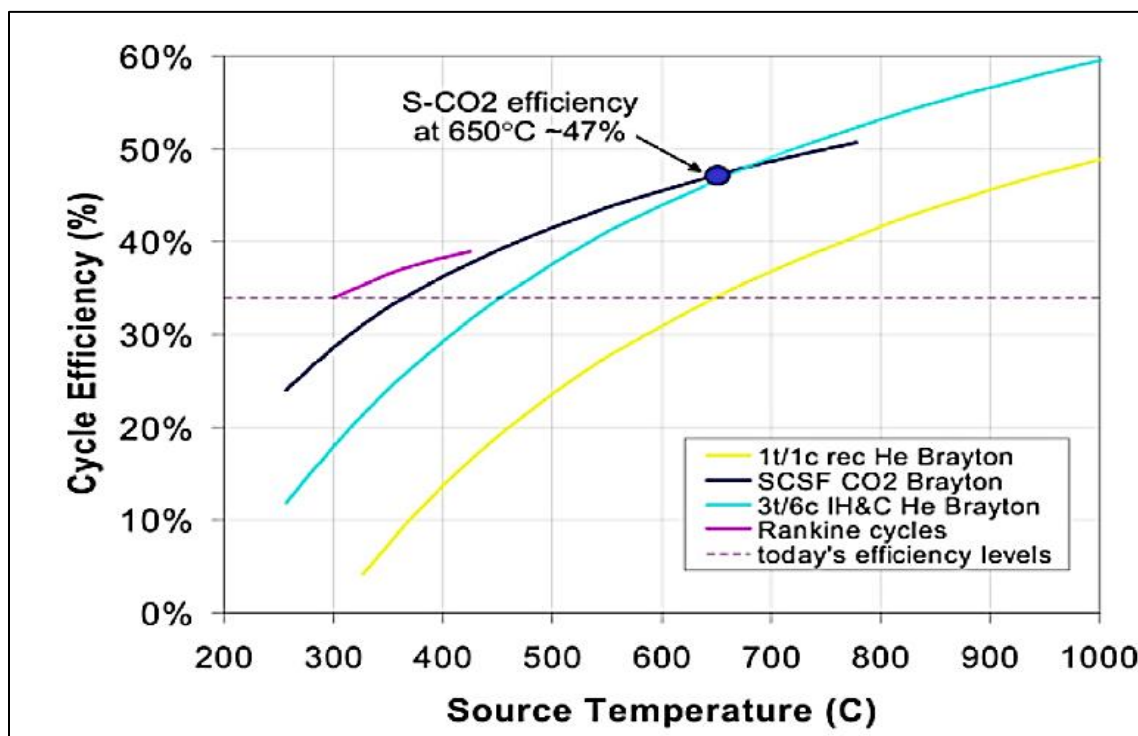
5.4.3. Θερμοδυναμικός κύκλος Brayton με διοξείδιο του άνθρακα

Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι που θα μπορούσε να γίνει χρήση του διοξειδίου του άνθρακα ως εργαζόμενο μέσο είναι πολλοί. Στην **Εικόνα 56** παρουσιάζονται πέντε πιθανοί θερμοδυναμικοί κύκλοι, τοποθετημένοι ποιοτικά στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας του διοξειδίου του άνθρακα, έτσι ώστε να φαίνονται ποιοτικά οι μεταβολές των διεργασιών. Ο απλός κύκλος Rankine (conventional Rankine) απαιτεί την συμπύκνωση του εργαζόμενου μέσου. Θεωρώντας ως απορριπτόμενη θερμοκρασία αυτή του περιβάλλοντος, ο κύκλος αυτός θα πρέπει να αποφευχθεί λόγω της αλλαγής φάσης που θα προκύψει στο διοξείδιο του άνθρακα. Το ίδιο ισχύει και για τον ενδιάμεσο κύκλο Rankine (transcritical Rankine), ο οποίος έχει ένα μέρος του στην υπερκρίσιμη (supercritical) περιοχή και το υπόλοιπο στην υποκρίσιμη (subcritical). Ο ατμοσφαιρικός κύκλος Brayton (Brayton atmospheric) είναι ένας κύκλος του οποίου η χαμηλή πίεση είναι η ατμοσφαιρική, γι' αυτό και συνήθως χρησιμοποιείται ως ανοικτός κύκλος. Για την αποφυγή της διφασικής περιοχής, ο κύκλος αυτός χρησιμοποιείται για συστήματα όπου η πηγή θερμότητας είναι πολύ υψηλής θερμοκρασίας. Ο περιορισμός αυτός καθιστά τον συνδυασμό του κύκλου αυτού με ένα γραμμικό ηλιακό συγκεντρωτικό σύστημα μη εφικτό, αλλά θα μπορούσε να είναι μια λύση για ένα σύστημα με κεντρικό δέκτη. Η επιλογή ενός κύκλου Brayton που θα λειτουργεί κοντά στο κρίσιμο σημείο (Brayton near critical point) είναι μια καλή επιλογή για γραμμικά συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, αφού η υψηλή θερμοκρασία είναι επιτεύξιμη, ενώ εκμεταλλεύονται την απόρριψη θερμότητας σε θερμοκρασία κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος για βελτιωμένη απόδοση του κύκλου. Ο υπερκρίσιμος κύκλος Brayton (Brayton supercritical) διεκπεραιώνει όλες τις διεργασίες του στην υπερκρίσιμη κατάσταση [64].



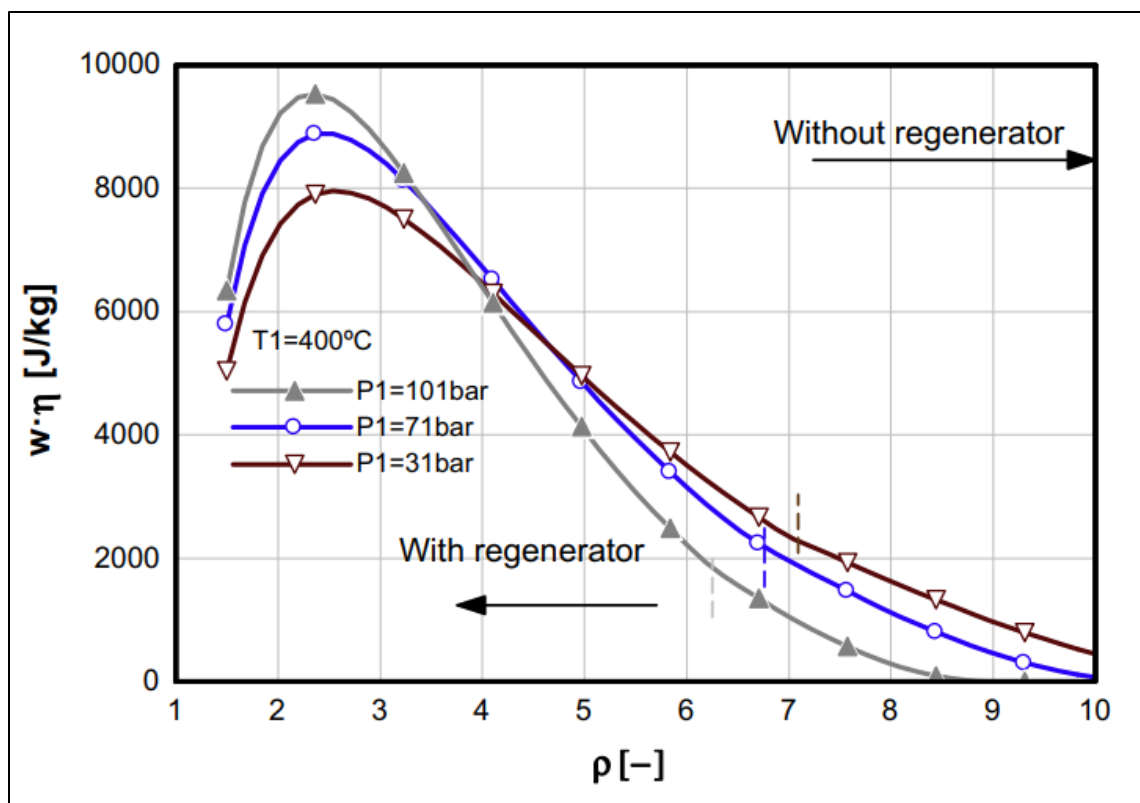
Εικόνα 56: Πιθανοί θερμοδυναμικοί κύκλοι διοξειδίου του άνθρακα σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας [64]

Το μεγάλο πλεονέκτημα του κύκλου Brayton έναντι του κύκλου Rankine είναι η συμπεριφορά του στα μεταβατικά φαινόμενα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε ένα ηλιακό συγκεντρωτικό σύστημα επηρεάζουν τόσο η νέφωση όσο και οι ώρες τις ημέρας που είναι βράδυ, αυτό αποτελεί ένα ισχυρό κριτήριο επιλογής του κύκλου Brayton, προστατεύοντας και επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής των περιστρεφόμενων μερών της εγκατάστασης. Επιπλέον, ο υπερκρίσιμος κύκλος Brayton παρουσιάζει αυξημένο βαθμό απόδοσης σε μέσες προς υψηλές θερμοκρασίες λόγω του χαμηλού καταναλισκόμενου έργου στον συμπιεστή (εφόσον ο συμπιεστής λειτουργεί κοντά στο κρίσιμο σημείο), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 57**. Επιπλέον, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 54**, η υψηλότερη πυκνότητα επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους του στροβίλου και γενικότερα του εξοπλισμού. Επιπρόσθετα, η χαμηλή θερμοκρασία απορριπτόμενης θερμότητας επιτρέπει τη χρήση του αέρα αντί του νερού ως ψυκτικό μέσο, καθιστώντας τον κύκλο πιο φιλικό προς το περιβάλλον [64][65].



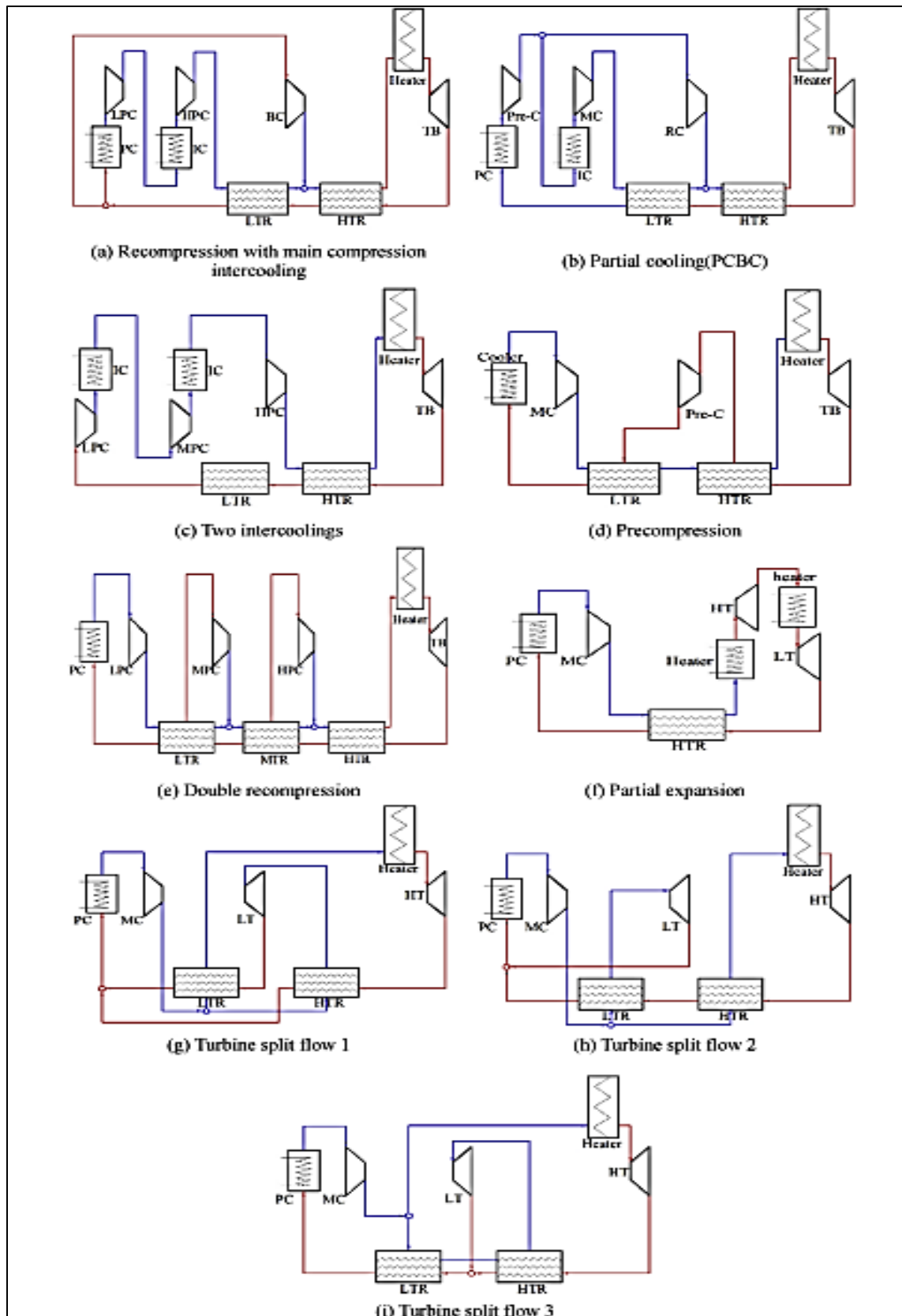
Εικόνα 57: Σύγκριση βαθμού απόδοσης υπερκρίσιμου κύκλου Brayton με άλλους θερμοδυναμικούς κύκλους για διάφορες θερμοκρασίες της πηγής πρόσδοσης θερμότητας [65]

Το πλέον σημαντικό μέγεθος σε μια εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής είναι ο βαθμός απόδοσης. Ένα μέγεθος που παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση ενός υπερκρίσιμου κύκλου Brayton είναι ο λόγος πίεσης, δηλαδή ο λόγος της μέγιστης πίεσης στην είσοδο του στροβίλου προς την ελάχιστη πίεση στην έξοδο αυτού. Στην **Εικόνα 58** παρουσιάζεται η μεταβολή του γινομένου του βαθμού απόδοσης με το ειδικό τεχνικό έργο για διάφορες πιέσεις. Όπως φαίνεται, το γινόμενο αυτό μεγιστοποιείται για λόγους πίεσης μεταξύ δύο και τρία [64].



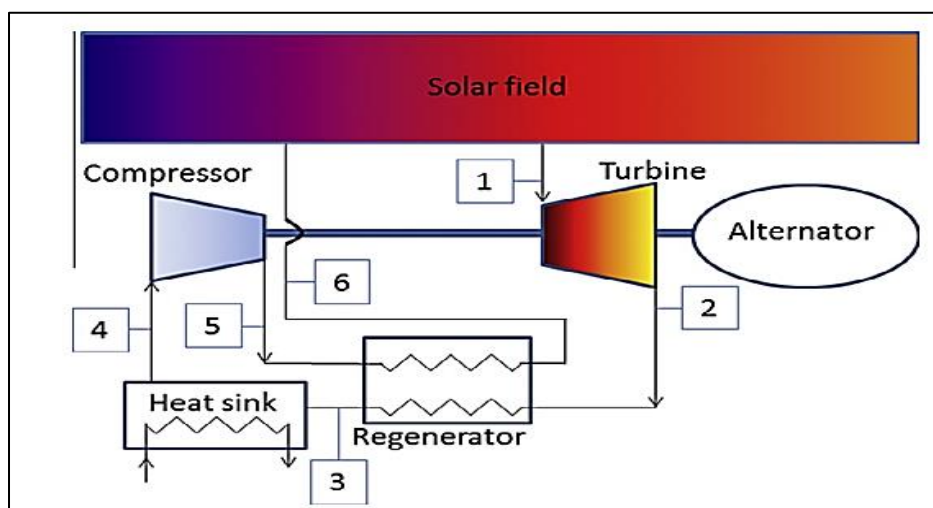
Εικόνα 58: Μεταβολή του γινομένου του βαθμού απόδοσης (η) και του ειδικού τεχνικού έργου (w) ως προς τον λόγο πίεσης (ρ) και θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο (T_1) 400°C , για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισόδου σε αυτόν (P_1) με και χωρίς τη χρήση αναγεννητή [64]

Ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο. Όμως, όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο, όσο αυξάνεται η υψηλή θερμοκρασία σε ένα ηλιακό συγκεντρωτικό σύστημα τόσο αυξάνονται και οι θερμικές απώλειες. Έτσι, αύξηση της υψηλής θερμοκρασίας δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκην βελτίωση του συνολικού βαθμού απόδοσης, παρόλο που ο θερμικός βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου θα αυξηθεί. Επομένως, αναζητούνται άλλες λύσεις για περαιτέρω βελτίωση του βαθμού απόδοσης. Στην **Εικόνα 59** παρουσιάζονται διάφορες διατάξεις υπερκρίσιμου κύκλου Brayton που αποσκοπούν στην αύξηση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με τον απλό κύκλο. Τέτοιες τροποποιήσεις αποτελούν η πολυβάθμια εκτόνωση και η πολυβάθμια συμπίεση ή η ενδιάμεση ψύξη [65].

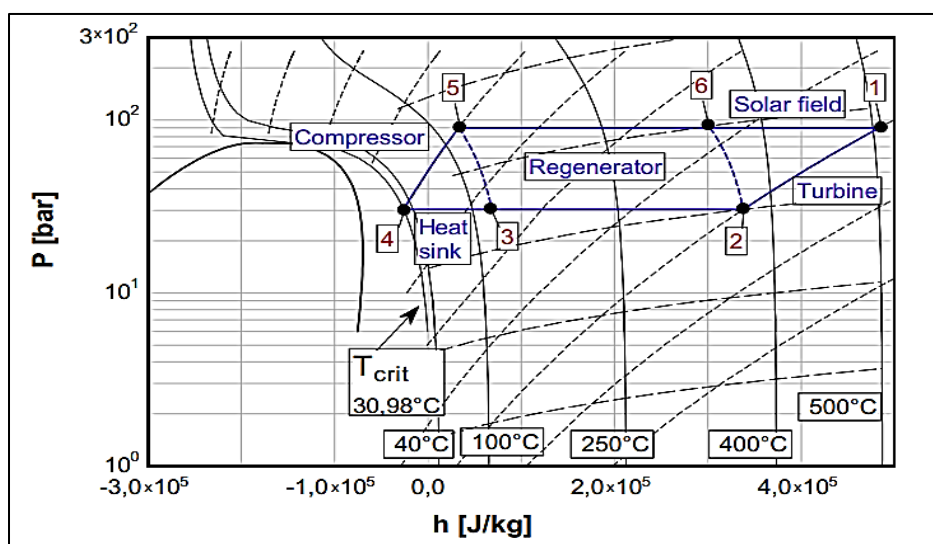


Εικόνα 59: Τροποποιημένες διατάξεις υπερκρισμού κύκλου Brayton [65]

Ο βαθμός απόδοσης μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με τη χρήση ενός αναγεννητή (regenerator ή recuperator). Στην **Εικόνα 60** παρουσιάζεται μια απλή σχηματική διάταξη υπερκρίσιμου κύκλου Brayton με αναγέννηση. Στην **Εικόνα 61** παρουσιάζεται ένας υπερκρίσιμος κύκλος Brayton που λειτουργεί κοντά στο κρίσιμο σημείο και στον οποίο φαίνεται η συνεισφορά της αναγέννησης στην διεργασία πρόσδοσης θερμότητας. Η χρήση η όχι του αναγεννητή θα πρέπει να εξετάζεται περαιτέρω σε πηγές μέσης ή χαμηλής θερμοκρασίας. Εάν η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο είναι χαμηλή, τότε η θερμοκρασία εξόδου θα είναι ακόμη χαμηλότερη. Αυτό εγκυμονεί τον κίνδυνο η θερμοκρασία αυτή να είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας εξόδου από τον συμπιεστή, το οποίο θα οδηγούσε σε αντίθετο από το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο, ο αναγεννητής θα πρέπει να παρακάμπτεται [64].

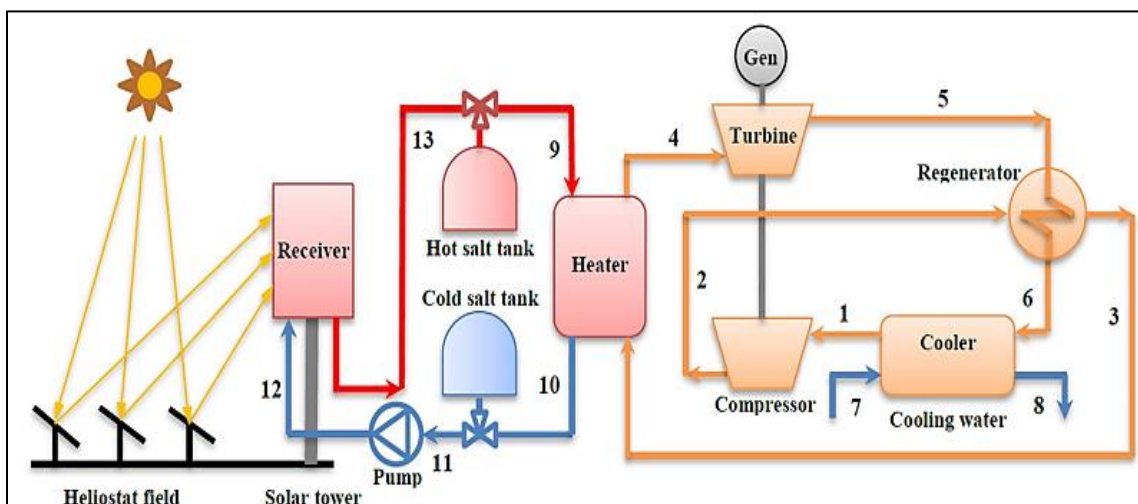


Εικόνα 60: Σχηματικό διάγραμμα υπερκρίσιμου θερμοδυναμικού κύκλου Brayton με αναγεννητή και πηγή θερμότητας ηλιακό συγκεντρωτικό σύστημα [64]

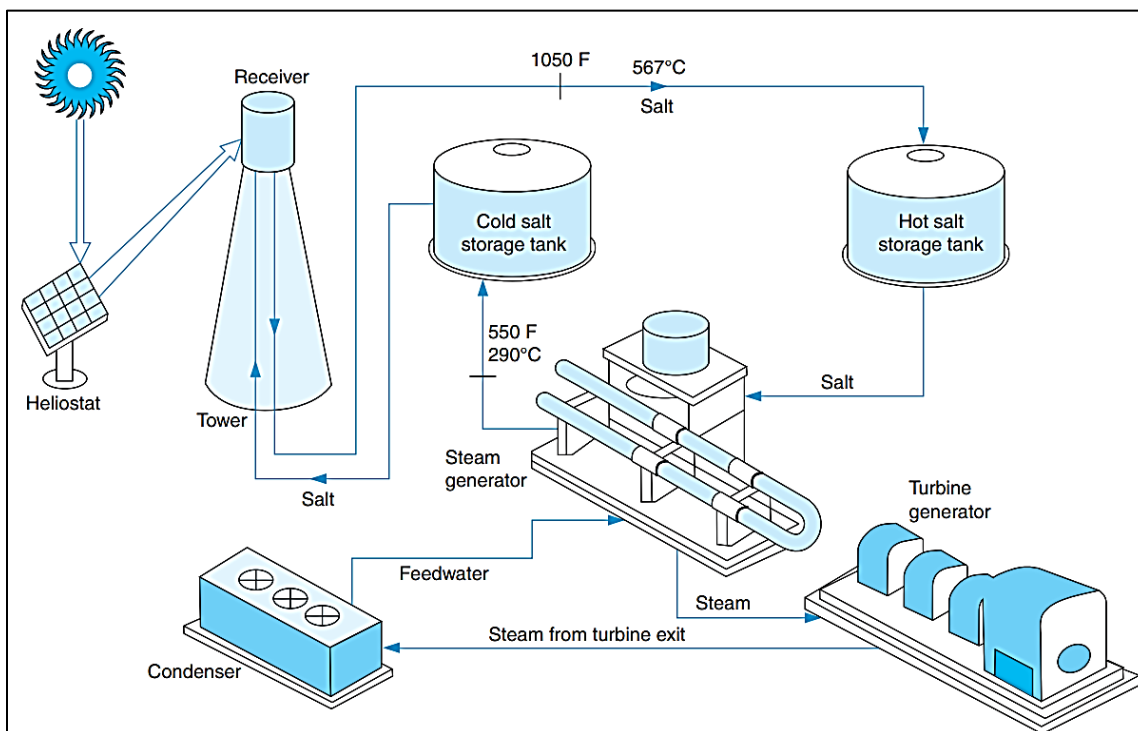


Εικόνα 61: Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας υπερκρίσιμου θερμοδυναμικού κύκλου Brayton που λειτουργεί κοντά στο κρίσιμο σημείο [64]

Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν και αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα εδάφια του παρόντος κεφαλαίου αλλά και σε προηγούμενα κεφάλαια, επιλέγεται η τελική σχηματική διάταξη του συστήματος που θα μοντελλποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στην **Εικόνα 62** παρουσιάζεται η σχηματική διάταξη της εγκατάστασης που θα μοντελλποιηθεί, ενώ στην **Εικόνα 63** παρουσιάζεται μια πιο παραστατική απεικόνιση του συστήματος [66].



Εικόνα 62: Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης ηλιακού πύργου σε συνδυασμό με υπερκρίσιμο θερμοδυναμικό κύκλο Brayton [66]



Εικόνα 63: Παραστατική απεικόνιση εγκατάστασης ηλιακού πύργου σε συνδυασμό με υπερκρίσιμο θερμοδυναμικό κύκλο Brayton [51]

6. Το λογισμικό Dymola

6.1. Μοντελοποίηση και προσομοίωση

Η μοντελοποίηση είναι ένα βασικό εργαλείο στην εξέταση και την αξιολόγηση ενός συστήματος, το οποίο μπορεί να είναι πραγματικό ή μη πραγματικό. Ως σύστημα ορίζεται το προς μελέτη αντικείμενο και όλες οι ιδιότητες και οι παράμετροι που το αφορούν. Αντίστοιχα, ορίζεται ως περιβάλλον του συστήματος οτιδήποτε εκτός του αυτού. Σε πολλές εφαρμογές υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος, ενώ άλλες φορές το σύστημα θεωρείται ως απομονωμένο. Ένα σύστημα μπορεί να είναι συνδυασμός φυσικών μοντέλων (neutral models), όπως για παράδειγμα οι καιρικές συνθήκες, αλλά και τεχνητών μοντέλων (artificial models), όπως για παράδειγμα ένας ηλιακός συλλέκτης. Η μοντελοποίηση ενός συστήματος εξαρτάται από την εκάστοτε μελέτη. Για παράδειγμα, κατά τη μοντελοποίηση ενός συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος, η μοντελοποίηση του συλλέκτη θα είναι διαφορετική εάν ο σκοπός είναι η μελέτη της γεωμετρίας του αλλά ενδεχομένως διαφορετική εάν ο σκοπός είναι να χρησιμοποιηθεί ως μέλος ενός ευρύτερου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής [67].

Η προσομοίωση είναι η αναπαράσταση λειτουργίας ενός συστήματος. Ουσιαστικά, είναι η αντίστοιχη διαδικασία ενός πειράματος αλλά για ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο δεν υπάρχει κατ' ανάγκη στην πραγματικότητα. Η διαδικασία αυτή απαλλάσσει τις μελέτες από τα προβλήματα και τα μειονεκτήματα ενός πραγματικού πειράματος. Ένα πείραμα μπορεί να είναι πολύ επικίνδυνο, πολύ ακριβό ή ακόμα και αδύνατο να πραγματοποιηθεί, όπως για παράδειγμα στην προσπάθεια ανάπτυξης ενός νέου αντικειμένου το οποίο δεν προϋπάρχει έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποια πειραματική διαδικασία [67].

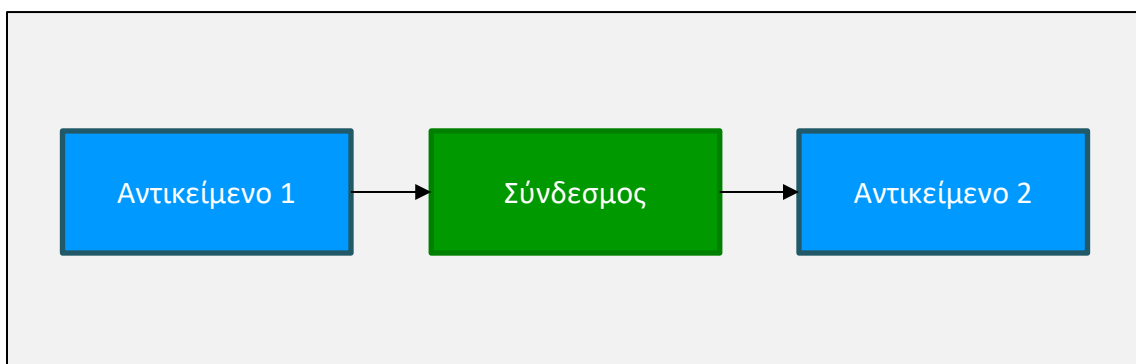
Κάθε προσομοίωση ενός μοντέλου αποσκοπεί στη μελέτη συγκεκριμένων παραμέτρων του συστήματος για συγκεκριμένο σκοπό. Η αξιοπιστία και η ρεαλιστικότητα μιας προσομοίωσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη μοντελοποίηση. Μια καλή μεθοδολογία ελέγχου της προσομοίωσης είναι η ανάλυση ευαισθησίας. Εάν τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές σε μικρές αλλαγές των παραμέτρων της μοντελοποίησης, τότε αυτό είναι μια καλή ένδειξη σωστής μοντελοποίησης. Φυσικά, η καλύτερη μέθοδος αξιολόγησης ενός μοντέλου είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αυτού με πειραματικά δεδομένα [67].

6.2. Αντικειμενοστραφής μοντελοποίηση

Η αντικειμενοστραφής μοντελοποίηση (object-oriented modelling) είναι μια φιλοσοφία μοντελοποίησης η οποία στηρίζεται στη δημιουργία αντικειμένων και στη συνέχεια στον ορισμό του τρόπου σύνδεσης μεταξύ τους. Αυτός ο τρόπος μοντελοποίησης παρουσιάζει δύο βασικά πλεονεκτήματα, τα οποία τον καθιστούν ως ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο

κατά την εξέταση συστημάτων. Πρώτον, δίνει τη δυνατότητα διαμοιρασμού της διαδικασίας μοντελοποίησης. Το κάθε επιμέρους αντικείμενο ενός συστήματος μπορεί να αναπτυχθεί ανεξάρτητα από το άλλο, γεγονός που επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάπτυξη αντικειμένων από διαφορετικές ομάδες εργασίας. Επιπλέον, τα μοντέλα που αναπτύσσονται μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν ξανά, είτε ως έχουν, είτε τροποποιώντας τα ανάλογα με τις επιθυμητές του εναλλακτικές λειτουργίες, χωρίς όμως να χρειάζεται να αναπτυχθεί ένα ίδιο μοντέλο κάθε φορά από το μηδέν [68].

Το λογισμικό Dymola (Dynamic Modelling Laboratory) στηρίζεται σε αυτή τη φιλοσοφία μοντελοποίησης. Αρχικά, αφού οριστεί το σύστημα, υποδιαιρείται σε αντικείμενα (objects). Το κάθε αντικείμενο μοντελοποιείται με βάση τις ατομικές του ιδιότητες στηριζόμενο σε εξισώσεις όπως οι αρχές διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας. Έπειτα, καθορίζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των αντικειμένων αυτών, η οποία αφορά τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούν και τις πληροφορίες ή τα δεδομένα τα οποία συναλλάσσονται. Στο **Σχήμα 8** παρουσιάζεται σε σχηματική απεικόνιση η βάση της αντικειμενοστραφούς φιλοσοφίας μοντελοποίησης [68].



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση αντικειμενοστραφούς μοντελοποίησης (object-oriented modelling)

6.3. Μοντελοποίηση βάσει εξισώσεων

Μερικές γλώσσες προγραμματισμού στηρίζονται στη διατύπωση και επίλυση συστημάτων εξισώσεων, είτε αλγεβρικών είτε διαφορικών. Σε αυτές τις γλώσσες, αφού δηλωθούν οι απαραίτητες σταθερές και παραμέτροι, δηλώνεται το σύστημα εξισώσεων που επιλύει το συγκεκριμένο μοντέλο. Όταν εισάγεται μία εξίσωση, στην ουσία εισάγεται μία συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων του προβλήματος. Όμως, δεν είναι απαραίτητος ο καθορισμός για το ποια μεταβλητή θα υπολογιστεί από την εξίσωση. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό με τη χρήση ενός παραδείγματος. Η **Εξίσωση (48)** περιγράφει τη μεταφορά θερμότητα μέσω συναγωγής σύμφωνα με τον νόμο του Newton. Στο **Σχήμα 9** παρουσιάζονται εναλλακτικές γραφές της ίδιας εξίσωσης. Σε μια γλώσσα προγραμματισμού που στηρίζεται σε εξισώσεις, όλες αυτές οι μορφές της εξίσωσης είναι ισοδύναμες και καμία δεν καθορίζει την μεταβλητή που θα υπολογιστεί. Για παράδειγμα, μπορεί και με τις δύο μορφές της εξίσωσης να υπολογιστεί η ροή θερμότητας. Η υπολογιζόμενη

μεταβλητή θα υπολογιστεί με βάση το ποιες μεταβλητές είναι παράμετροι του προβλήματος και ποιες επιθυμεί ο χρήστης να υπολογίσει [68].

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (48)$$

όπου:

Q = ροή θερμότητας [W]

h = συντελεστής συναγωγής θερμότητας [W/m²/K]

T_s = θερμοκρασία σώματος [K]

T_∞ = θερμοκρασία περιβάλλοντος [K]

$$h = \frac{Q}{A \cdot (T_s - T_\infty)}$$

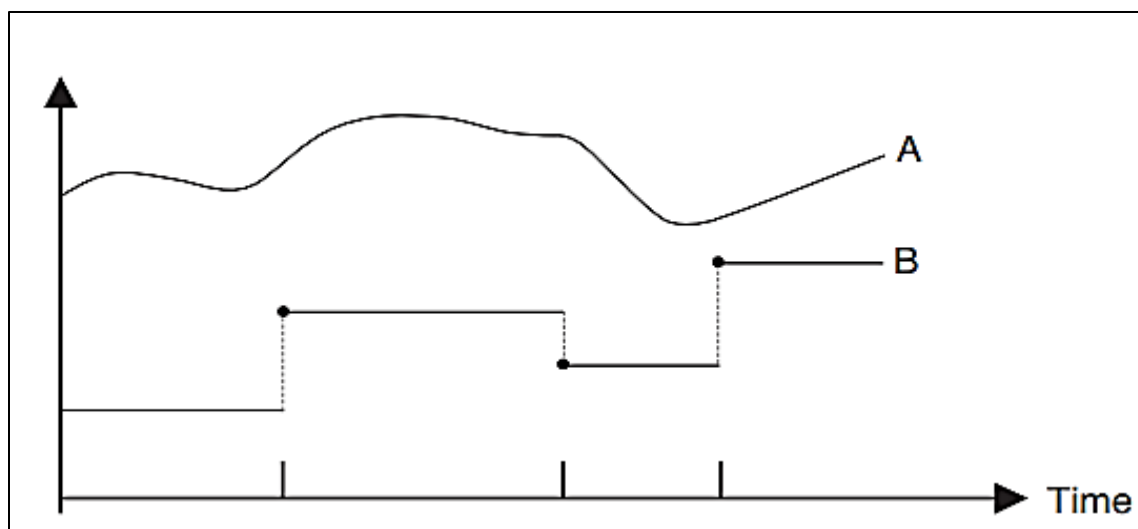
$$T_s = T_\infty + \frac{Q}{h \cdot A}$$

Σχήμα 9: Ισοδύναμες μορφές εξίσωσης για μοντελοποίηση βασισμένη σε εξισώσεις

Η γλώσσα προγραμματισμού Modelica είναι μια γλώσσα που στηρίζεται σε εξισώσεις. Το λογισμικό Dymola στηρίζεται στη γλώσσα Modelica. Το βασικό πλεονέκτημα μιας τέτοιας γλώσσας έγκειται στο ότι δεν είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της σειράς επίλυσης ενός συστήματος εξισώσεων, δίνοντας ευελιξία κατά τη μοντελοποίηση. Η φιλοσοφία αυτή θα γίνει πλήρως κατανοητή με παραδείγματα στη συνέχεια, αφού όμως πρώτα οριστούν βασικά χαρακτηριστικά της γλώσσας Modelica και των αντικειμένων στο λογισμικό Dymola [67][68].

6.4. Μοντελοποίηση συνεχούς και διακριτού χρόνου

Τα μοντέλα που αναπτύσσονται διαχωρίζονται με βάση την εξάρτηση ή μη εξάρτηση τους από τον χρόνο. Τα δυναμικά μοντέλα (dynamic models) λαμβάνουν υπόψη χρονικές μεταβολές, σε αντίθεση με τα στατικά μοντέλα (static models) τα οποία δεν το κάνουν. Η γλώσσα Modelica δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης και των δύο, με σαφές το γεγονός ότι η δυνατότητα μοντελοποίησης δυναμικών προβλημάτων είναι πολύ πιο σημαντική και ουσιώδης. Επιπλέον, τα δυναμικά προβλήματα εμφανίζουν δύο ειδών χρονικά μεταβαλλόμενων παραμέτρων. Αρχικά, υπάρχουν οι μεταβλητές συνεχούς χρόνου (continuous time variables) οι οποίες παρουσιάζουν μια συνεχούς μορφής μεταβολή της παραμέτρου ως προς το χρόνο. Δεύτερον, υπάρχουν οι μεταβλητές διακριτού χρόνου (discrete time variables) οι οποίες, παρόλο που είναι και αυτές χρονικά μεταβαλλόμενες, εντούτοις οι μεταβολές τους παρουσιάζονται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Στο **Σχήμα 10** παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών ειδών χρονικών παραμέτρων. Ο συνδυασμός τέτοιων παραμέτρων σε μοντελοποίηση προβλημάτων ονομάζεται υβριδική μοντελοποίηση (hybrid modelling) [67][68].



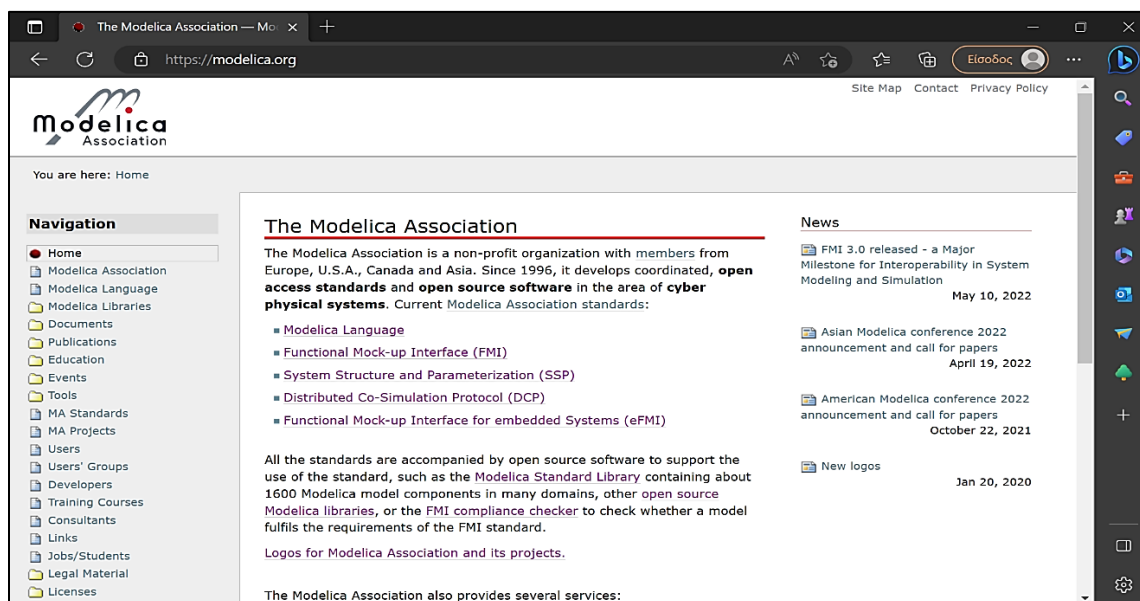
Σχήμα 10: Σύγκριση μεταβλητών συνεχούς (A) και διακριτού (B) χρόνου [67]

Η διαδικασία της προσομοίωσης στο λογισμικό Dymola στηρίζεται στη διάκριση των χρονικών μεταβλητών. Η επίλυση ξεκινά με τις εξισώσεις που περιλαμβάνουν μεταβλητές συνεχούς χρόνου. Εάν οι εξισώσεις αυτές είναι διαφορετικής μορφής, τότε επιλύονται με αριθμητική ολοκλήρωση. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου ενεργοποιηθεί κάποια μεταβλητή διακριτού χρόνου. Η ενεργοποίηση συμβαίνει σε καθορισμένα γεγονότα (events). Τα γεγονότα αυτά μπορεί να είναι καθαρά χρονικά, δηλαδή να εξαρτώνται μόνο από την πάροδο του χρόνου προσομοίωσης, ή να εξαρτώνται από την τιμή που θα λάβει κάποια άλλη μεταβλητή κατά τη διαδικασία επίλυσης. Μόλις συμβεί ένα γεγονός, η διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων συνεχούς χρόνου σταματά με σκοπό τον εντοπισμό του ακριβούς χρόνου που ενεργοποιήθηκε αυτό (trigger time). Τότε, το λογισμικό εστιάζει στην επίλυση των εξισώσεων αμέσως πριν και αμέσως μετά του γεγονότος, διαδικασία η οποία ονομάζεται πρόβλημα επανέναρξης (restart problem). Όταν αυτό ολοκληρωθεί, συνεχίζει με την επίλυση των εξισώσεων συνεχούς χρόνου μέχρι να ενεργοποιηθεί κάποιο άλλο γεγονός. Σε περίπτωση που δύο ή περισσότερα γεγονότα ενεργοποιηθούν ταυτόχρονα, τότε το λογισμικό τα διαχειρίζεται ταυτόχρονα. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με το πέρας του επιλεγόμενου από τον χρήστη χρόνου προσομοίωσης, δεδομένου ότι δεν προκύπτουν οποιαδήποτε άλλα σφάλματα όπως για παράδειγμα κάποια διαίρεση με το μηδέν. Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις που είναι επιθυμητός ο τερματισμός της προσομοίωσης πριν το πέρας της επιλεγμένης χρονικής διάρκειας [68].

6.5. Διαδικτυακή κοινότητα (Modelica Association)

Ο ιστότοπος «Modelica Association» παρέχει τη δυνατότητα πρόσβασης σε πληροφορίες που αφορούν τη γλώσσα προγραμματισμού Modelica. Στην **Εικόνα 64** παρουσιάζεται η αρχική σελίδα αυτού του ιστότοπου. Όλη η διεθνής βιβλιογραφία που αφορά τη γλώσσα είναι ομαδοποιημένη σε αυτόν τον ιστότοπο, με μερικά από τα βιβλία αυτά να είναι ελεύθερης πρόσβασης (open source). Εκεί, υπάρχουν βιβλία τα οποία εστιάζουν στη θεωρητική εκμάθηση της γλώσσας καθώς επίσης και στην επεξήγηση της φιλοσοφίας του

προγραμματισμού βάσει εξισώσεων. Ένα τέτοιο βιβλίο είναι το «Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica (2011, Peter Fritzson)», το οποίο εισάγει τις βασικές έννοιες της Modelica. Πιο αναλυτική και σε βάθος επεξήγηση γίνεται στο βιβλίο «Principles of Object Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach (2014, Peter Fritzson)». Μαζί με αυτό το βιβλίο υπάρχει και η δυνατότητα πρακτικής εξάσκησης μέσω του «DrModelica», ένα εγχειρίδιο ανοικτού κώδικα με εφαρμογές για εκμάθηση και εξάσκηση. Επιπλέον, υπάρχουν βιβλία τα οποία επεξηγούν τη Modelica στηριζόμενα σε πρακτικά παραδείγματα που αφορούν κυρίως ηλεκτρικά και μηχανολογικά συστήματα. Τέτοια βιβλία είναι το «Modelling and Simulation in Engineering Using Modelica (Alfonso Urquia Moraleda et. al, 2018)» και το «Simulation Practice with Modelica (Alfonso Urquia Moraleda et. al, 2018)». Επιπλέον, στον ιστότοπο αυτό υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης σε έτοιμες βιβλιοθήκες με μοντέλα τα οποία έχουν δημιουργήσει άλλοι χρήστες [69].

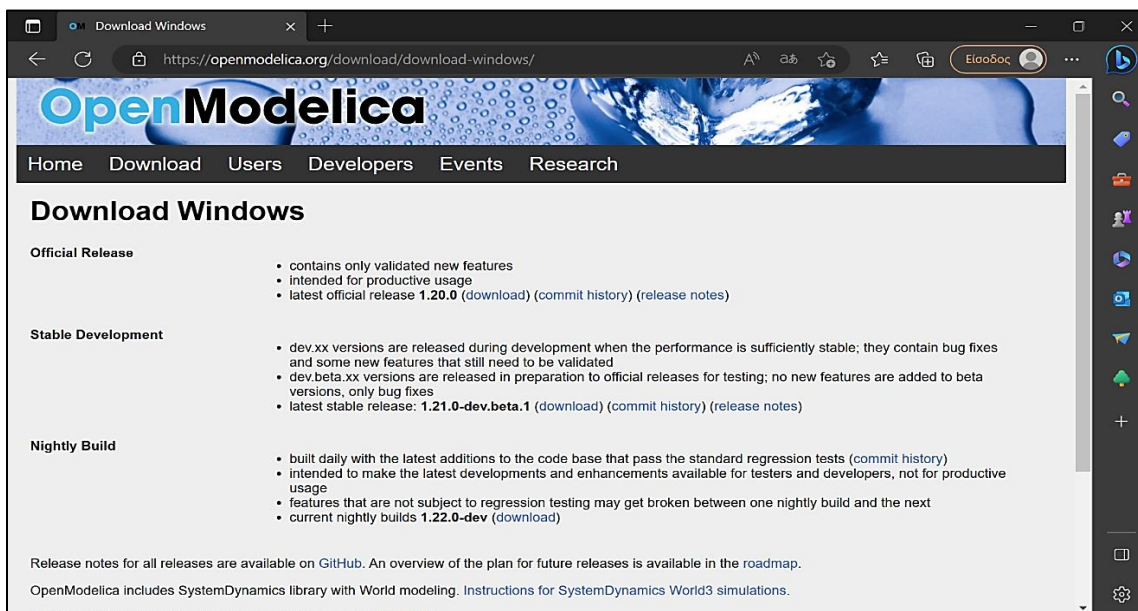


Εικόνα 64: Ιστότοπος «Modelica Association» [69]

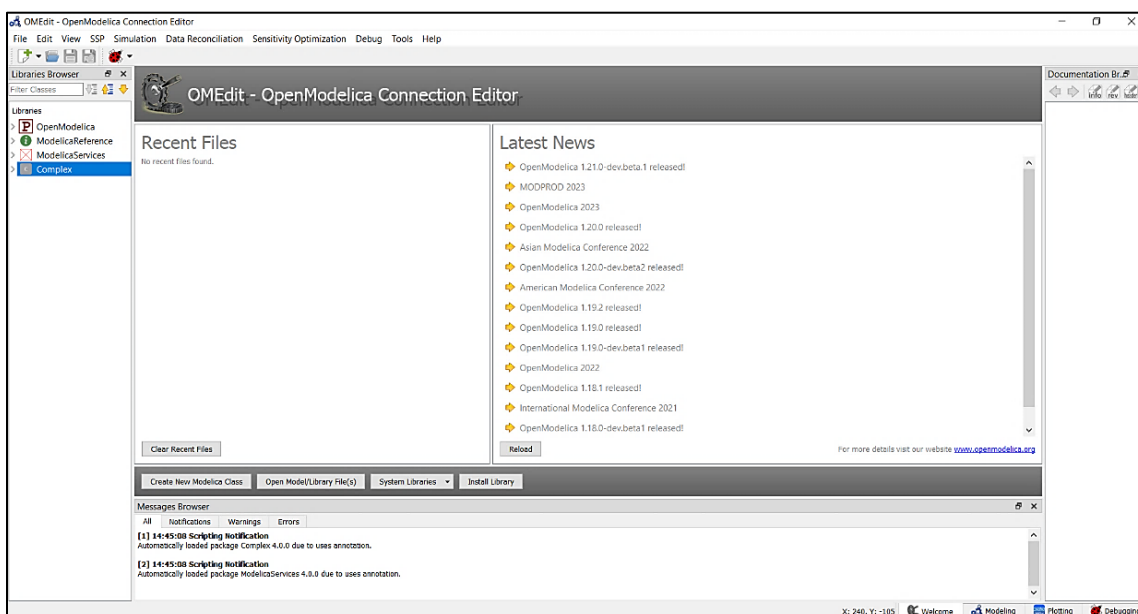
6.6. Το περιβάλλον OpenModelica

Εκτός από το λογισμικό Dymola, έχει αναπτυχθεί και ένα άλλο λογισμικό το οποίο ονομάζεται OpenModelica και είναι ελεύθερης πρόσβασης. Η εγκατάσταση του γίνεται ακολουθώντας τις οδηγίες του αντίστοιχου ιστότοπου, το περιβάλλον του οποίου φαίνεται στην **Εικόνα 65**. Το λογισμικό αυτό παρουσιάζει μερικές διαφορές σε σχέση με το Dymola ως προς το περιβάλλον προσομοίωσης αλλά στηρίζεται και αυτό στη Modelica. Στο λογισμικό αυτό επιτρέπεται η χρήση έτοιμων αντικειμένων από ανοικτές βιβλιοθήκες, ακριβώς όπως και στο λογισμικό Dymola. Η μοντελοποίηση γίνεται με την εφαρμογή OpenModelica Connection Editor (OMEdit). Στην **Εικόνα 66** παρουσιάζεται το περιβάλλον του OpenModelica. Αρχικά, η εφαρμογή βρίσκεται στην καρτέλα 'Welcome'. Η μετακίνηση μεταξύ των καρτελών γίνεται από τις αντίστοιχες επιλογές στο κάτω δεξιό μέρος

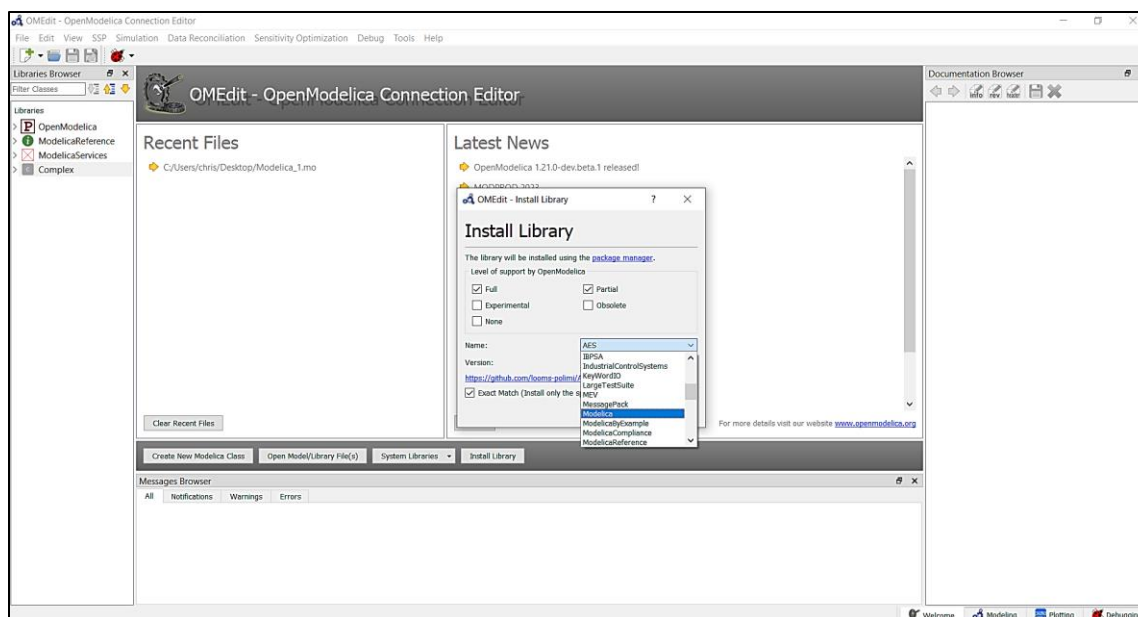
του παραθύρου. Σε αυτή την καρτέλα δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας νέου μοντέλου και φόρτωσης βιβλιοθηκών. Η λήψη μιας βιβλιοθήκης γίνεται με χρήση του 'Install Library'. Η πλέον βασική βιβλιοθήκη είναι η «Modelica Standard Library». Στην **Εικόνα 67** παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται εγκατάσταση αυτής της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης. Με χρήση του 'System Libraries' οι επιθυμητές βιβλιοθήκες φορτώνονται στο περιβάλλον του λογισμικού. Στην **Εικόνα 68** παρουσιάζεται ο τρόπος φόρτωσης της βιβλιοθήκης στο παράθυρο εργασίας. Με το που φορτωθεί η βιβλιοθήκη, εμφανίζεται στο τμήμα με τις βιβλιοθήκες (Libraries Browser) στα αριστερά του παραθύρου [70][71].



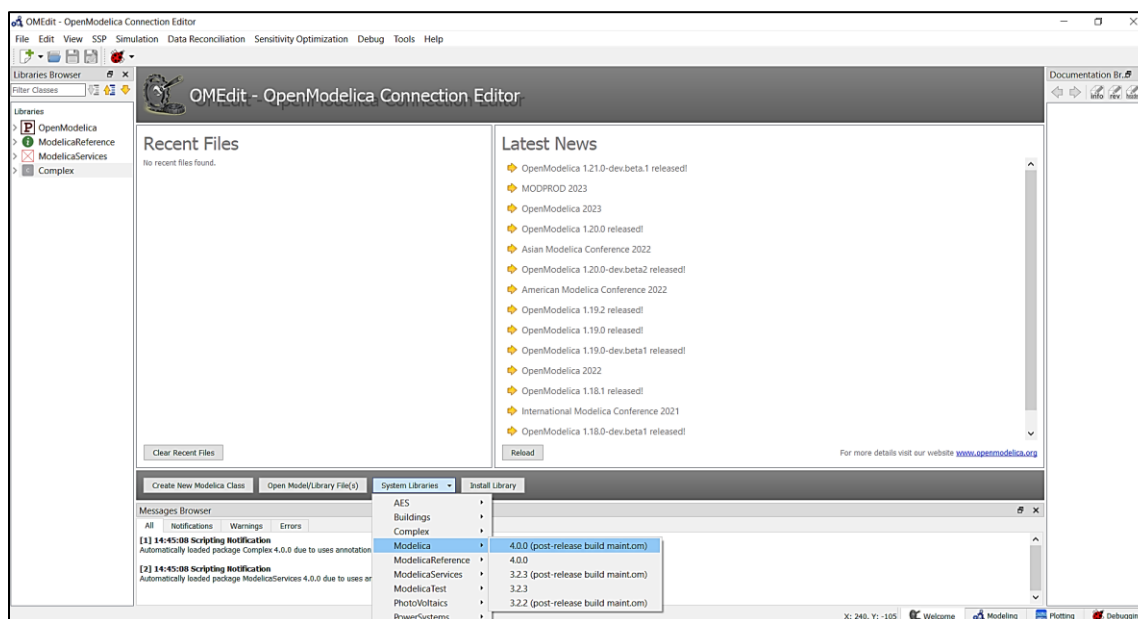
Εικόνα 65: Ιστότοπος για λήψη του λογισμικού OpenModelica [70]



Εικόνα 66: Το περιβάλλον του λογισμικού OpenModelica (OMEdit) [71]



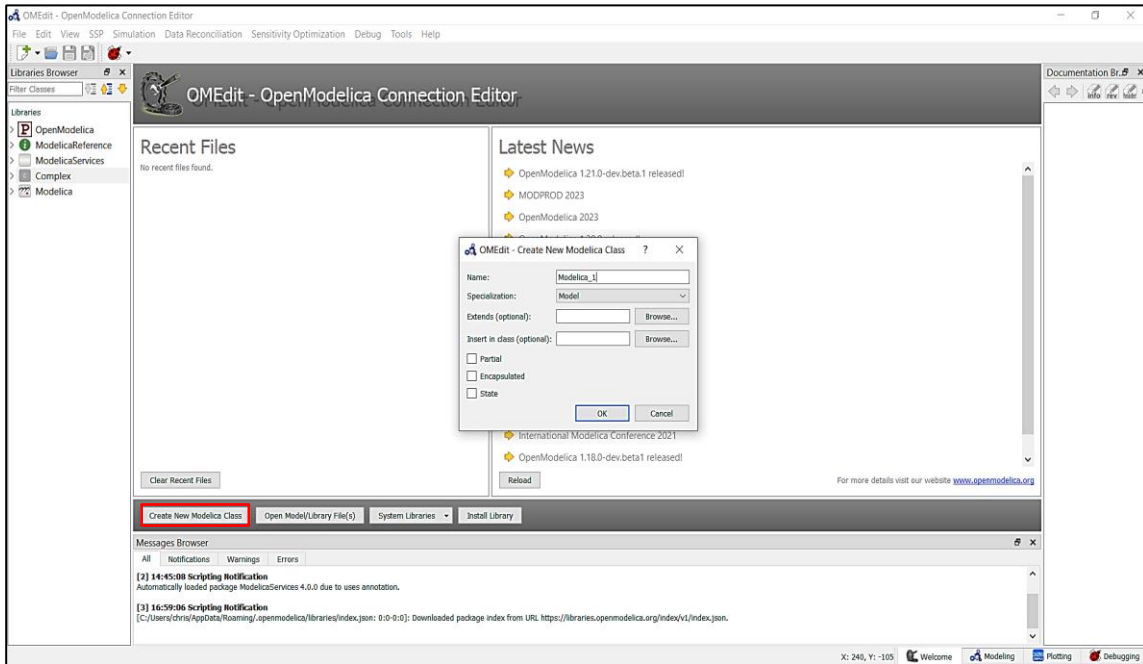
Εικόνα 67: Λήψη και εγκατάσταση της βιβλιοθήκης «Modelica Standard Library» στο λογισμικό OpenModelica [71]



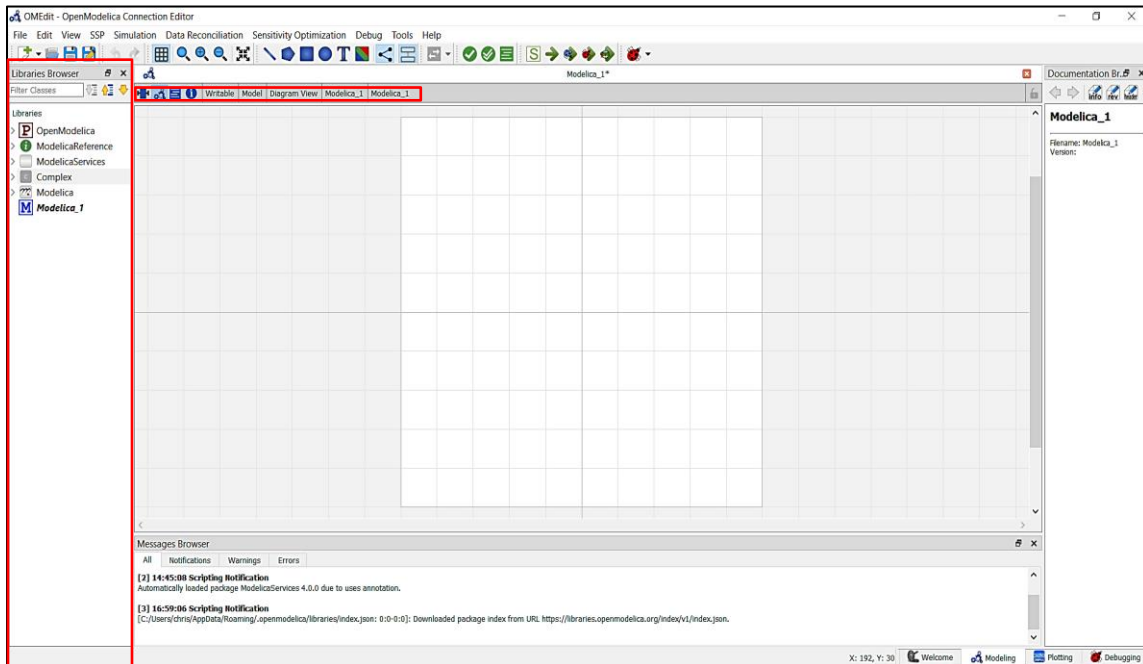
Εικόνα 68: Φόρτωση της βιβλιοθήκης «Modelica Standard Library» στο λογισμικό OpenModelica [71]

Για τη δημιουργία ενός νέου μοντέλου, επιλέγεται η εντολή ‘Create New Modelica Class’ της καρτέλας ‘Welcome’. Στην **Εικόνα 69** παρουσιάζεται ο τρόπος δημιουργίας ενός νέου μοντέλου. Αφού οριστεί το όνομα του καινούριου μοντέλου, τότε γίνεται χρήση του ‘OK’. Με το που δημιουργηθεί το μοντέλο, αυτό εμφανίζεται αυτόματα στο δέντρο της περιοχής βιβλιοθηκών στα αριστερά του παραθύρου. Αμέσως, το λογισμικό μεταβαίνει στην προβολή διαγράμματος (Diagram view) της καρτέλας ‘Modeling’. Στην **Εικόνα 70**

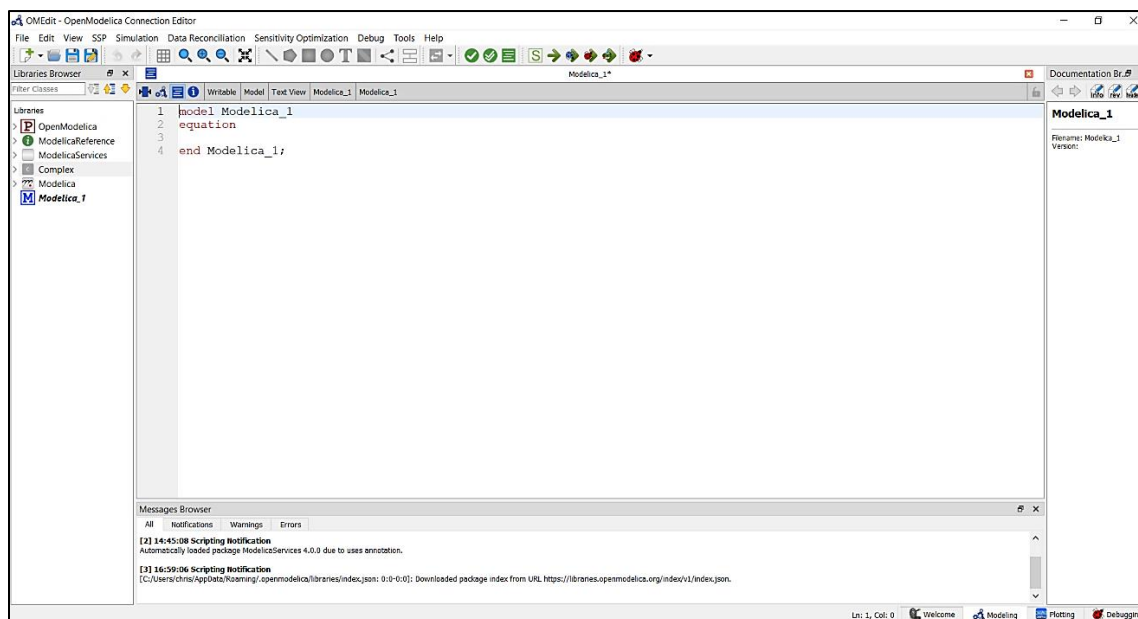
παρουσιάζεται το παράθυρο ‘Diagram view’ του μοντέλου, το οποίο είναι κενό. Επιλέγοντας την εντολή προβολής κειμένου (Text view), το λογισμικό μεταβαίνει στο τμήμα του όπου εισάγεται ο κώδικας σε γλώσσα Modelica. Η εντολή βρίσκεται στη γραμμή εργαλείων ακριβώς πάνω από το κενό διάγραμμα. Στην **Εικόνα 71** παρουσιάζεται η καρτέλα προβολής κειμένου του λογισμικού [71].



Εικόνα 69: Δημιουργία νέου μοντέλου (new model) στο λογισμικό OpenModelica [71]

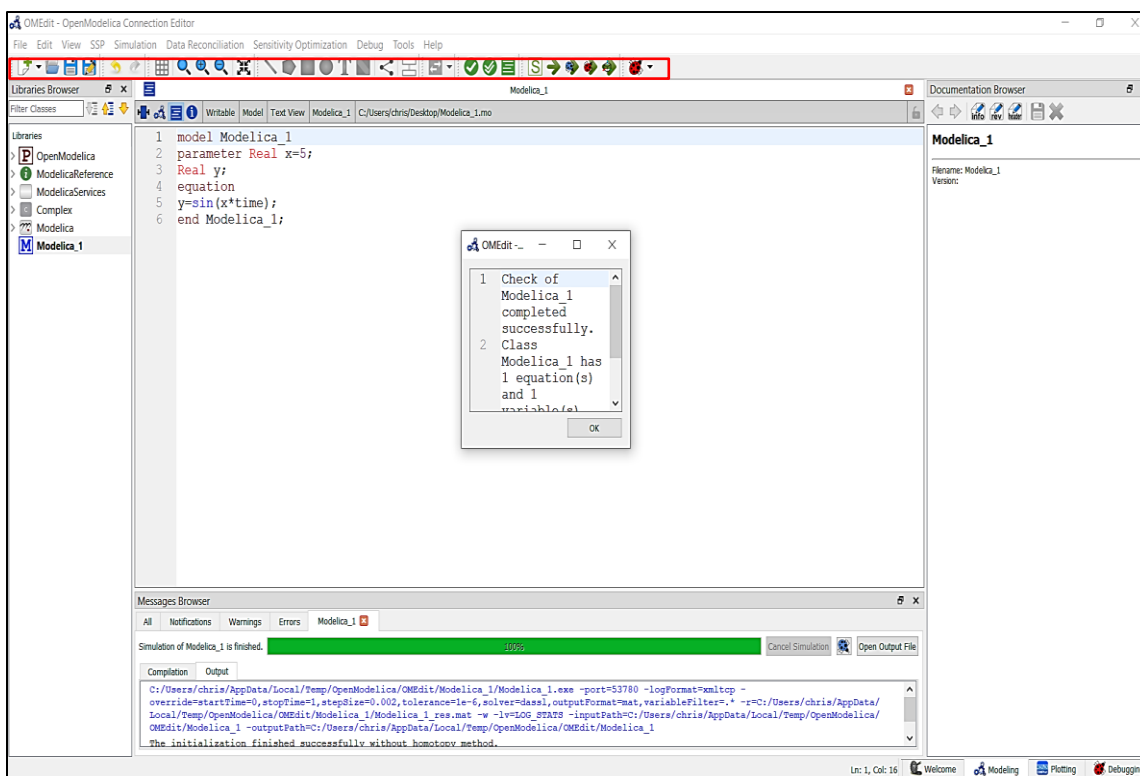


Εικόνα 70: Προβολή διαγράμματος (Diagram view) του λογισμικού OpenModelica [71]

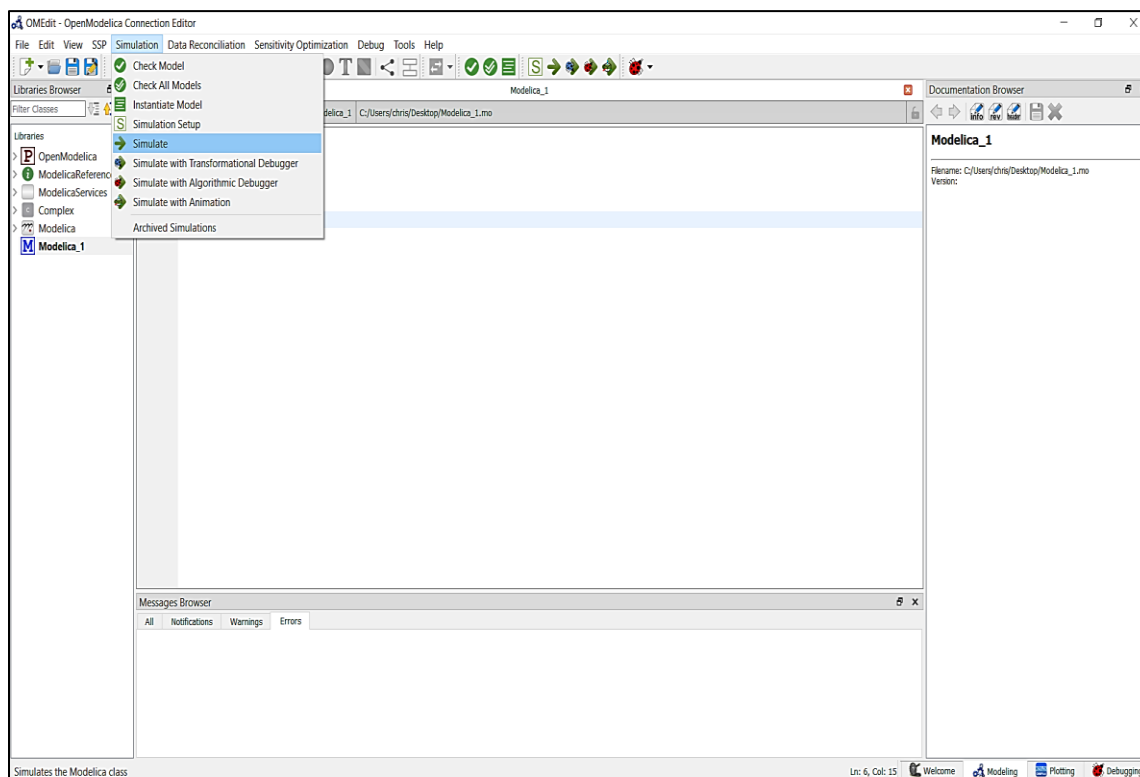


Εικόνα 71: Προβολή κειμένου (Text view) του λογισμικού OpenModelica [71]

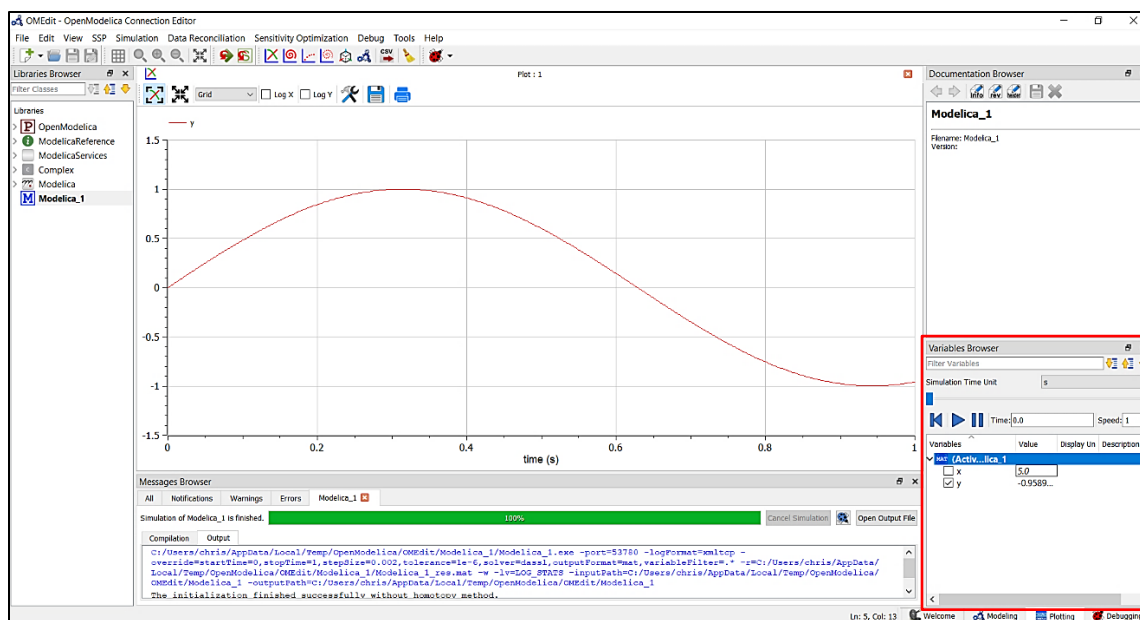
Αφού γραφεί ο κώδικας που μοντελοποιεί το υπό εξέταση πρόβλημα σε Modelica, επιλέγοντας το *'Check Model'* (V μέσα σε πράσινο κύκλο) της γραμμής εργαλείων το λογισμικό κάνει έλεγχο στον κώδικα εάν παραβιάζει βασικές αρχές της γλώσσας Modelica. Στην **Εικόνα 72** παρουσιάζεται ο επιτυχής έλεγχος (successful check) σε έναν απλό κώδικα. Στη συνέχεια, επιλέγεται η εντολή *'Simulate'* από την καρτέλα *'Menu'* στο πάνω μέρος του παραθύρου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 73**. Είναι σημαντικό το αρχείο του μοντέλου να βρίσκεται σε κάποια διαδρομή θέσης (path) στον υπολογιστή η οποία αποτελείται μόνο από λατινικούς χαρακτήρες. Σε αντίθετη περίπτωση, το λογισμικό δεν θα μπορεί να εκτελέσει την προσομοίωση. Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, το λογισμικό οδηγείται στην καρτέλα *'Plotting'*. Στην **Εικόνα 74** παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή μιας μεταβλητής του προβλήματος, αφού η προσομοίωση έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία. Η επιθυμητή μεταβλητή επιλέγεται από το παράθυρο *'Variables Browser'* στο κάτω δεξιά τμήμα του παραθύρου. Η προσομοίωση ως προεπιλογή γίνεται μόνο για διάρκεια ενός δευτερολέπτου. Η επιλογή αυτή μπορεί να αλλάξει με την εντολή *'Simulation Setup'*, η οποία βρίσκεται ακριβώς πάνω από την εντολή *'Simulate'* και φαίνεται στην **Εικόνα 73** [71].



Εικόνα 72: Επιτυχής έλεγχος μοντέλου (Check Model) στο λογισμικό OpenModelica [71]



Εικόνα 73: Εντολή προσομοίωσης (Simulate) στο λογισμικό OpenModelica [71]

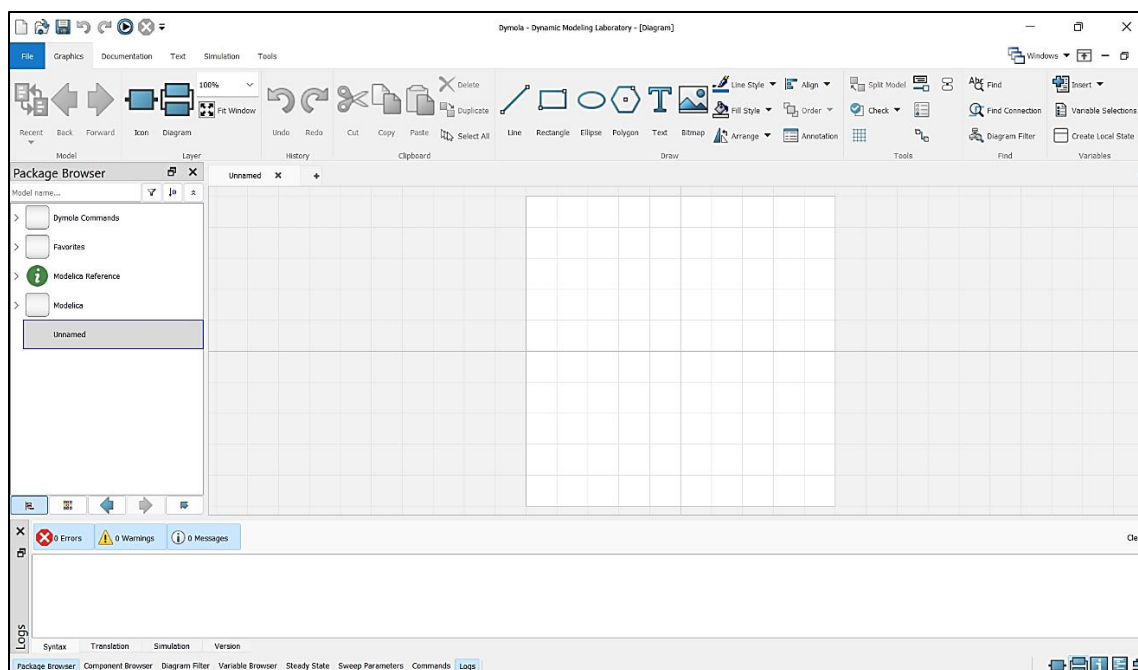


Εικόνα 74: Αποτέλεσμα προσομοίωσης (Plotting) στο λογισμικό OpenModelica [71]

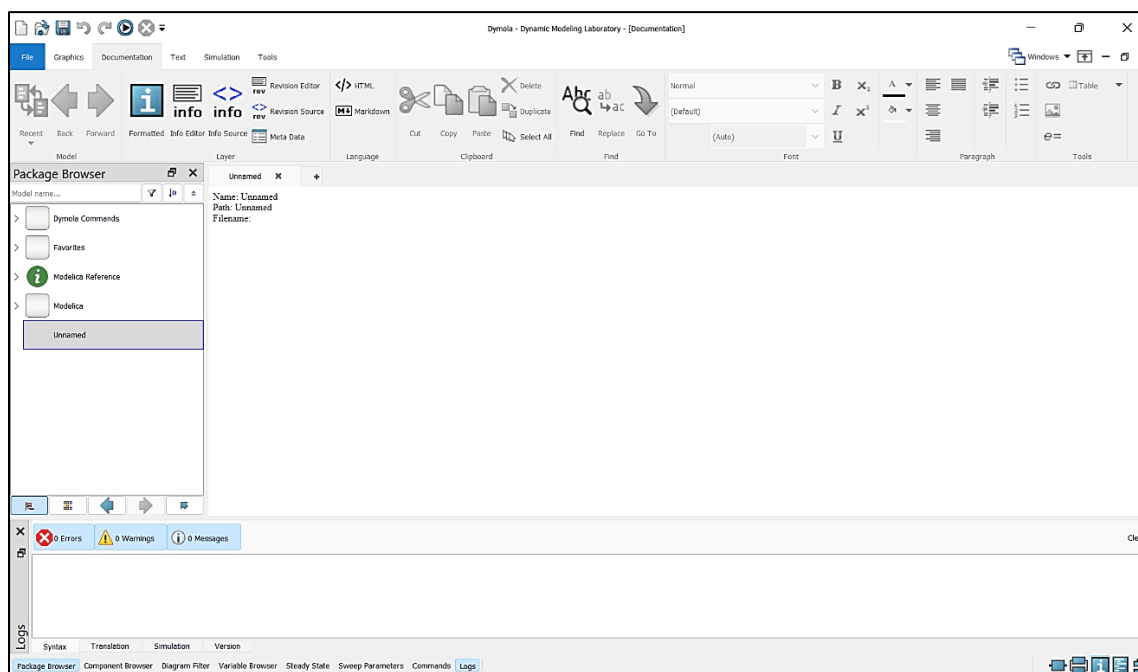
Η παρούσα εργασία δεν αφορά το λογισμικό OpenModelica, επομένως δεν γίνεται περαιτέρω επεξήγηση και παρουσίαση του λογισμικού. Όμως, μια πρώτη γενική επαφή με αυτό το λογισμικό κρίνεται σκόπιμη πριν την ενασχόληση με το λογισμικό Dymola. Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ του OpenModelica και του Dymola είναι ότι το πρώτο μπορεί να κάνει υπολογισμούς σε συστήματα που διαχειρίζονται μέχρι δέκα άγνωστες μεταβλητές. Αντίθετα, στο λογισμικό Dymola δεν υπάρχει κάποιος αντίστοιχος περιορισμός [68].

6.7. Το περιβάλλον Dymola

Το περιβάλλον Dymola δίνει τη δυνατότητα χρήσης έτοιμων βιβλιοθηκών ή και δημιουργίας καινούριων αντικειμένων (components), δηλαδή μοντέλων βασισμένα στη γλώσσα Modelica. Στην **Εικόνα 75** παρουσιάζεται η αρχική επιφάνεια εργασίας στο Dymola κατά την έναρξη λειτουργίας του λογισμικού (launch). Πάνω αριστερά διακρίνονται κάποιες βασικές λειτουργίες του λογισμικού, όπως η δημιουργία καινούργιου αρχείου και η εντολή προσομοίωσης. Πατώντας το βέλος δίπλα από την εντολή τερματισμού προσομοίωσης (stop) είναι δυνατός ο εμπλουτισμός αυτών των επιλογών. Ακριβώς από κάτω βρίσκεται η βασική γραμμή εργαλείων. Το λογισμικό, αρχικά τοποθετείται στην καρτέλα των γραφικών (graphics), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 75**. Σε αυτή την καρτέλα είναι δυνατή η δημιουργία συστημάτων προς προσομοίωση με τη μέθοδο 'drag-and-drop' από έτοιμες βιβλιοθήκες οι οποίες βρίσκονται στο παράθυρο βιβλιοθηκών (Package Browser) στα αριστερά του παραθύρου. Στην **Εικόνα 76** παρουσιάζεται το παράθυρο εργασίας της καρτέλας των πληροφοριών του αρχείου (Documentation). Σε αυτή την καρτέλα εισάγονται πληροφορίες με τη μορφή κειμένου οι οποίες δεν επηρεάζουν την προσομοίωση, αλλά έχουν επεξηγηματικό και βοηθητικό ρόλο για τον χρήστη [72].



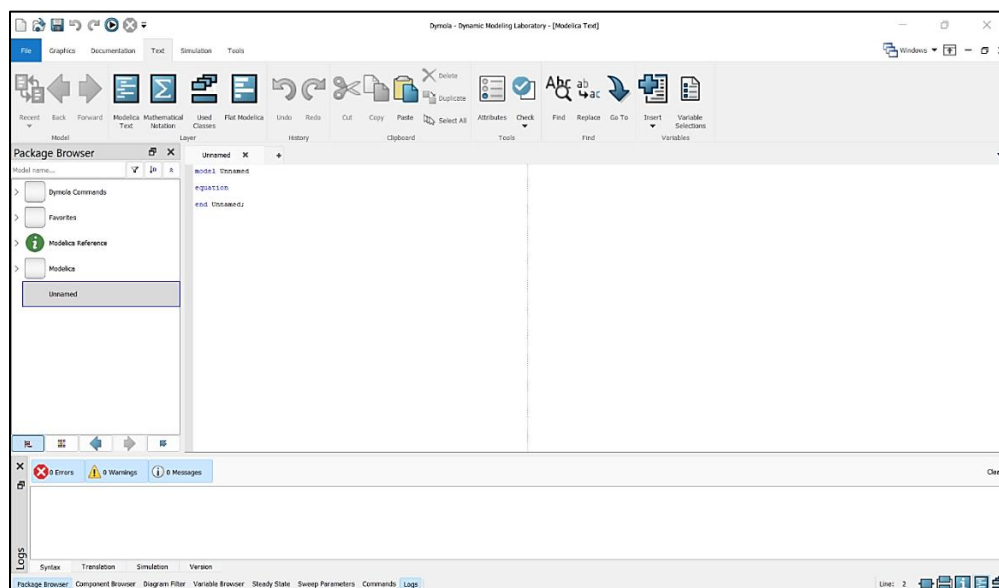
Εικόνα 75: Καρτέλα γραφικών (Graphics) του λογισμικού Dymola [72]



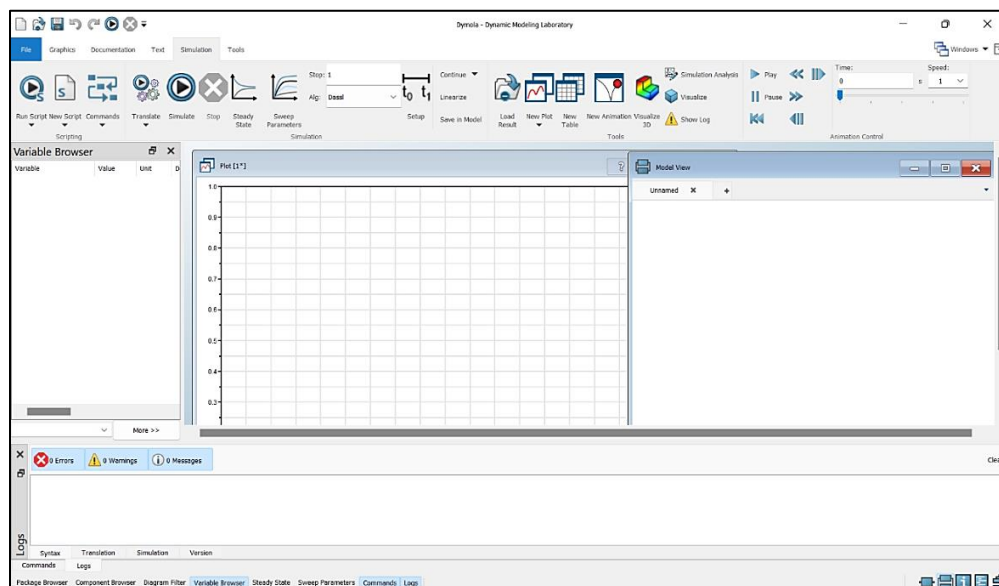
Εικόνα 76: Καρτέλα πληροφοριών (Documentation) του λογισμικού Dymola [72]

Στην **Εικόνα 77** παρουσιάζεται η καρτέλα κειμένου (Text). Σε αυτή την καρτέλα αναπτύσσεται ο κώδικας σε γλώσσα Modelica ή τροποποιείται ο υπάρχον κώδικας ενός έτοιμου αντικειμένου από υπάρχουσες βιβλιοθήκες. Στην **Εικόνα 78** παρουσιάζεται η καρτέλα προσομοίωσης (Simulation). Σε αυτή την καρτέλα εκτελείται η προσομοίωση καθώς επίσης γίνεται και η επιλογή όλων των ρυθμίσεων που την αφορούν. Στο παράθυρο των μεταβλητών (Variable Browser) στα αριστερά, εμφανίζονται τα αποτελέσματα όλων των

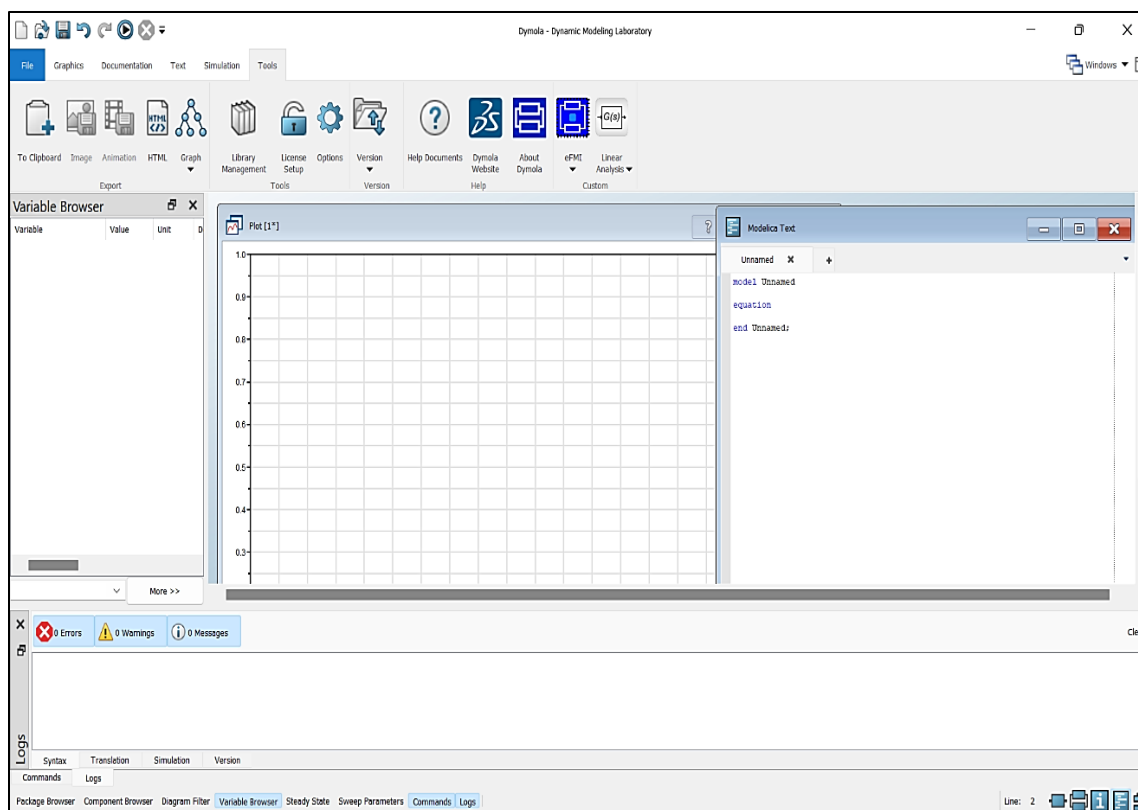
μεταβλητών και παραμέτρων που υπολογίστηκαν ή δηλώθηκαν αντίστοιχα κατά την προσομοίωση. Στο παράθυρο του μοντέλου (Modelica View) στα δεξιά φαίνεται το μοντέλο που προσομοιώνεται. Στο παράθυρο διαγράμματος (Plot) παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή των επιθυμητών μεταβλητών με το πέρασμα της προσομοίωσης. Στο κάτω μέρος βρίσκεται το παράθυρο αρχείου καταγραφής του λογισμικού (Logs) στο οποίο εμφανίζονται μηνύματα (messages), ειδοποιήσεις (warnings) και σφάλματα (errors) που ενδέχεται να προκύψουν κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Στην **Εικόνα 79** παρουσιάζεται η καρτέλα εργαλείων (Tools), στην οποία υπάρχουν κάποια εξωτερικά βοηθητικά εργαλεία που υποστηρίζουν το λογισμικό [72].



Εικόνα 77: Καρτέλα κειμένου (Text) του λογισμικού Dymola [72]



Εικόνα 78: Καρτέλα προσομοίωσης (Simulation) του λογισμικού Dymola [72]



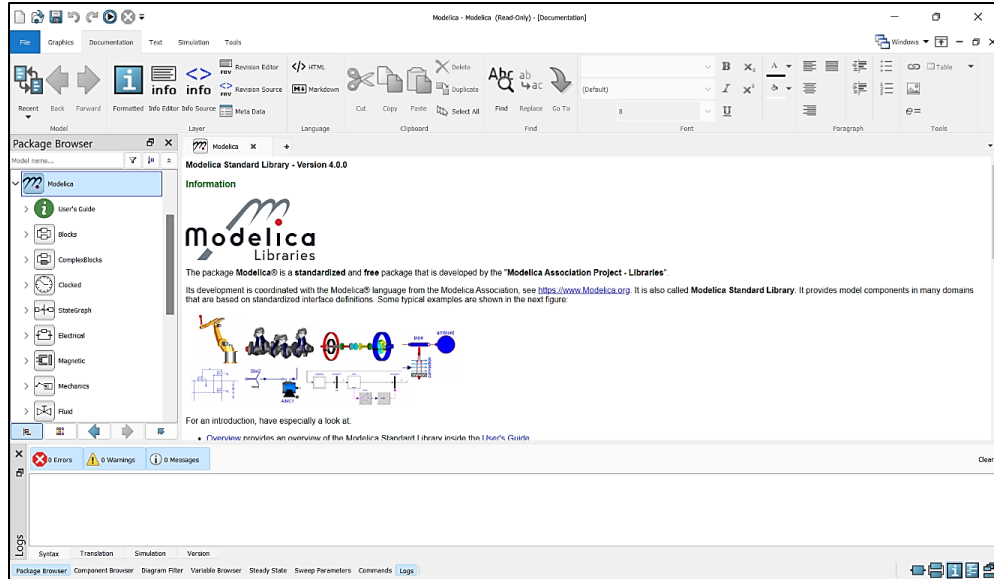
Εικόνα 79: Καρτέλα εργαλείων (Tools) του λογισμικού Dymola [72]

6.8. Βιβλιοθήκες λογισμικού Dymola (Dymola Libraries)

Οι βιβλιοθήκες επιτρέπουν τη χρήση έτοιμων αντικειμένων τα οποία έχουν αναπτυχθεί από άλλους χρήστες. Οι βιβλιοθήκες που είναι διαθέσιμες και έχουν φορτωθεί στο λογισμικό την τρέχουσα στιγμή της μοντελοποίησης φαίνονται στο παράθυρο 'Package Browser' στις καρτέλες γραφικών, αρχείου και κειμένου. Με την έναρξη του λογισμικού, οι διαθέσιμες βιβλιοθήκες είναι η βιβλιοθήκη εντολών του Dymola (Dymola Commands) και η βασική βιβλιοθήκη της Modelica (Modelica). Πατώντας το βέλος αριστερά από το εικονίδιο της εκάστοτε βιβλιοθήκης, αυτή αναπτύσσεται και έτσι γίνεται διακριτό το περιεχόμενο της [72].

6.8.1. Βασική βιβλιοθήκη Modelica (Modelica Standard Library)

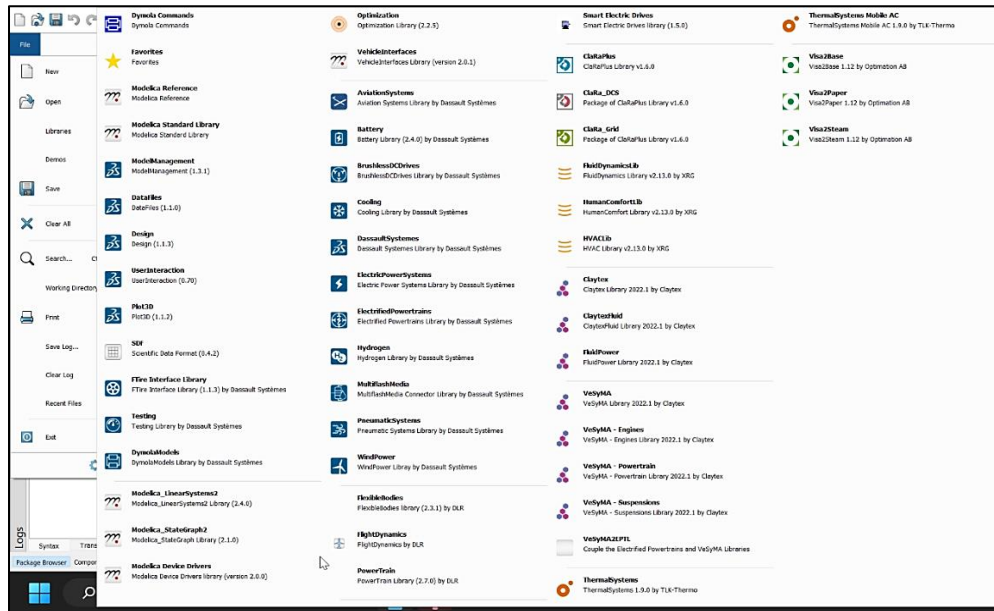
Η βασική βιβλιοθήκη ονομάζεται «Modelica Standard Library». Στην **Εικόνα 80** παρουσιάζεται ένα μέρος της βιβλιοθήκης αυτής, το οποίο φαίνεται στο παράθυρο 'Package Browser' στα αριστερά. Αυτή η βιβλιοθήκη περιέχει στοιχεία από διάφορα επιστημονικά πεδία, όπως ηλεκτρονική (Electrical), μηχανολογία (Mechanical) και ρευστομηχανική (Fluid). Επιπλέον, περιέχει βασικές μαθηματικές συναρτήσεις (Math) αλλά και τις μονάδες μέτρησης (Units) και αρκετές από τις βασικές σταθερές (Constants) [72].



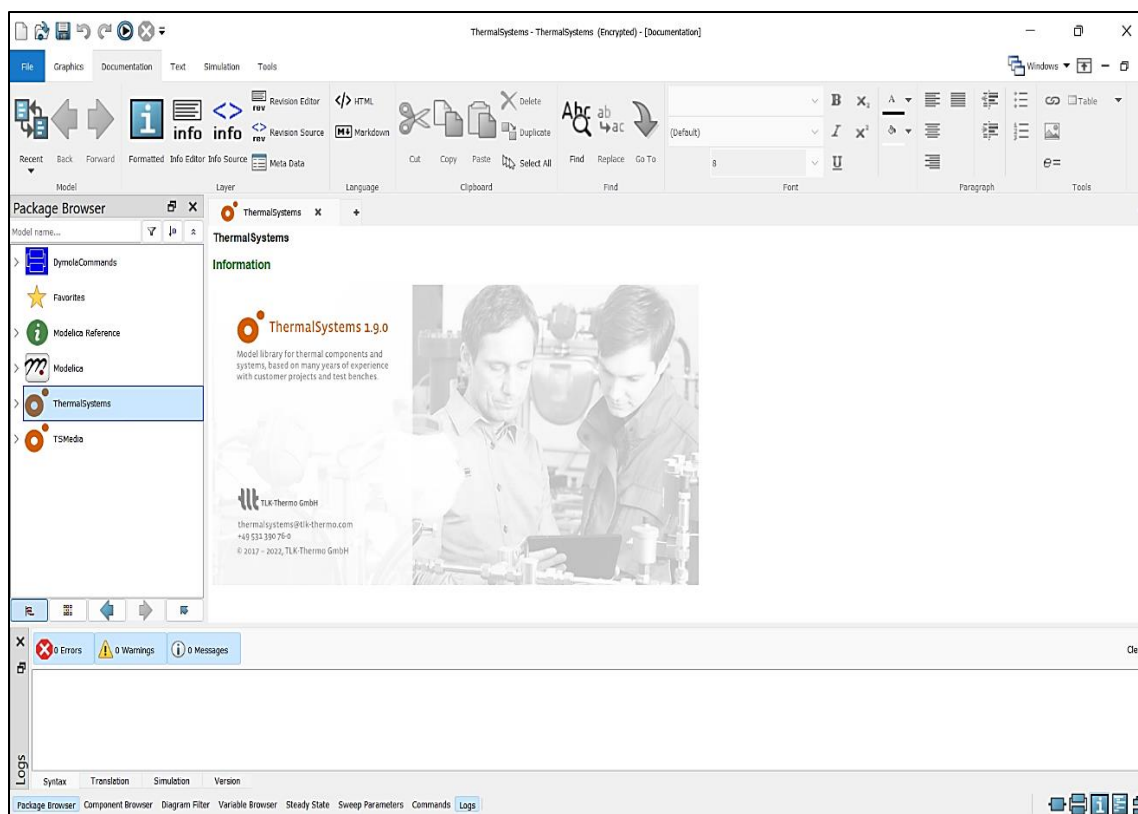
Εικόνα 80: Βασική βιβλιοθήκη «Modelica» (Modelica Standard Library) [72]

6.8.2. Υπάρχουσες βιβλιοθήκες στο Dymola

Στο λογισμικό Dymola υπάρχουν πολλές άλλες διαθέσιμες βιβλιοθήκες πέραν της «Modelica Standard Library». Από την καρτέλα 'File' της γραμμής εργαλείων επιλέγεται η εντολή 'Libraries'. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 81** υπάρχουν πολλές έτοιμες βιβλιοθήκες που αφορούν διάφορους μηχανολογικούς τομείς όπως η θερμοδυναμική, η δυναμική οχημάτων και η ρευστομηχανική. Για τη φόρτωση μιας βιβλιοθήκης απλά χρειάζεται να γίνει επιλογή με το ποντίκι κάνοντας ένα κλικ. Στην **Εικόνα 82** φαίνεται η επιλογή για φόρτωση της βιβλιοθήκης θερμικών συστημάτων (ThermalSystems) [72].



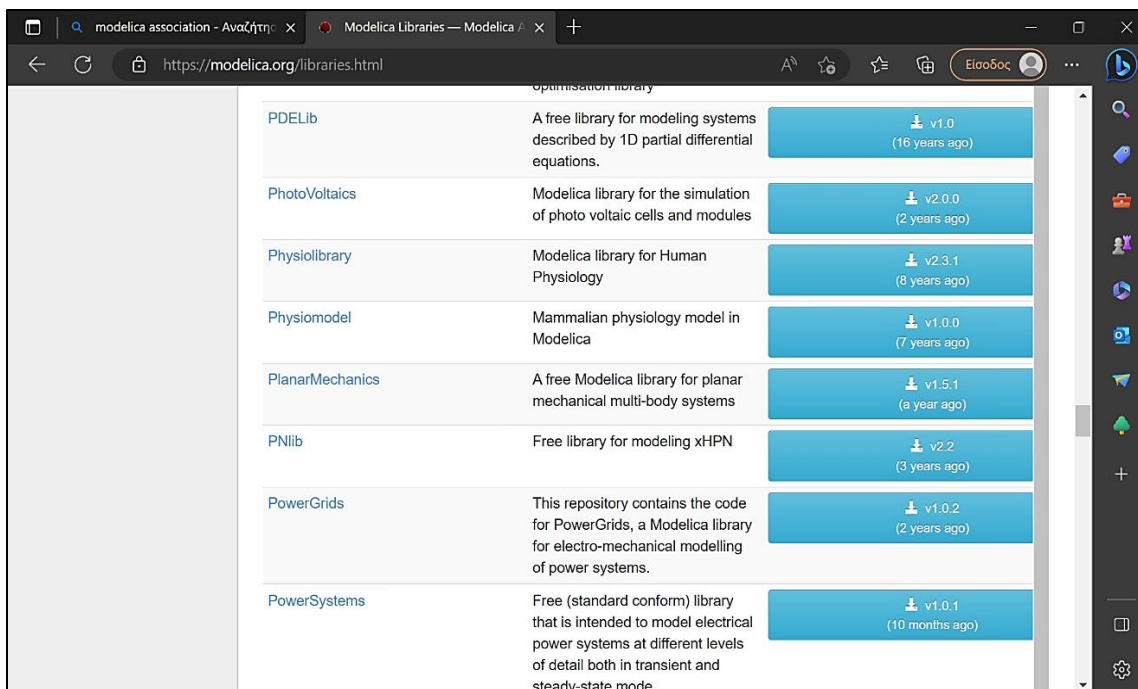
Εικόνα 81: Υπάρχουσες βιβλιοθήκες στο λογισμικό Dymola [72]



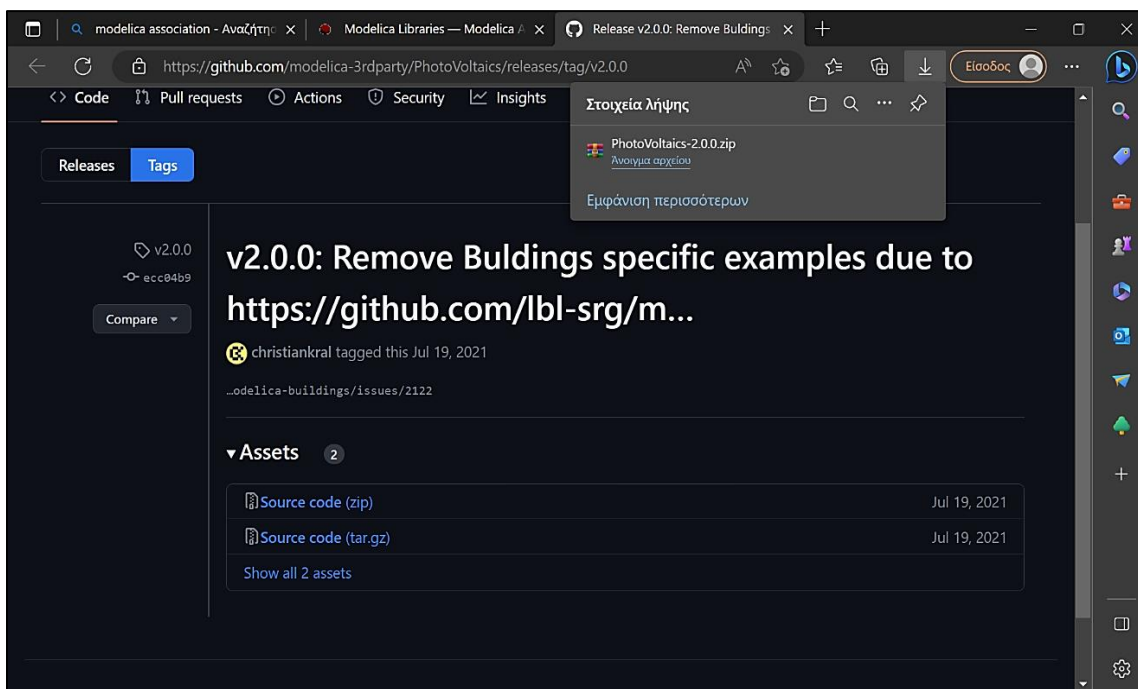
Εικόνα 82: Βιβλιοθήκη «ThermalSystems» στο λογισμικό Dymola [72]

6.8.3. Άλλες διαθέσιμες βιβλιοθήκες

Στο διαδίκτυο υπάρχουν πολλές βιβλιοθήκες οι οποίες έχουν αναπτυχθεί από άλλους χρήστες. Η πλειοψηφία αυτών είναι ανοικτού κώδικα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από οποιονδήποτε άλλο χρήστη. Από τον ιστότοπο της διαδικτυακής κοινότητας της Modelica, ο οποίος φαίνεται στην **Εικόνα 64**, επιλέγεται από το αριστερό παράθυρο η καρτέλα 'Modelica Libraries'. Εκεί, υπάρχουν βιβλιοθήκες οι οποίες είναι ελεύθερης πρόσβασης. Επιπλέον, υπάρχουν βιβλιοθήκες οι οποίες δεν είναι ελεύθερης πρόσβασης και παρέχονται από κάποιες εταιρίες, όπως για παράδειγμα την εταιρία «Modelon». Στη συνέχεια, γίνεται μια τυχαία επιλογή βιβλιοθήκης έτσι ώστε να παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να εγκατασταθεί και να φορτωθεί στο λογισμικό Dymola. Η βιβλιοθήκη που επιλέγεται είναι η «PhotoVoltaics», η οποία περιέχει μοντέλα προσομοίωσης ενός φωτοβολταϊκού. Στην **Εικόνα 83** φαίνεται η περιγραφή αυτής της βιβλιοθήκης. Κάνοντας απλό κλικ στο μπλε κουτί που αναγράφεται η τρέχουσα έκδοση, η ιστοσελίδα κατευθύνεται στον ιστότοπο του «GitHub». Σε αυτό τον ιστότοπο είναι δυνατή η πρόσβαση και η λήψη έτοιμων βιβλιοθηκών. Στην **Εικόνα 84** φαίνονται μερικές πληροφορίες για τη βιβλιοθήκη που έχει επιλεγεί. Πατώντας το 'Source code (zip)' γίνεται λήψη της βιβλιοθήκης στον υπολογιστή [69][73].

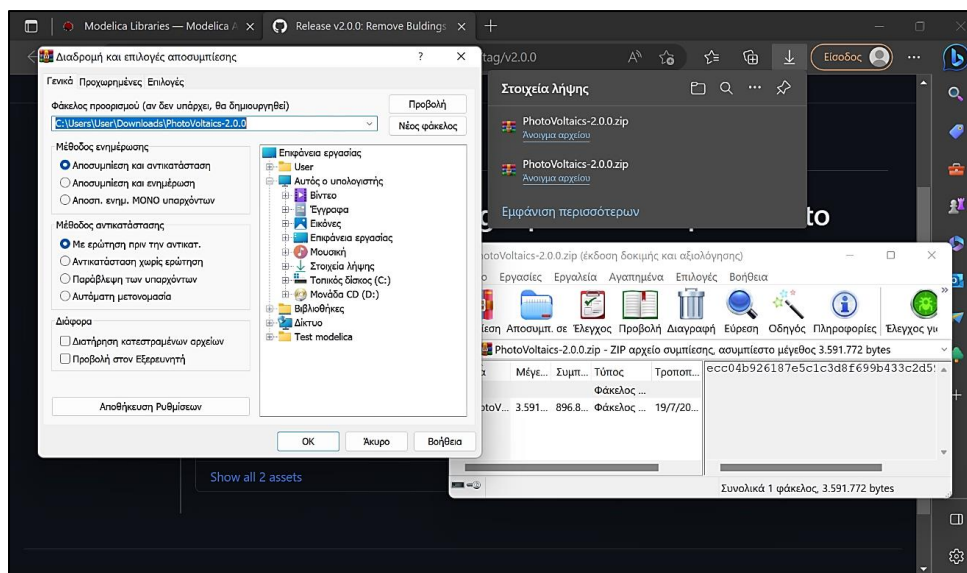


Εικόνα 83: Διαθέσιμες βιβλιοθήκες που αναπτύχθηκαν από άλλους χρήστες [69]



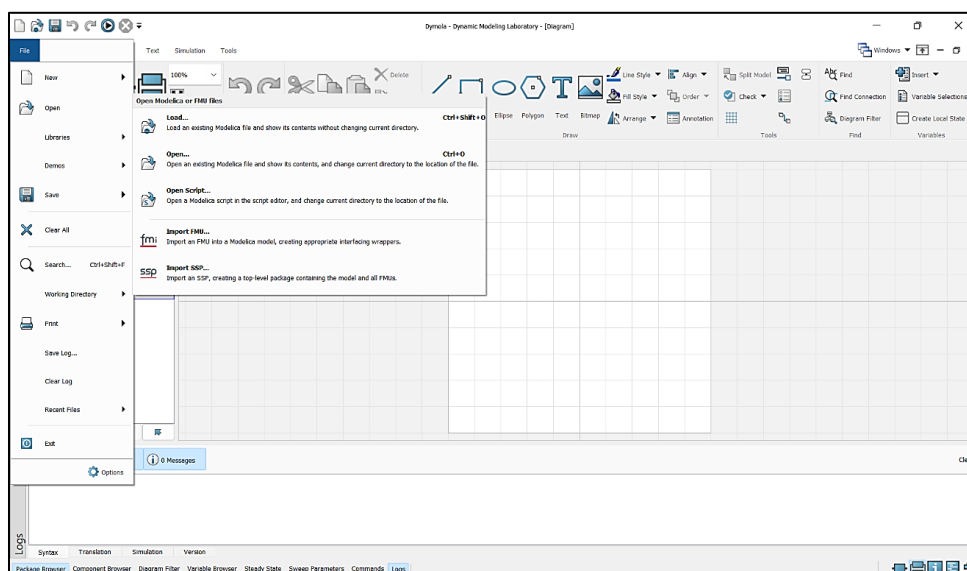
Εικόνα 84: Λήψη βιβλιοθήκης μέσω του ιστότοπου «GitHub» [73]

Στη συνέχεια, γίνεται αποσυμπίεση του αρχείου που έχει ληφθεί εκτελώντας τη σειρά εντολών 'Άνοιγμα Αρχείου→Αποσυμπίεση σε επιθυμητό φάκελο' και τέλος τον φάκελο που είναι επιθυμητή η αποθήκευση της βιβλιοθήκης. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στην **Εικόνα 85**.

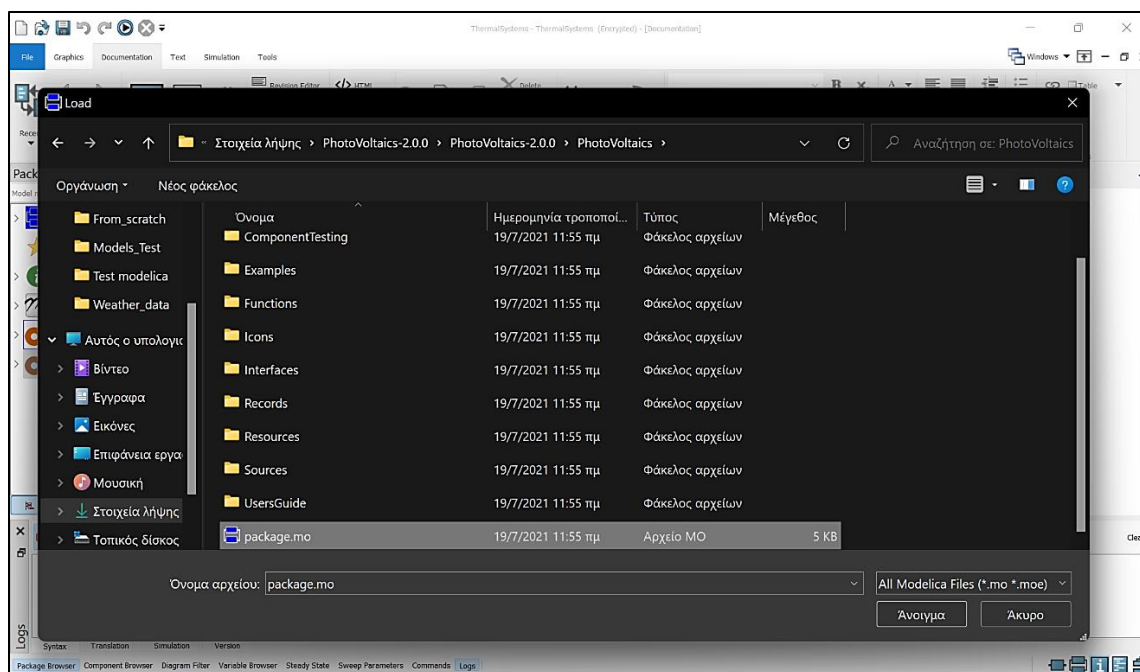


Εικόνα 85: Αποσυμπίεση και εγκατάσταση βιβλιοθήκης στον υπολογιστή

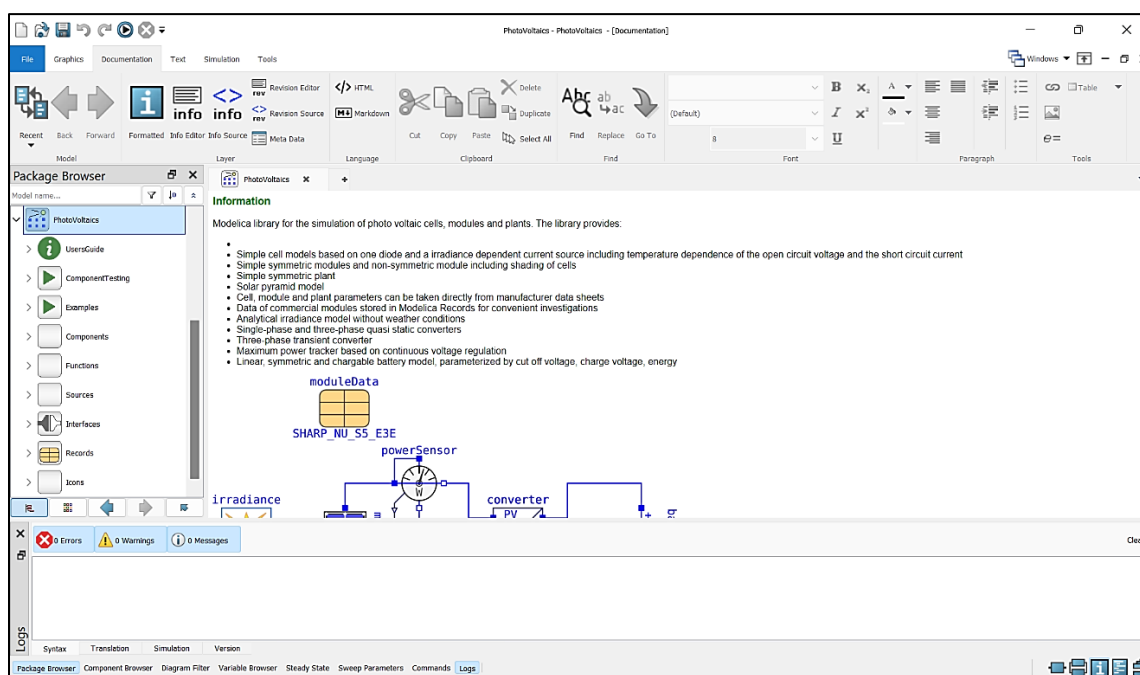
Πλέον, η βιβλιοθήκη είναι εγκατεστημένη στον υπολογιστή και μπορεί να φορτωθεί στο λογισμικό Dymola. Από την γραμμή εργαλείων εκτελείται η σειρά εντολών 'File→Open→Load', όπως φαίνεται στην **Εικόνα 86**. Στη συνέχεια, επιλέγεται ο φάκελος της βιβλιοθήκης που εγκαταστάθηκε προηγουμένως και γίνεται αναζήτηση αρχείου τύπου Modelica (.mo). Επιλέγοντας με διπλό κλικ οποιοδήποτε αρχείο με αυτή την κατάληξη στον φάκελο της βιβλιοθήκης, φορτώνεται ολόκληρη η βιβλιοθήκη. Στην **Εικόνα 87** παρουσιάζεται ένα τέτοιο αρχείο με την ονομασία «package.mo». Στην **Εικόνα 88** φαίνεται η καρτέλα αρχείου της βιβλιοθήκης «PhotoVoltaics» που έχει φορτωθεί στην επιφάνεια εργασίας του λογισμικού Dymola [72].



Εικόνα 86: Εντολές φόρτωσης βιβλιοθήκης στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 87: Φόρτωση βιβλιοθήκης από τον υπολογιστή στο λογισμικό Dymola [72]

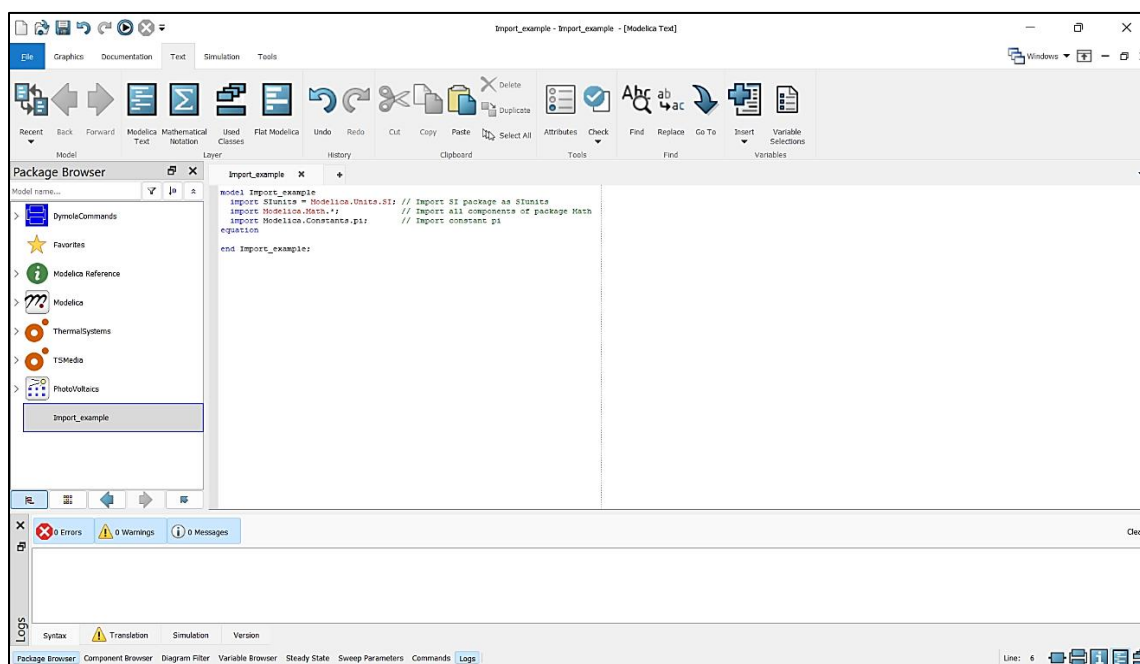


Εικόνα 88: Βιβλιοθήκη «PhotoVoltaics» στο λογισμικό Dymola [72]

6.8.4. Εισαγωγή βιβλιοθηκών στη Modelica

Όταν είναι επιθυμητή η χρήση μιας βιβλιοθήκης ή ενός τμήματος αυτής στην ανάπτυξη ενός κώδικα σε γλώσσα Modelica, τότε αυτή πρέπει να εισάγεται στη δομή του κώδικα. Η εισαγωγή βιβλιοθηκών στη Modelica γίνεται με την εντολή *'Import'*. Με την εντολή

αυτή υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής της βιβλιοθήκης αλλά και πρόσδοσης σε αυτή ενός αυθαίρετου ονόματος από τον χρήστη, έτσι ώστε να τη χρησιμοποιεί με αυτό κατά την ανάπτυξη του κώδικα στο συγκεκριμένο μοντέλο. Η διαδρομή θέσης (path) είναι η διαδρομή μέσα στη βιβλιοθήκη και τις υποβιβλιοθήκες αυτής μέχρι το επιθυμητό μοντέλο. Στη Modelica, η διαδρομή μέσα σε βιβλιοθήκες γίνεται μέσω της χρήσης του σημείου στίξης της τελείας (dot notation). Στην **Εικόνα 89** παρουσιάζονται τρεις ισοδύναμες χρήσεις της εντολής 'Import'. Στην πρώτη περίπτωση, εισάγεται η βιβλιοθήκη του διεθνούς συστήματος μονάδων (SI) η οποία ανήκει στη «Modelica Standard Library». Σε αυτή, δίνεται το όνομα «SIunits» για να αποφεύγεται η ανάγκη να αναγράφεται ολόκληρη η διαδρομή θέσης της βιβλιοθήκης κάθε φορά που αυτή θα καλείται. Στην δεύτερη περίπτωση, γίνεται χρήση του άστρου (*) έτσι ώστε να γίνει εισαγωγή όλου του περιεχομένου της βιβλιοθήκης των μαθηματικών συναρτήσεων (Math). Στην τρίτη περίπτωση, εισάγεται μια σταθερά, το π, η οποία πλέον μπορεί να χρησιμοποιείται απευθείας στη δομή του κώδικα ως 'pi' [72].

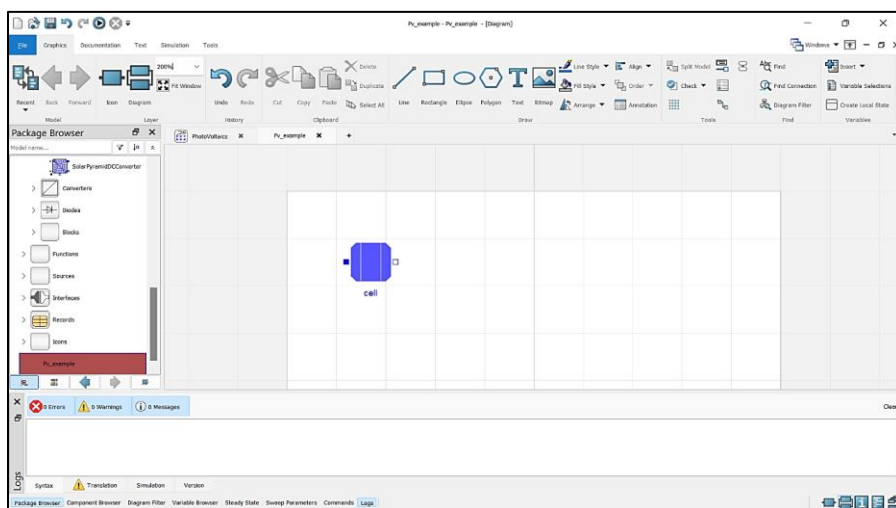


Εικόνα 89: Εισαγωγή βιβλιοθηκών σε κώδικα γλώσσας Modelica [72]

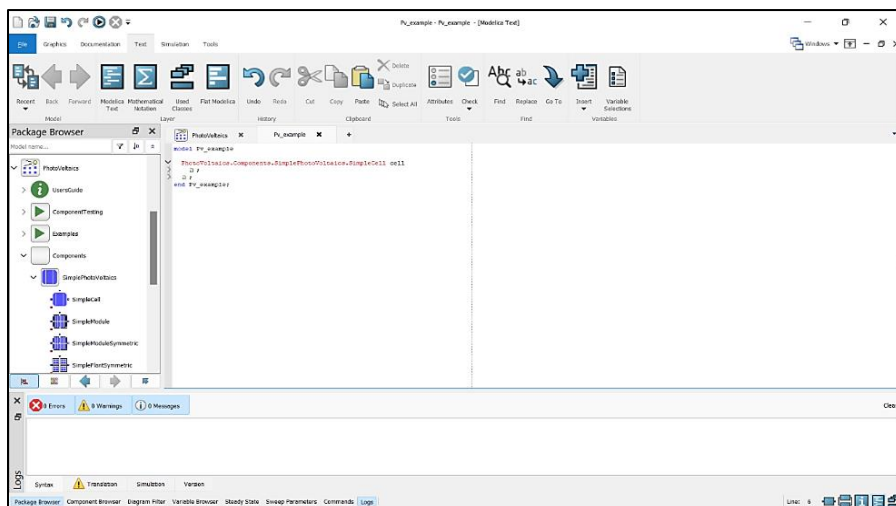
6.8.5. Χρήση έτοιμων αντικειμένων από βιβλιοθήκες

Τα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται από βιβλιοθήκες ονομάζονται «components». Είτε είναι προϋπάρχοντα σε βιβλιοθήκες είτε δημιουργούνται από τον ίδιο το χρήστη, θα πρέπει να εισάγονται μέσω της Modelica. Έτοιμα αντικείμενα μπορούν να εισάγονται με τη μέθοδο 'drag-and-drop' στην καρτέλα γραφικών. Στην **Εικόνα 90** παρουσιάζεται ένα αντικείμενο της βιβλιοθήκης «PhotoVoltaics», το «SimpleCell», το οποίο εισάγεται στην καρτέλα γραφικών. Στο πεδίο 'Layer' της καρτέλας είναι δυνατή η μεγέθυνση της επιφάνειας εργασίας. Αυτόματα, δημιουργείται η αντίστοιχη εντολή στη Modelica, η οποία φαίνεται στην καρτέλα κειμένου στην **Εικόνα 91**. Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται ότι η

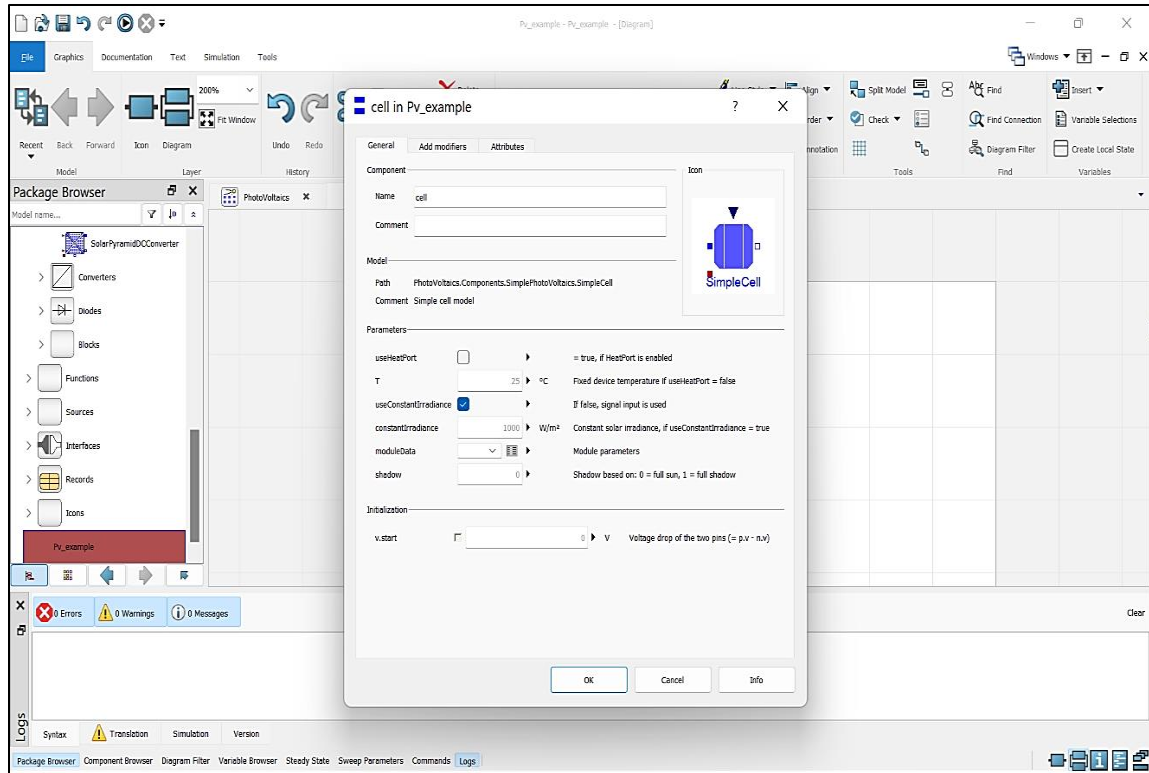
γλώσσα θα παρουσιαστεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο. Κάνοντας διπλό κλικ στο αντικείμενο (στην καρτέλα γραφικών) εμφανίζονται οι πληροφορίες και οι παράμετροι που αφορούν το αντικείμενο. Στην **Εικόνα 92** παρουσιάζεται η καρτέλα πληροφοριών του αντικειμένου που επιλέχθηκε. Στη συνέχεια εισάγεται με τον ίδιο τρόπο ένα δεύτερο αντικείμενο, το «signalCurrent». Κάνοντας παρατεταμένο κλικ στο λευκό τετράγωνο που είναι συνδεδεμένο σε αυτό, εμφανίζεται ένας μαύρος σταυρός. Με το ποντίκι και κρατώντας πατημένο το αριστερό κλικ, ο σταυρός πρέπει να οδηγηθεί στο μπλε τετράγωνο που είναι συνδεδεμένο στο αντικείμενο «SimpleCell» και στη συνέχεια να αφηθεί. Έτσι, δημιουργείται μια σύνδεση (connection) μεταξύ των δύο αντικειμένων η οποία φαίνεται ως μια μπλε συνεχής γραμμή. Να σημειωθεί ότι, για να είναι δυνατή η σύνδεση, πρέπει οι δυο σύνδεσμοι που συνδέουν τα δύο αντικείμενα να είναι συμβατοί, αλλιώς το λογισμικό Dymola δεν το επιτρέπει. Στην **Εικόνα 93** παρουσιάζονται δύο συνδεδεμένα αντικείμενα στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Dymola [72].



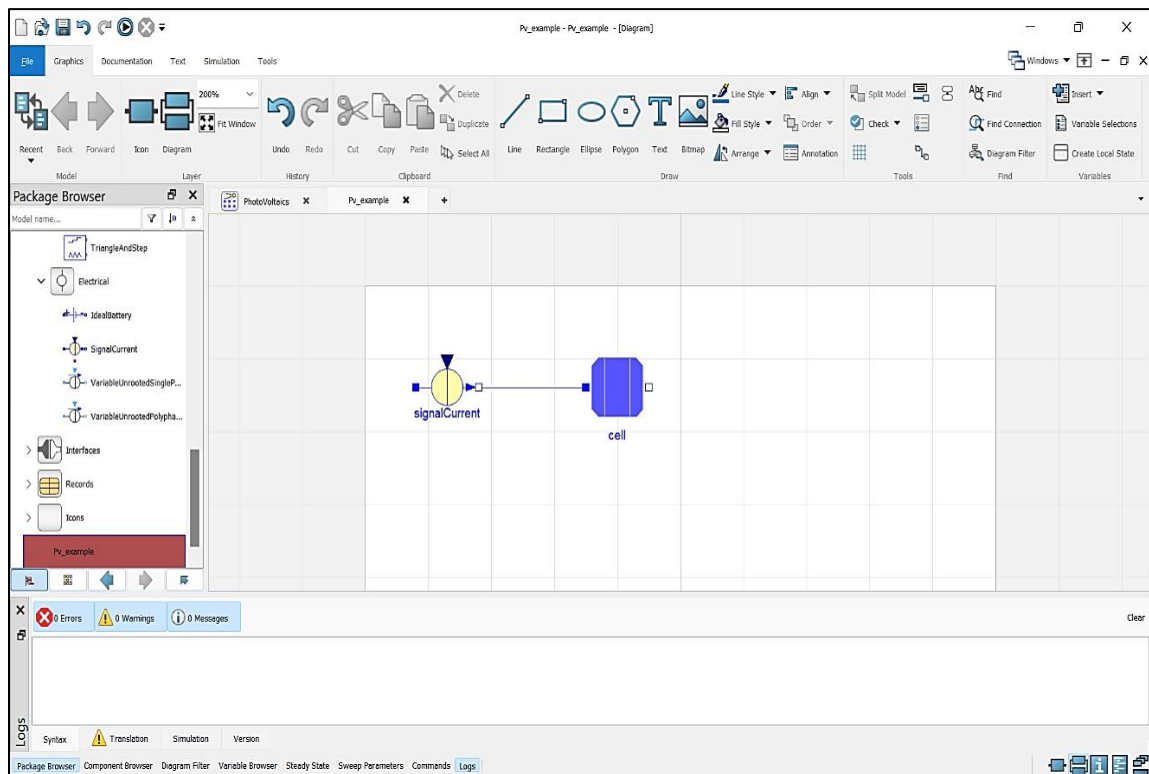
Εικόνα 90: Εισαγωγή αντικειμένου βιβλιοθήκης στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Dymola [72]



Εικόνα 91: Εισαγωγή αντικειμένου μέσω εντολής της γλώσσας Modelica [72]



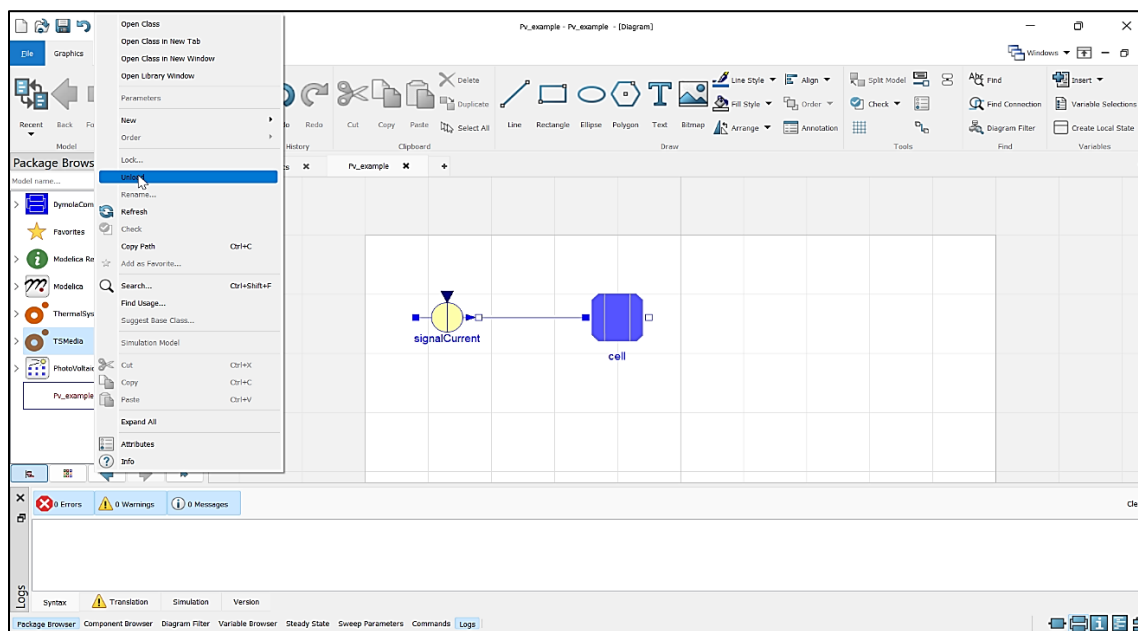
Εικόνα 92: Καρτέλα πληροφοριών αντικειμένου στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 93: Σύνδεση αντικειμένων στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Dymola [72]

6.8.6. Διαγραφή βιβλιοθήκης

Όταν μια βιβλιοθήκη δεν είναι πλέον χρήσιμη, τότε μπορεί να διαγραφεί από το λογισμικό. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι δεξί κλικ στη βιβλιοθήκη στο παράθυρο 'Package Browser' και επιλογή της εντολής 'Unload'. Η διαδικασία διαγράψης μιας βιβλιοθήκης φαίνεται στην **Εικόνα 94**. Διαγράφοντας μια βιβλιοθήκη, κάθε μοντέλο που έχει δημιουργηθεί με χρήση στοιχείων από αυτή δεν μπορεί πλέον να προσομοιωθεί. Να σημειωθεί ότι η βιβλιοθήκη διαγράφεται από το λογισμικό τη δεδομένη στιγμή, αλλά παραμένει διαθέσιμη να φορτωθεί ξανά ανά πάσα στιγμή ακολουθώντας τη διαδικασία που περιεγράφηκε πιο πάνω [72].



Εικόνα 94: Διαγραφή βιβλιοθήκης από το λογισμικό Dymola [72]

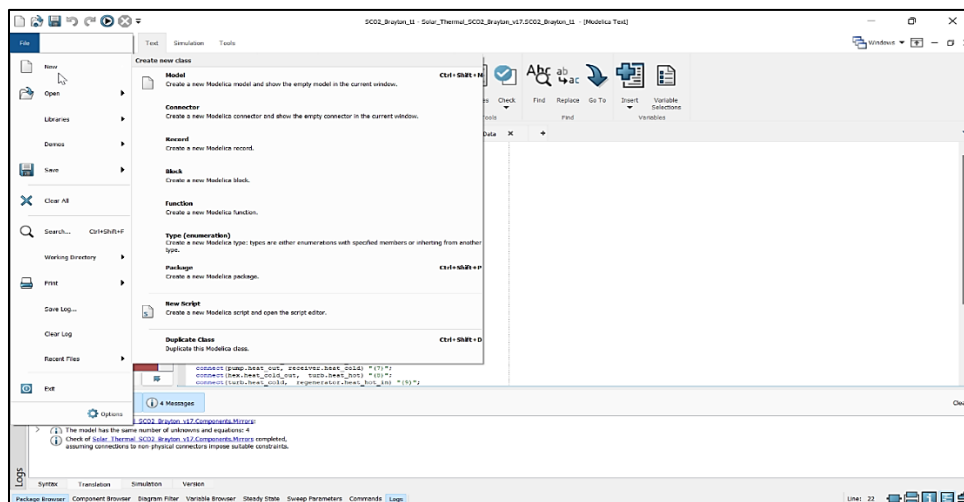
7. Η γλώσσα προγραμματισμού Modelica

7.1. Modelica: Κλάσεις (Classes)

Οι κλάσεις (classes) είναι το βασικό στοιχείο της Modelica. Αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία των αντικειμένων (components) στα οποία στηρίζεται η αντικειμενοστραφής μοντελοποίηση (object-oriented language). Μέσα στις κλάσεις ορίζονται οι παραμέτροι που αφορούν το αντικείμενο αλλά και οι εξισώσεις που το περιγράφουν. Όλα τα αντικείμενα προς μοντελοποίηση στηρίζονται σε αυτές τις κλάσεις, οι οποίες είτε δημιουργούνται από τον χρήστη είτε προϋπάρχουν ήδη. Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζονται τα είδη των κλάσεων που υποστηρίζονται στη γλώσσα Modelica, καθώς επίσης και μια σύντομη περιγραφή τους. Στην **Εικόνα 95** φαίνεται ο τρόπος δημιουργίας μιας κλάσης σε γλώσσα Modelica στο λογισμικό Dymola. Η σειρά εντολών που απαιτείται είναι 'File→New' και τέλος η επιλογή του επιθυμητού είδους κλάσης [67][68].

Πίνακας 4: Είδη κλάσεων στη γλώσσα Modelica [68]

model	Διατύπωση απλού μοντέλου
connector	Διατύπωση συνδέσμου μεταξύ των μοντέλων, δεν περιέχει εξισώσεις
record	Διατύπωση μεταβλητών και παραμέτρων, δεν περιέχει εξισώσεις
block	Διατύπωση απλού μοντέλου αλλά με σαφή διατύπωση μεταβλητών εισόδου και εξόδου
function	Διατύπωση συναρτήσεων και αλγορίθμων ή ακόμα και εξωτερικών συναρτήσεων από τις γλώσσες προγραμματισμού C ή FORTRAN
type	Διατύπωση ενός νέου τύπου μοντέλου στηριζόμενο στα ήδη υπάρχοντα
package	Διατύπωση βιβλιοθηκών, δηλαδή κλάσεων που περιέχουν μόνο κλάσεις



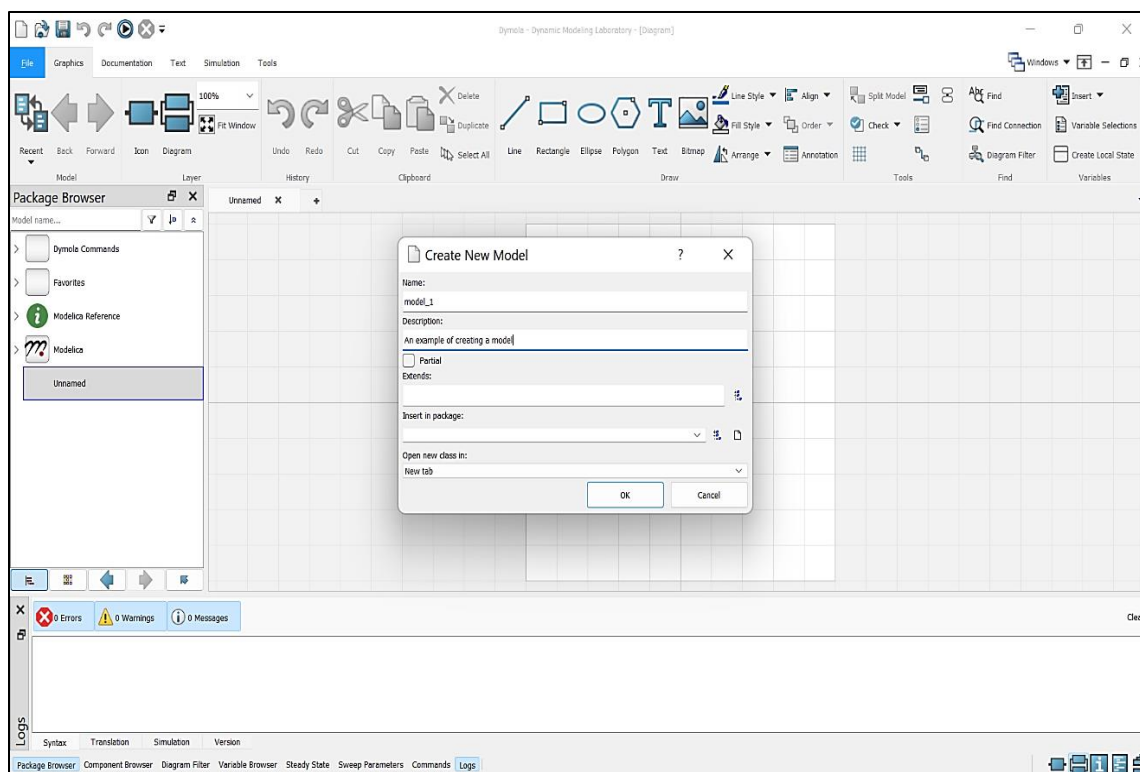
Εικόνα 95: Δημιουργία κλάσης (class) στο λογισμικό Dymola [72]

Τα ονόματα των κλάσεων αρχίζουν από κάποιο λατινικό χαρακτήρα. Τα κενά δεν επιτρέπονται στα ονόματα, αλλά επιτρέπεται η χρήση της κάτω παύλας (`_`). Επιπλέον, η Modelica λαμβάνει υπόψη τη διάκριση πεζών και κεφαλαίων γραμμάτων. Για παράδειγμα, η ονομασία ενός μοντέλου ως «`model_1`» είναι επιτρεπτή, αλλά είναι διαφορετική από το «`Model_1`» που είναι επίσης ένας επιτρεπτός ορισμός. Αντίθετα, η ονομασία «`model 1`» δεν επιτρέπεται. Επίσης, στη Modelica υπάρχουν κάποιες λέξεις-κλειδιά (keywords) οι οποίες χρησιμοποιούνται για διάφορες λειτουργίες και συνίσταται να μην χρησιμοποιούνται στη δημιουργία κλάσεων ή στη δήλωση μεταβλητών. Στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται οι βασικότερες λέξεις-κλειδιά της Modelica [67][74].

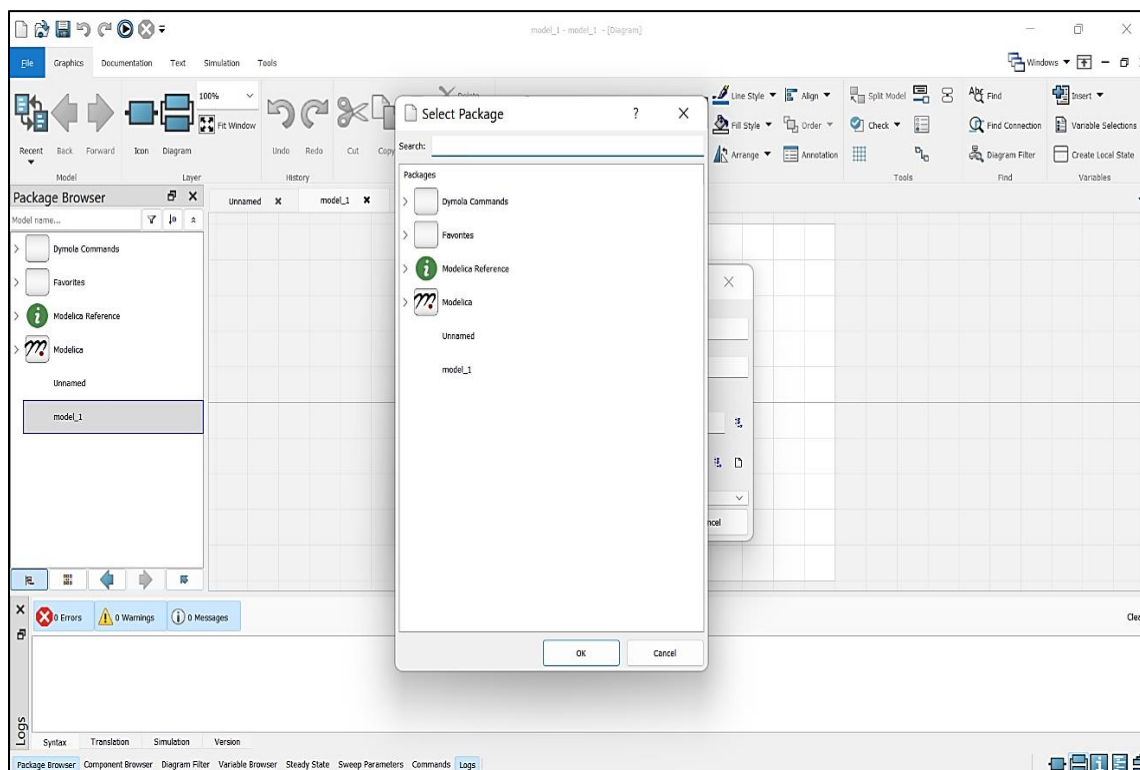
Πίνακας 5: Λέξεις-κλειδιά στη γλώσσα Modelica (Modelica keywords) [74]

<code>algorithm</code>	<code>discrete</code>	<code>false</code>	<code>loop</code>	<code>pure</code>
<code>and</code>	<code>each</code>	<code>final</code>	<code>model</code>	<code>record</code>
<code>annotation</code>	<code>else</code>	<code>flow</code>	<code>not</code>	<code>redeclare</code>
	<code>elseif</code>	<code>for</code>	<code>operator</code>	<code>replaceable</code>
<code>block</code>	<code>elsewhen</code>	<code>function</code>	<code>or</code>	<code>return</code>
<code>break</code>	<code>encapsulated</code>	<code>if</code>	<code>outer</code>	<code>stream</code>
<code>class</code>	<code>end</code>	<code>import</code>	<code>output</code>	<code>then</code>
<code>connect</code>	<code>enumeration</code>	<code>impure</code>	<code>package</code>	<code>true</code>
<code>connector</code>	<code>equation</code>	<code>in</code>	<code>parameter</code>	<code>type</code>
<code>constant</code>	<code>expandable</code>	<code>initial</code>	<code>partial</code>	<code>when</code>
<code>constrainedby</code>	<code>extends</code>	<code>inner</code>	<code>protected</code>	<code>while</code>
<code>der</code>	<code>external</code>	<code>input</code>	<code>public</code>	<code>within</code>

Στην **Εικόνα 96** παρουσιάζεται το παράθυρο του λογισμικού Dymola για τη δημιουργία ενός μοντέλου. Στο πεδίο '`Name`' εισάγεται το όνομα του μοντέλου. Στο πεδίο '`Description`' εισάγεται μια σύντομη περιγραφή του μοντέλου για διευκόλυνση του χρήστη. Στη συνέχεια, υπάρχει η επιλογή ορισμού του μοντέλου ως '`Partial`'. Ένα μοντέλο χαρακτηρίζεται ως '`Partial`' σε περίπτωση που δεν έχει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους ή εξισώσεις για να προσομοιωθεί. Αυτή είναι μια συνήθης επιλογή, αφού επιτρέπει τη δημιουργία μοντέλων των οποίων οι τιμές των παραμέτρων θα οριστούν από τον εκάστοτε χρήστη σε μεταγενέστερο στάδιο. Στο πεδίο '`Extends`' δίνεται η δυνατότητα φόρτωσης πληροφοριών από υπάρχοντα μοντέλα τα οποία βρίσκονται σε έτοιμες βιβλιοθήκες ή είχαν δημιουργηθεί προγενέστερα. Σε περίπτωση που το μοντέλο θα αποτελεί μέρος μιας βιβλιοθήκης, τότε στο πεδίο '`Insert in package`' αναγράφεται η διαδρομή θέσης (path) της θέσης του μοντέλου μέσα σε αυτή. Εναλλακτικά, κάνοντας διπλό κλικ στο εικονίδιο ακριβώς δίπλα στο πεδίο αυτό, μπορεί να γίνει η επιλογή της θέσης με γραφικό τρόπο. Η δυνατότητα αυτή παρουσιάζεται στην **Εικόνα 97** [67][68].



Εικόνα 96: Δημιουργία νέου μοντέλου στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 97: Τοποθέτηση μοντέλου σε βιβλιοθήκη (Insert in package) στο λογισμικό Dymola [72]

Η επιλογή του είδους της κλάσης εξαρτάται από τη χρήση και το ρόλο που θα έχει αυτή κατά τη μοντελοποίηση. Μερικές κλάσεις, όπως η *'record'* και η *'connector'*, δεν περιέχουν εξισώσεις και άρα δεν μπορούν να προσομοιωθούν. Ακολουθως, δίνεται μια σύνομη περιγραφή για τις ιδιότητες του κάθε είδους κλάσης της Modelica [74].

Model: Απλό μοντέλο. Επιτρέπεται η χρήση όλων των ειδών μεταβλητών, όπως σταθερών, παραμέτρων, αλλά και όλων των ειδών εξισώσεων, όπως συναρτήσεις και συνδυαστικές εξισώσεις [74].

Connector: Περιγραφή πληροφοριών που αφορούν τη σύνδεση αντικειμένων. Επιτρέπεται η χρήση τύπων μεταβλητών οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις πληροφορίες που μεταβιβάζονται από και προς τα αντικείμενα. Δεν επιτρέπεται η προσομοίωση τους [74].

Record: Περιγραφή πληροφοριών που αφορούν κάποιο στοιχείο. Επιτρέπεται η χρήση τύπων μεταβλητών οι οποίες αντιπροσωπεύουν πληροφορίες αυτών. Δεν επιτρέπονται εξισώσεις ούτε σύνδεση τους με μοντέλα. Δεν επιτρέπεται η προσομοίωση τους [74].

Block: Το ίδιο με ένα μοντέλο. Η διαφορά είναι ότι όλες οι μεταβλητές πρέπει διατυπώνονται ως μεταβλητές εισόδου (input) ή εξόδου (output) [74].

Function: Συναρτήσεις οι οποίες μπορούν να καλούνται μέσα σε μοντέλα για διάφορους υπολογισμούς. Δεν επιτρέπεται η προσομοίωση τους [74].

Type: Τύποι μεταβλητών. Χαρακτηρίζουν τις μεταβλητές ως προς τις ιδιότητες τους, όπως για παράδειγμα τις μονάδες μέτρησης τους. Δεν επιτρέπονται εξισώσεις, ούτε σύνδεση τους με μοντέλα. Δεν επιτρέπεται η προσομοίωση τους [74].

Package: Βιβλιοθήκη που περιέχει μόνο κλάσεις. Δεν επιτρέπεται η προσομοίωση τους [74].

Πολλές φορές γίνεται χρήση των *'instances'*. Το *'instance'* αποτελεί ένα αντίγραφο ενός μοντέλου, αλλά με τη δυνατότητα προσδιορισμού άλλων τιμών σε κάποιες παραμέτρους. Για παράδειγμα, εάν σε ένα ηλιακό συγκεντρωτικό σύστημα χρησιμοποιούνται δύο συλλέκτες διαφορετικής επιφάνειας, τότε μπορεί να δημιουργηθεί μόνο ένα μοντέλο που να περιγράφει τη λειτουργία ενός συλλέκτη και δύο *'instances'*, ένα για κάθε συλλέκτη με διαφορετικό εμβαδόν συλλέκτης επιφάνειας. Για τη δημιουργία ενός *'instance'*, αναγράφεται το όνομα του υπάρχοντος μοντέλου και μετά από ένα κενό, το όνομα του νέου μοντέλου που θα αποτελεί το *'instance'* του. Τέλος, σε παρένθεση δηλώνονται οι τιμές των παραμέτρων που θα έχει το *'instance'*. Στο **Σχήμα 11** παρουσιάζεται ο τρόπος δημιουργίας ενός *'instance'* [68].

```
component_1 instance(var_1=val_1,..., var_n=val_n);
```

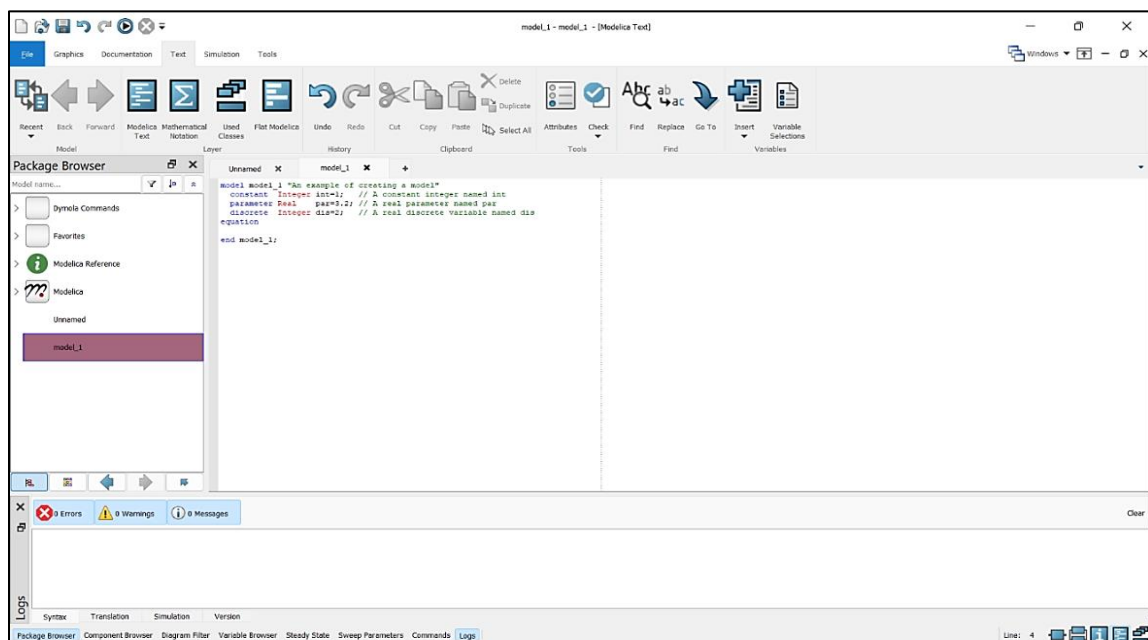
Σχήμα 11: Δημιουργία *'instance'* σε γλώσσα Modelica [68]

7.2. Modelica: Μεταβλητές (Variables)

Ένα από τα στοιχεία που αποτελούν ένα μοντέλο ενός αντικειμένου είναι οι μεταβλητές. Τα τρία είδη μεταβλητών στη Modelica, καθώς επίσης και η βασική τους περιγραφή, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6**. Κατά τη δημιουργία μιας μεταβλητής, θα πρέπει να ορίζονται τρία βασικά χαρακτηριστικά. Πρώτον, θα πρέπει να δηλώνεται το είδος της. Ακολούθως, πρέπει να δηλώνεται ο τύπος της μεταβλητής και τέλος το όνομα αυτής. Σε ένα πλήρες μοντέλο (δηλαδή όχι partial) θα πρέπει να δηλώνεται και η τιμή της, έτσι ώστε το μοντέλο να μπορεί να προσομοιωθεί. Οι μεταβλητές θα πρέπει να ορίζονται στο τμήμα του κώδικα του μοντέλου πριν τη λέξη-κλειδί 'equation'. Στην **Εικόνα 98** παρουσιάζεται η δημιουργία τριών μεταβλητών στο λογισμικό Dymola, μια από κάθε είδος [68].

Πίνακας 6: Είδη μεταβλητών στη γλώσσα Modelica [68]

constant	Σταθερή μεταβλητή. Παραμένει αμετάβλητη σε όλες τις προσομοιώσεις του μοντέλου
parameter	Μεταβλητή παράμετρος. Μπορεί να μεταβάλλεται σε κάθε προσομοίωση. Κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης παραμένει σταθερή
discrete	Μεταβλητή διακριτού χρόνου. Δεν μπορεί να είναι πραγματικός αριθμός
(χωρίς διατύπωση)	Μεταβλητές οι οποίες θα υπολογιστούν κατά την προσομοίωση

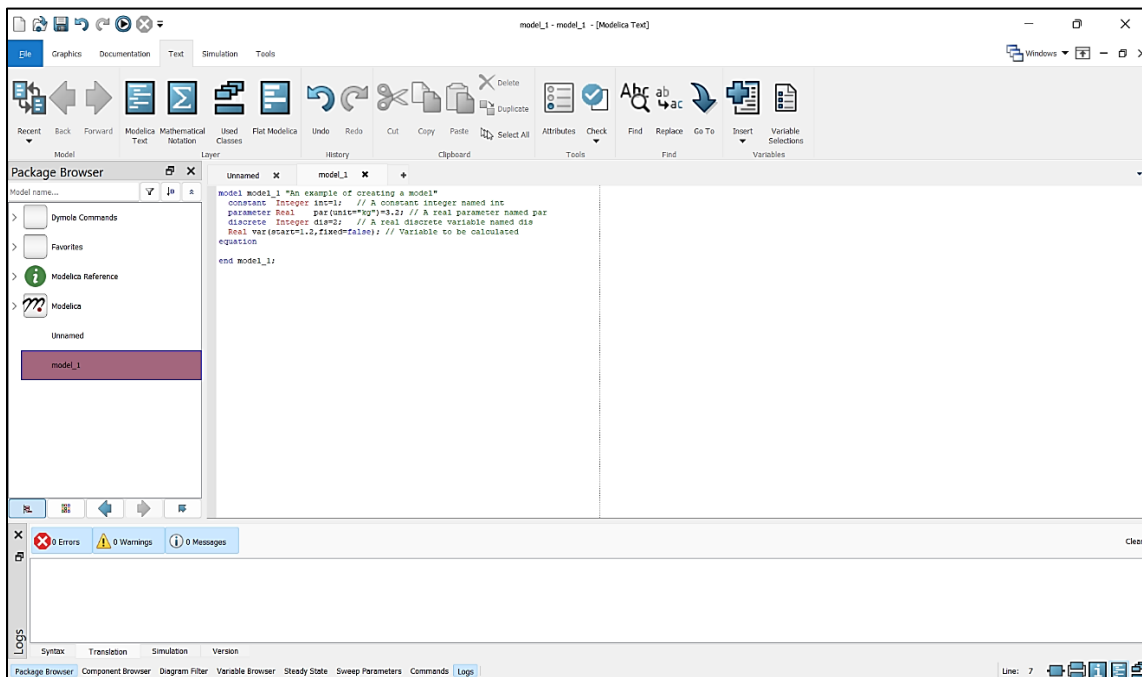


Εικόνα 98: Δημιουργία μεταβλητών στο λογισμικό Dymola [72]

Κατά τη διατύπωση μιας μεταβλητής, μπορούν να οριστούν και άλλες ιδιότητες αυτής. Στη Modelica, οι ιδιότητες των μεταβλητών ονομάζονται γνωρίσματα (attributes). Τα διαθέσιμα γνωρίσματα στη Modelica παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7**. Στην **Εικόνα 99** φαίνεται ο τρόπος που δηλώνεται ένα γνώρισμα σε μια μεταβλητή στο περιβάλλον του λογισμικού Dymola [68].

Πίνακας 7: Γνωρίσματα μεταβλητών στη γλώσσα Modelica [68]

quantity	Φυσική ποσότητα (π.χ. "Time"). Είναι μια περιγραφή της μεταβλητής η οποία δεν επηρεάζει την προσομοίωση
unit	Μονάδες μέτρησης μεταβλητής
max	Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μεταβλητής κατά την προσομοίωση
min	Ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή μεταβλητής κατά την προσομοίωση
start	Αρχικοποίηση μεταβλητής. Για μεταβλητές που θα υπολογιστούν κατά την προσομοίωση
fixed	Καθορίζει εάν η αρχικοποίηση είναι ακριβώς αυτή που δηλώθηκε στο 'start attribute'. Αν fixed=true, η αρχικοποίηση είναι ακριβής, αλλιώς αν fixed=false η αρχικοποίηση είναι ως βοήθημα για τον εντοπισμό της πραγματικής αρχικής τιμής
displayUnit	Μονάδες μέτρησης που θα παρουσιάζεται η μεταβλητή στα γραφικά αποτελέσματα της προσομοίωσης



Εικόνα 99: Δήλωση γνωρισμάτων (attributes) των μεταβλητών στο περιβάλλον Dymola [72]

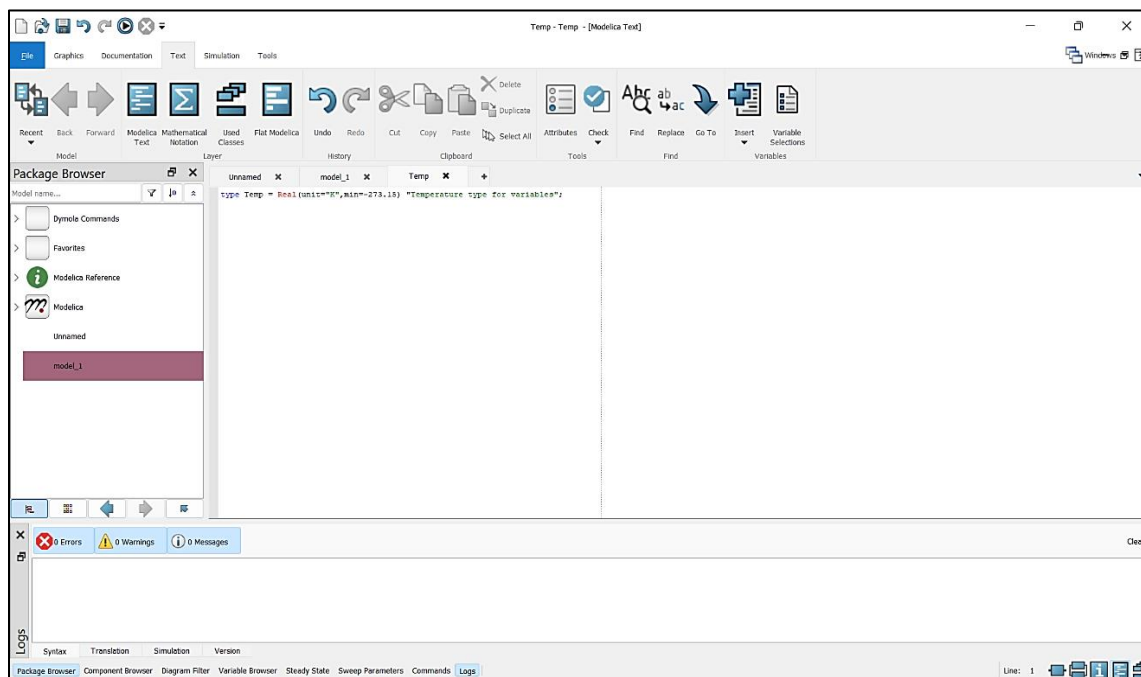
Μια ειδική μεταβλητή της Modelica είναι η μεταβλητή *'time'*. Η μεταβλητή *'time'* αντιπροσωπεύει τον χρόνο. Μπορεί να χρησιμοποιείται απευθείας σε συναρτήσεις ή σε έλεγχο γεγονότων χωρίς την επιπλέον απαίτηση από τον χρήστη να ορίζει πότε αυτή αυξάνεται, αλλά αυτό να γίνεται αυτόματα από το λογισμικό κατά τη ροή της προσομοίωσης [68].

7.3. Modelica: Τύποι (Types)

Οι τύποι των μεταβλητών στηρίζονται στους θεμελιώδεις υπάρχοντες τύπους της Modelica. Στον **Πίνακα 8** παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι στη Modelica. Βάση αυτών, μπορούν να δημιουργηθούν οι επιθυμητοί τύποι από τον χρήστη με τη χρήση των γνωρισμάτων. Στην **Εικόνα 100** παρουσιάζεται η δημιουργία ενός καινούριου τύπου, της θερμοκρασίας, η οποία στηρίζεται στον τύπο *'Real'*. Αυτή η τακτική συνήθως αποφεύγεται, αφού υπάρχουν πληθώρα έτοιμων τύπων μεταβλητών στη γλώσσα Modelica σε έτοιμες βιβλιοθήκες των μονάδων μέτρησης [68].

Πίνακας 8: Βασικοί τύποι στη γλώσσα Modelica [74]

Real	πραγματικός αριθμός
Integer	ακέραιος αριθμός
Boolean	0 ή 1 (false ή true)
String	χαρακτήρες
Enumeration	απαρίθμηση
Complex	μιγαδικοί αριθμοί



Εικόνα 100: Δημιουργία καινούριου τύπου (type) στο λογισμικό Dymola [72]

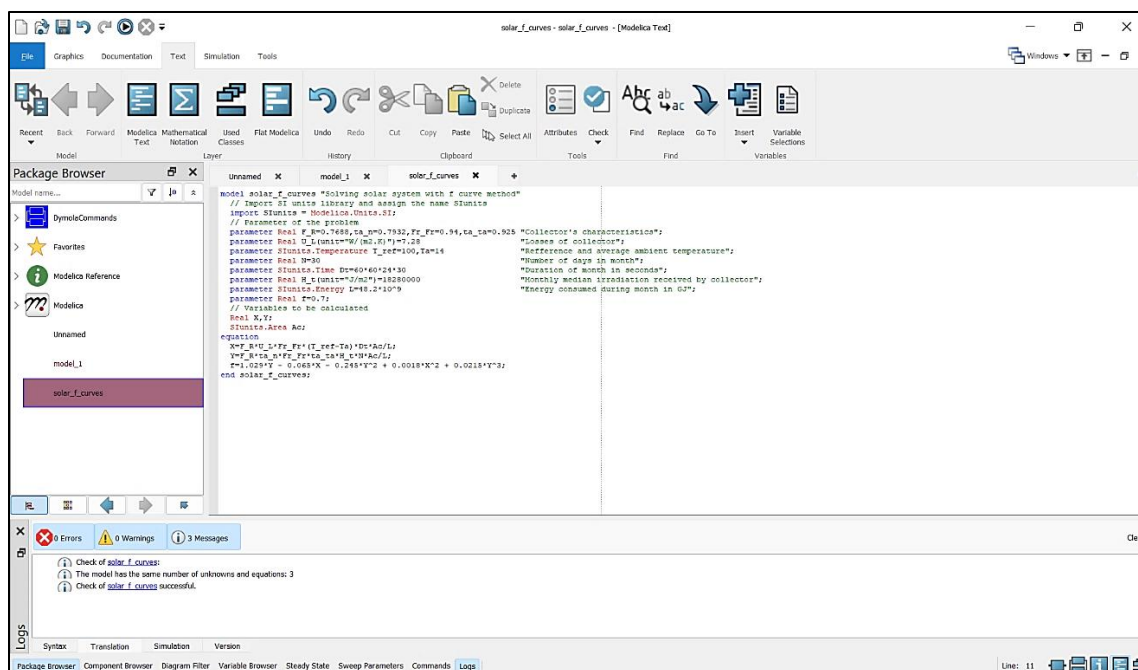
7.4. Modelica: Εξισώσεις (Equations)

Η προσομοίωση των μοντέλων στηρίζεται σε εξισώσεις. Δηλώνοντας μια εξίσωση, αυτό δε σημαίνει ότι δηλώνεται και η μεταβλητή ως προς την οποία θα επιλυθεί η συγκεκριμένη εξίσωση. Η Modelica συνδυάζει το σύστημα των εξισώσεων με τις μεταβλητές προς υπολογισμό, έτσι ώστε να εντοπίσει τη λύση που ικανοποιεί ταυτόχρονα όλες τις εξισώσεις. Τα είδη των εξισώσεων που μπορούν να δηλωθούν στη Modelica παρουσιάζονται στον **Πίνακα 9**. Οι πιο συνήθεις κατηγορίες είναι οι τρεις πρώτες, δηλαδή οι *'normal'*, *'declaration'* και *'modification'*.

Πίνακας 9: Είδη εξισώσεων στη γλώσσα Modelica [74]

normal	Κανονικές εξισώσεις προς επίλυση. Βρίσκονται στο τμήμα εξισώσεων ενός μοντέλου
declaration	Δηλωτικές εξισώσεις. Χρησιμοποιούνται στη διατύπωση μεταβλητών
modification	Εξισώσεις τροποποίησης. Χρησιμοποιούνται στη διατύπωση των γνωρισμάτων των μεταβλητών
binding	Δεσμευτικές εξισώσεις. Χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει συσχέτιση μεταβλητών του αντικειμένου με κάποια άλλη εξίσωση
initial equations	Εξισώσεις αρχικοποίησης. Χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αρχικών τιμών προς επίλυση του συστήματος εξισώσεων

Στην **Εικόνα 101** παρουσιάζεται ένα απλό πρόβλημα μόνιμων συνθηκών, με σκοπό την παρουσίαση της βασικής δομής ενός κώδικα στη Modelica. Ουσιαστικά, αντιπροσωπεύει τη «μέθοδο των καμπυλών f» που βρίσκει εφαρμογή στους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Αφού δημιουργηθεί το μοντέλο, στη συνέχεια ορίζονται οι μεταβλητές του προβλήματος. Στο τμήμα των εξισώσεων, το οποίο ορίζεται από τη λέξη *'equation'* μέχρι τη λέξη *'end'*, δηλώνονται οι εξισώσεις που μοντελοποιούν το πρόβλημα. Πατώντας την επιλογή *'Check'* που βρίσκεται στην ενότητα *'Tools'* της καρτέλας κειμένου (όπως και στην καρτέλα γραφικών), το λογισμικό ελέγχει εάν έχουν διατυπωθεί όλα σωστά με βάση τη γλώσσα Modelica και εάν ο αριθμός των εξισώσεων είναι ίσος με τον αριθμό των αγνώστων μεταβλητών. Στο αρχείο καταγραφής του λογισμικού (Logs) στο κάτω μέρος της οθόνης, εμφανίζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου. Αυτό που θα πρέπει να γίνει κατανοητό είναι ότι, ο τρόπος που διατυπώνονται οι εξισώσεις δεν προσδιορίζει τις επιθυμητές μεταβλητές προς υπολογισμό. Αυτές καθορίζονται από τον χρήστη ως αδήλωτες μεταβλητές πριν το τμήμα του κώδικα που περιλαμβάνει τις εξισώσεις. Στο παράδειγμα που ακολουθεί στην **Εικόνα 101**, οι μεταβλητές που θα υπολογιστούν είναι οι X, Y και Ac. Πολύ σημαντικό στοιχείο του κώδικα στη γλώσσα Modelica αποτελεί το ελληνικό ερωτηματικό (;) το οποίο δηλώνει το τέλος μιας γραμμής εντολών [68].



Εικόνα 101: Διατύπωση παραδείγματος προβλήματος μόνιμων συνθηκών στο περιβάλλον Dymola [72]

7.5. Modelica: if, for, while, when

Μια σημαντική δυνατότητα στη γλώσσα Modelica είναι ο έλεγχος. Όπως και στις περισσότερες γλώσσες προγραμματισμού, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης των *'if-clauses'*, *'for-clauses'* και *'while-clauses'*. Επιπλέον αυτών, υπάρχει και η δυνατότητα ενός άλλου είδους ελέγχου μέσω των *'when-clauses'*. Κατά τον ορισμό των συνθηκών, ορίζονται οι συγκριτικοί τελεστές του μεγαλύτερου (>), μεγαλύτερου ίσου (>=), μικρότερου (<), μικρότερου ίσου (<=) και ίσου (==). Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι σε περίπτωση που η σύγκριση αφορά πραγματικό αριθμό, ο τελεστής ισότητας (==) δεν επιτρέπεται. Οι λογικοί τελεστές εκφράζονται με λέξεις-κλειδιά της Modelica όπως είναι οι *'and'*, *'or'* και *'not'*. Οι δύο ειδών δυνατές διατυπώσεις ενός *'if-clause'* παρουσιάζονται στο **Σχήμα 12**. Στην πρώτη μορφή δεν συμπεριλαμβάνονται εξισώσεις μέσα στο *'if-clause'*. Μια πολύ σημαντική παρατήρηση όσον αφορά τα *'if-clauses'* είναι ότι, όταν είναι μέρος ενός ευρύτερου κώδικα σε ένα μοντέλο, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι σε κάθε σενάριο ο αριθμός των αγνώστων παραμένει ίσος με τον αριθμό των εξισώσεων. Στο **Σχήμα 13** παρουσιάζονται οι διατυπώσεις των *'while-clauses'* και *'for-clauses'* [68].

Πρώτη μορφή διατύπωσης if-clause:

```
var_1 = if condition_1 then expr_1 else if condition_2 then expr_2 else expr_3;
```

Δεύτερη μορφή διατύπωσης if-clause:

```
if condition_1 then
equations;
else if condition_2 then
equations;
else
equations;
end if;
```

Σχήμα 12: Διατύπωση 'if-clause' σε γλώσσα Modelica [68]

Διατύπωση while-clause:

```
while condition_1 loop
equations;
end while;
```

Διατύπωση for-clause:

```
for i in 1:n loop
equations;
end for;
```

Σχήμα 13: Διατύπωση 'while-clause' και 'for-clause' σε γλώσσα Modelica [68]

Τα 'when-clauses' είναι μια επιπλέον δυνατότητα πέραν των βασικών διατυπώσεων ελέγχου. Στο **Σχήμα 14** παρουσιάζεται η διατύπωση του 'when-clause'. Όταν η συνθήκη ενός 'when-clause' (που είναι μια 'Boolean' συνθήκη) ενεργοποιηθεί, δηλαδή γίνει αληθής (true), τότε το περιεχόμενο του εκτελείται στιγμιαία. Στη δεύτερη διατύπωση, το περιεχόμενο εκτελείται κάθε φορά που μία εκ των συνθηκών ενεργοποιείται [68].

Πρώτη μορφή διατύπωσης when-clause:

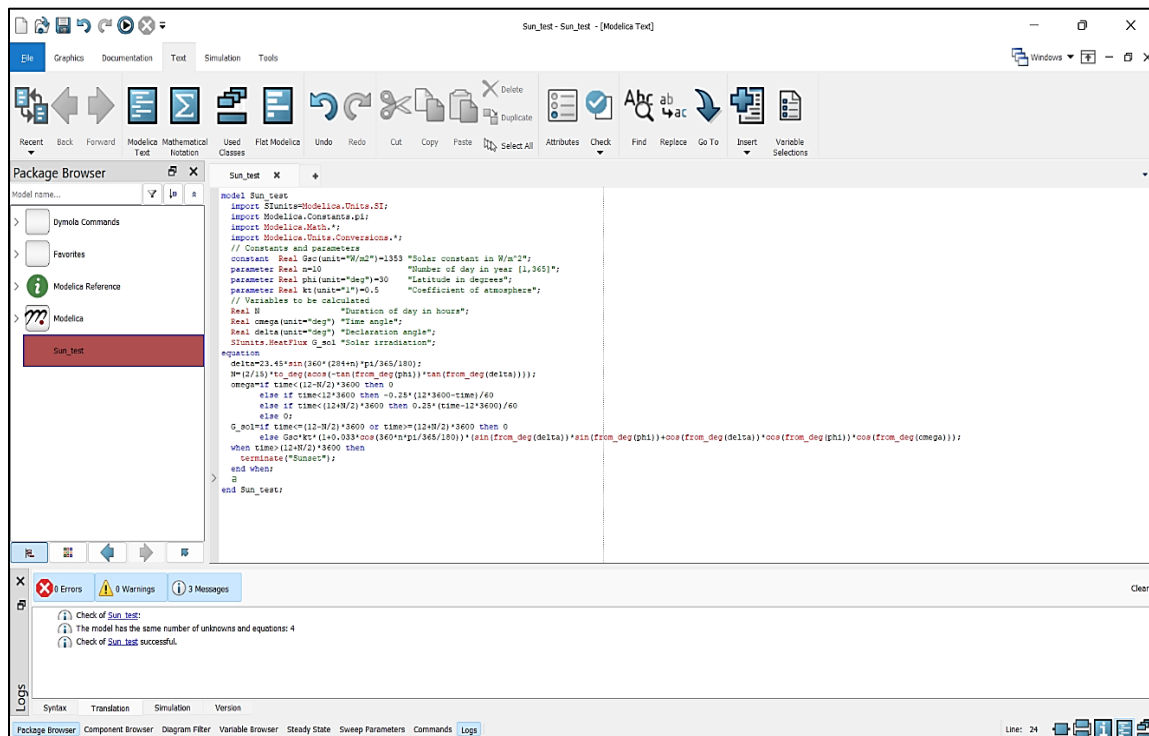
```
when condition_1 then
instantaneous equations;
end when;
```

Δεύτερη μορφή διατύπωσης when-clause:

```
when {condition_1, ..., condition_n} then
instantaneous equations;
end when;
```

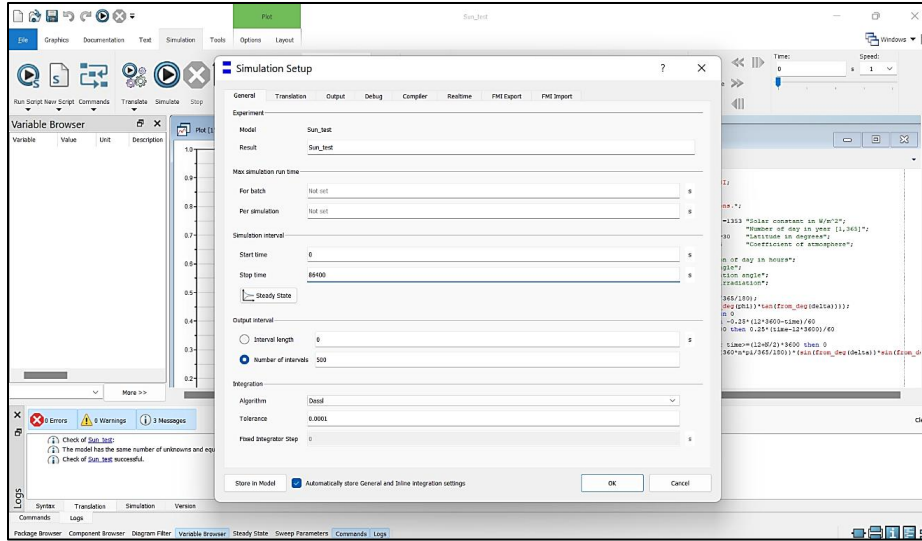
Σχήμα 14: Διατύπωση 'when-clause' σε γλώσσα Modelica [68]

Στην **Εικόνα 102** παρουσιάζεται μια μοντελοποίηση ενός μη μόνιμου προβλήματος, της μεταβολής της στιγμιαίας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Πατώντας την επιλογή 'Check' που βρίσκεται στην ενότητα 'Tools' της καρτέλας 'Text', το λογισμικό ελέγχει εάν έχουν διατυπωθεί όλα σωστά με βάση τη γλώσσα Modelica και εάν ο αριθμός των εξισώσεων είναι ίσος με τον αριθμό των αγνώστων μεταβλητών. Η χρήση του 'if-clause' γίνεται για τον υπολογισμό μεγεθών σε χρονικές στιγμές πριν και μετά το ηλιακό μεσημέρι. Η εντολή 'terminate' η οποία βρίσκεται στο 'when-clause' τερματίζει τη ροή του προγράμματος όταν ο ήλιος δύσει. Για χάρην απλότητας, ο δείκτης αιθριότητας θεωρήθηκε σταθερός κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ η ωριαία γωνία θεωρείται μηδενική πριν την ανατολή και μετά τη δύση [68].



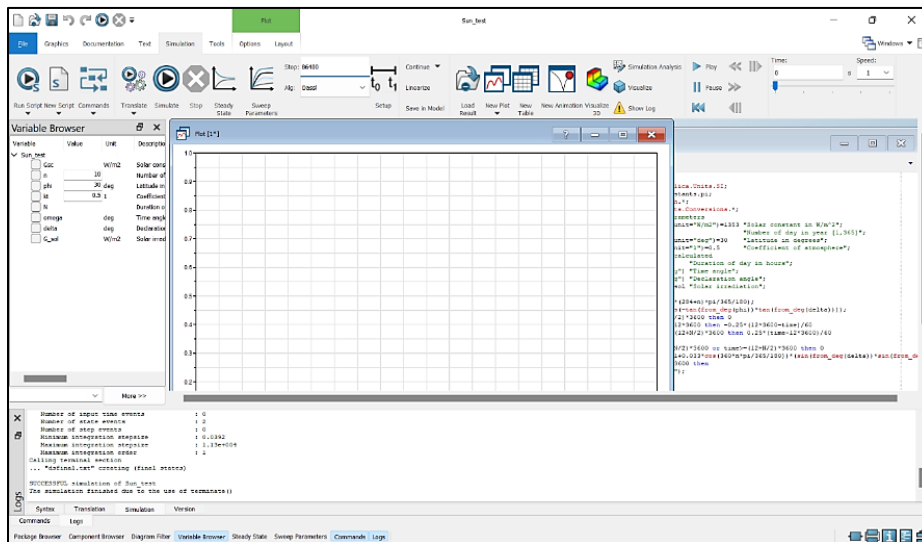
Εικόνα 102: Διατύπωση παραδείγματος προβλήματος μη μόνιμων συνθηκών στο περιβάλλον Dymola [72]

Μεταβαίνοντας στην καρτέλα προσομοίωσης μπορεί να γίνει προσομοίωση του μοντέλου. Στο πεδίο 'Stop' της καρτέλας εισάγεται η επιθυμητή χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Στο πεδίο 'Alg' εισάγεται η μέθοδος επίλυσης του συστήματος εξισώσεων. Η προεπιλεγμένη μέθοδος είναι η «Dassl», η οποία αντιστοιχεί στη μέθοδο «Newton». Το λογισμικό Dymola δίνει πληθώρα επιλογών μεθόδων επίλυσης, μεταξύ αυτών και των μεθόδων «Euler» και «Runge-Kutta». Περισσότερες ρυθμίσεις που αφορούν την προσομοίωση μπορούν να γίνουν επιλέγοντας το 'Setup'. Στην **Εικόνα 103** παρουσιάζεται το παράθυρο 'Setup'. Πατώντας το 'Translate', δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής των αρχικών συνθηκών μέσω του παραθύρου 'Variable Browser'. Αφού γίνουν οι κατάλληλες επιλογές, πατώντας το 'Simulate' εκτελείται η προσομοίωση [72].

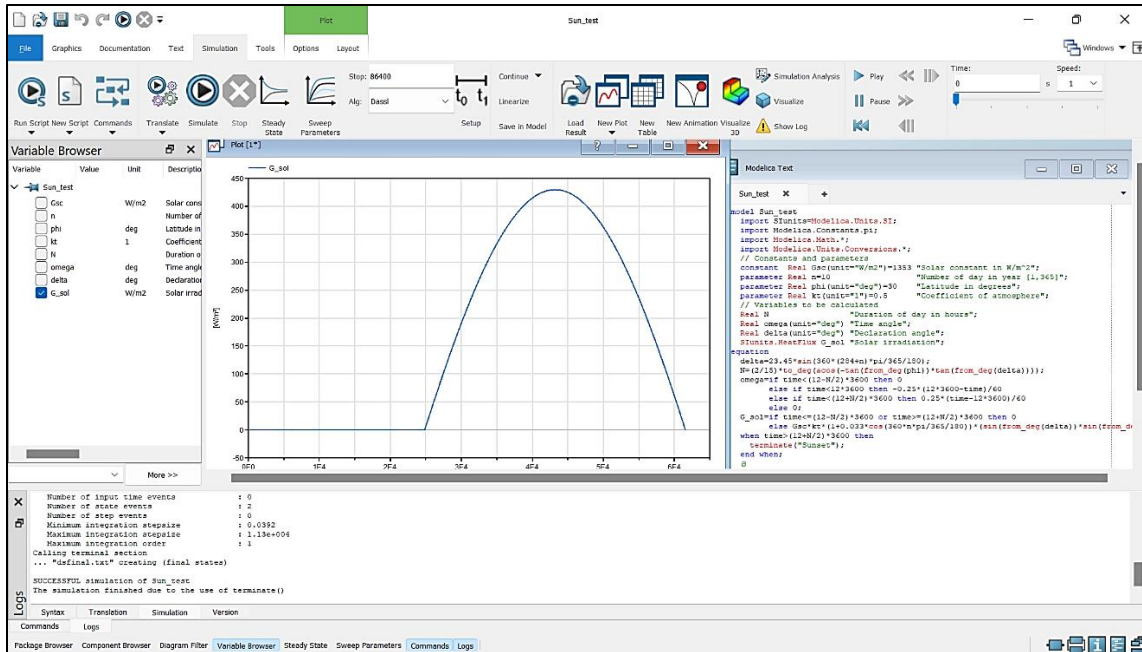


Εικόνα 103: Ρυθμίσεις προσομοίωσης (Simulation Setup) στο λογισμικό Dymola [72]

Στην **Εικόνα 104** παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Στο αρχείο καταγραφής του λογισμικού αναγράφεται η φράση 'SUCCESSFUL simulation' που υποδηλώνει ότι η διαδικασία της προσομοίωσης εκτελέστηκε με επιτυχία. Στο παράθυρο 'Variable Browser' φαίνονται όλα τα αποτελέσματα των μεταβλητών του μοντέλου. Επιλέγοντας οποιαδήποτε μεταβλητή (μία ή περισσότερες) είναι δυνατή η αναπαράσταση της χρονικής της μεταβολής σε διάγραμμα στο παράθυρο 'Plot'. Στην **Εικόνα 105** παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση μιας τέτοιας μεταβλητής στο παράθυρο 'Plot'. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι το λογισμικό Dymola αναπαριστά τις μεταβλητές ως προς το χρόνο. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητό να επιλεγεί κάποια άλλη μεταβλητή ως ανεξάρτητη, αυτό μπορεί να γίνει στο παράθυρο 'Plot' (αφού έχει ήδη επιλεγεί η μεταβλητή από το παράθυρο 'Variable Browser' στα αριστερά) ακολουθώντας τη σειρά εντολών 'δεξιά κλικ → Independent Variable' και επιλογή της επιθυμητής μεταβλητής [72].



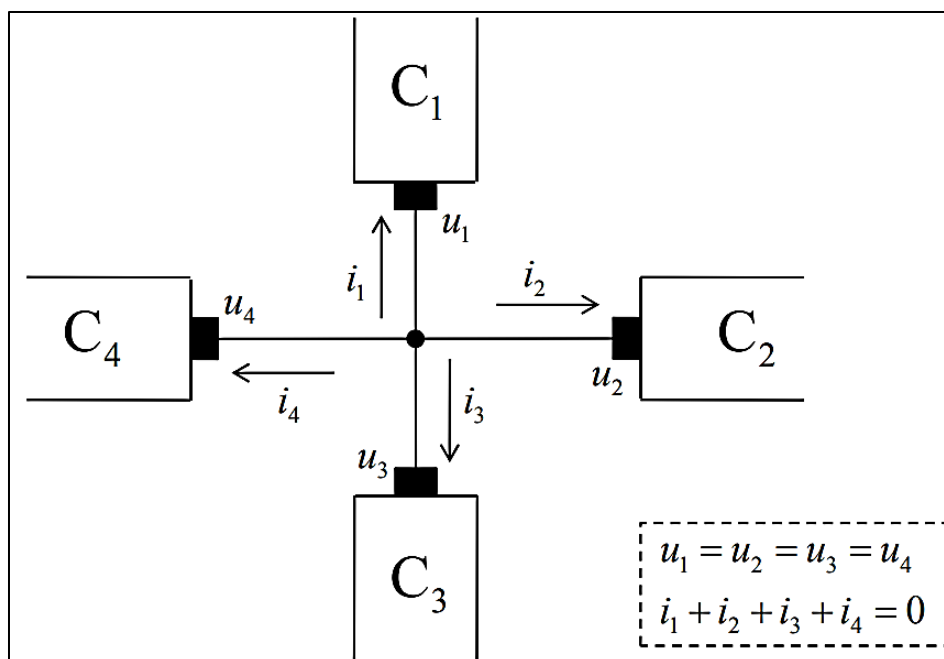
Εικόνα 104: Επιτυχής προσομοίωση (SUCCESSFUL Simulation) στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 105: Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων στο λογισμικό Dymola [72]

7.6. Modelica: Σύνδεσμοι (Connectors)

Οι διασυνδέσεις μεταξύ των αντικειμένων εκφράζουν τον τρόπο επικοινωνίας και ανταλλαγής πληροφοριών. Οι κλάσεις που επιτρέπουν αυτή την επικοινωνία ονομάζονται σύνδεσμοι (connectors). Στους συνδέσμους επιτρέπεται μόνο η δήλωση μεταβλητών και όχι η δήλωση εξισώσεων. Οι μεταβλητές αυτές μπορούν να είναι δύο ειδών, είτε *'across variables'* είτε *'threw variables'*. Οι *'across'* μεταβλητές δηλώνονται απλά αναγράφοντας τον τύπο τους και στη συνέχεια το όνομα τους. Οι *'threw'* μεταβλητές δηλώνονται αναγράφοντας την λέξη-κλειδί *'flow'* πριν την δήλωση του τύπου της μεταβλητής. Όταν δύο αντικείμενα είναι συνδεδεμένα, τότε μια *'across'* μεταβλητή μεταφέρεται από το ένα στο άλλο ως έχει. Αντίθετα, αν μια μεταβλητή είναι *'threw'*, τότε το άθροισμα των μεταβλητών αυτών που βρίσκονται σε μία σύνδεση πρέπει να είναι μηδενικό. Επομένως, μια μεταβλητή που εξέρχεται από ένα αντικείμενο με θετική τιμή, εισέρχεται στο άλλο αντικείμενο που επικοινωνεί με αυτό με αρνητικό πρόσημο. Στην **Εικόνα 106** φαίνεται παραστατικά η συσχέτιση που μόλις έχει περιγράψει [68].



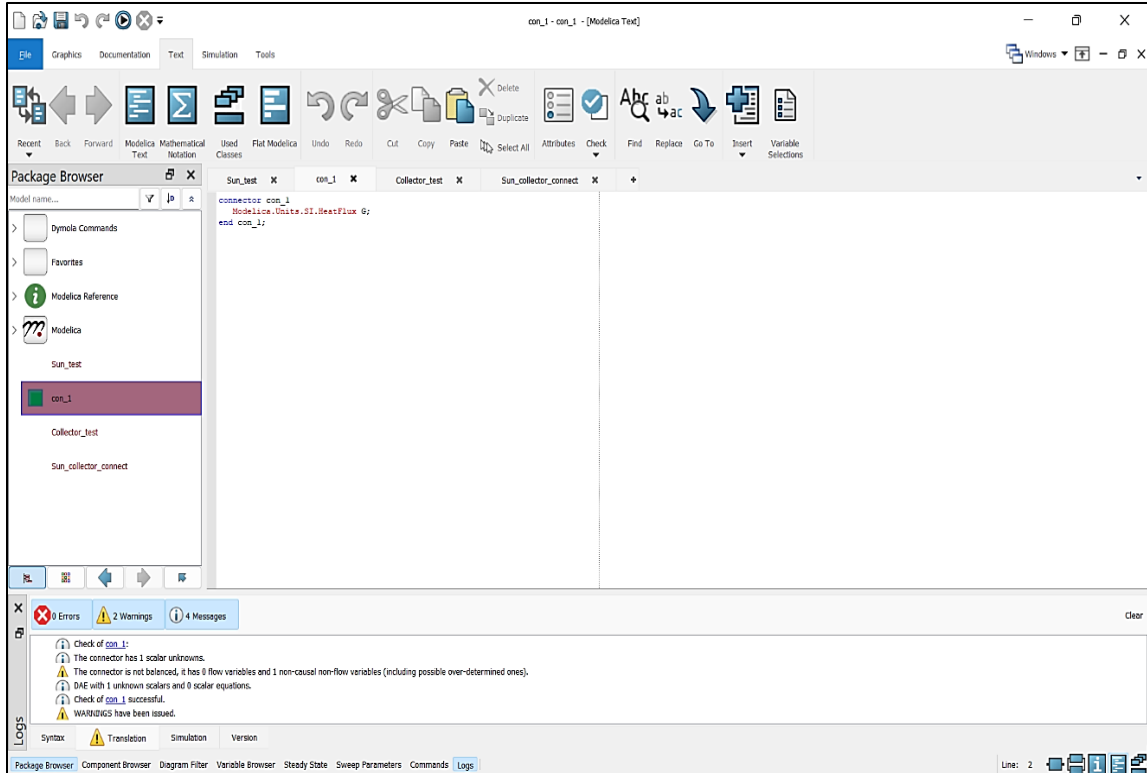
Εικόνα 106: Σύγκριση μεταβλητών τύπου ‘across’ (u_i) και τύπου ‘threw’ (i_i) [68]

Σε έναν σύνδεσμο είναι δυνατή η δήλωση οποιουδήποτε συνδυασμού τύπων μεταβλητών. Σε περίπτωση που ο αριθμός των μεταβλητών ‘across’ δεν είναι ίδιος με τον αριθμό των μεταβλητών ‘threw’, το λογισμικό Dymola κατά τον έλεγχο αναφέρει προειδοποιήσεις (warnings). Αυτές οι προειδοποιήσεις δεν επηρεάζουν την επίλυση των μοντέλων που θα επικοινωνούν με τη χρήση αυτών των συνδέσμων, αρκεί το τελικό σύστημα εξισώσεων να έχει ίσο αριθμό άγνωστων μεταβλητών και εξισώσεων. Αφού δημιουργηθούν οι απαραίτητοι σύνδεσμοι, τότε η σύνδεση μεταξύ δύο αντικειμένων δηλώνεται με τη μορφή εξισώσεων. Στο **Σχήμα 15** παρουσιάζεται η μορφή μιας εξίσωσης σύνδεσης αντικειμένων. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το λογισμικό Dymola, συνδέοντας γραφικά δυο αντικείμενα η αντίστοιχη εξίσωση σύνδεσης διατυπώνεται αυτόματα [72].

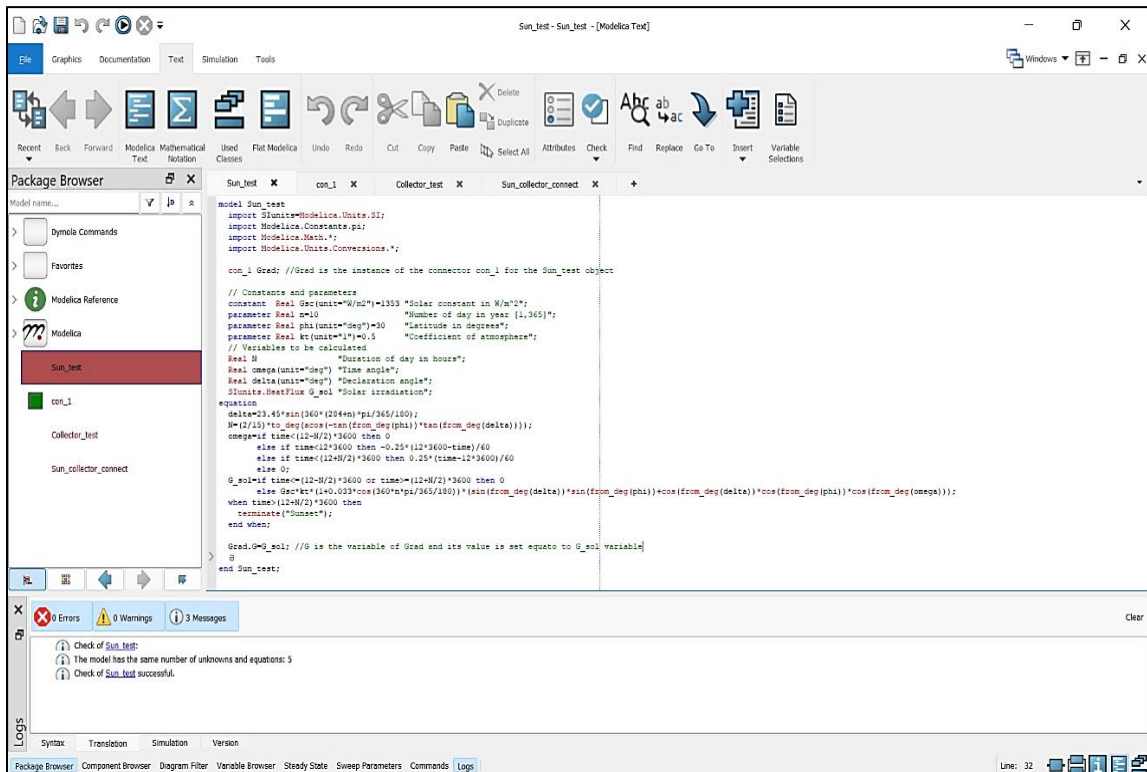
```
connect(component_1.connector_1, component_2.connector_2);
```

Σχήμα 15: Διατύπωση εξίσωσης ‘connect’ σε γλώσσα Modelica [68]

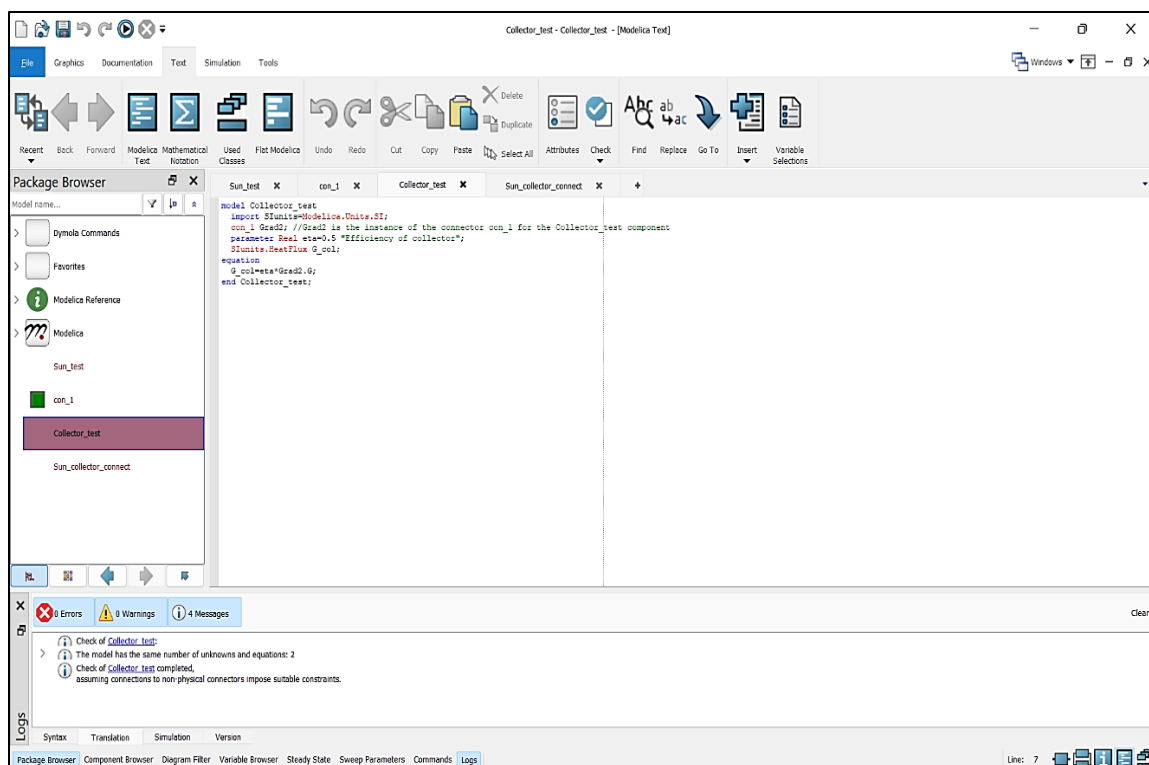
Στο παράδειγμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια απλή περίπτωση σύνδεσης αντικειμένων στο λογισμικό Dymola χρησιμοποιώντας τη γλώσσα Modelica. Υπενθυμίζεται ότι το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα γραφικής σύνδεσης. Αρχικά, δημιουργείται ένας σύνδεσμος (εν ονόματι «con_1») ο οποίος θα μεταφέρει την τιμή της ακτινοβολίας από το ένα αντικείμενο (το «Sun_test») στο άλλο (το «Collector_test»). Το μοντέλο του συνδέσμου «con_1» παρουσιάζεται στην **Εικόνα 107**. Το μοντέλο του πρώτου αντικειμένου, δηλαδή του «Sun_test», παρουσιάζεται στην **Εικόνα 108**. Στην **Εικόνα 109** παρουσιάζεται το μοντέλο του δεύτερου αντικειμένου, του «Collector_test». Στην **Εικόνα 110** παρουσιάζεται το μοντέλο που αποτελεί τη σύνδεση των δύο. Στην **Εικόνα 111** παρουσιάζονται γραφικά μερικά από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης [72].



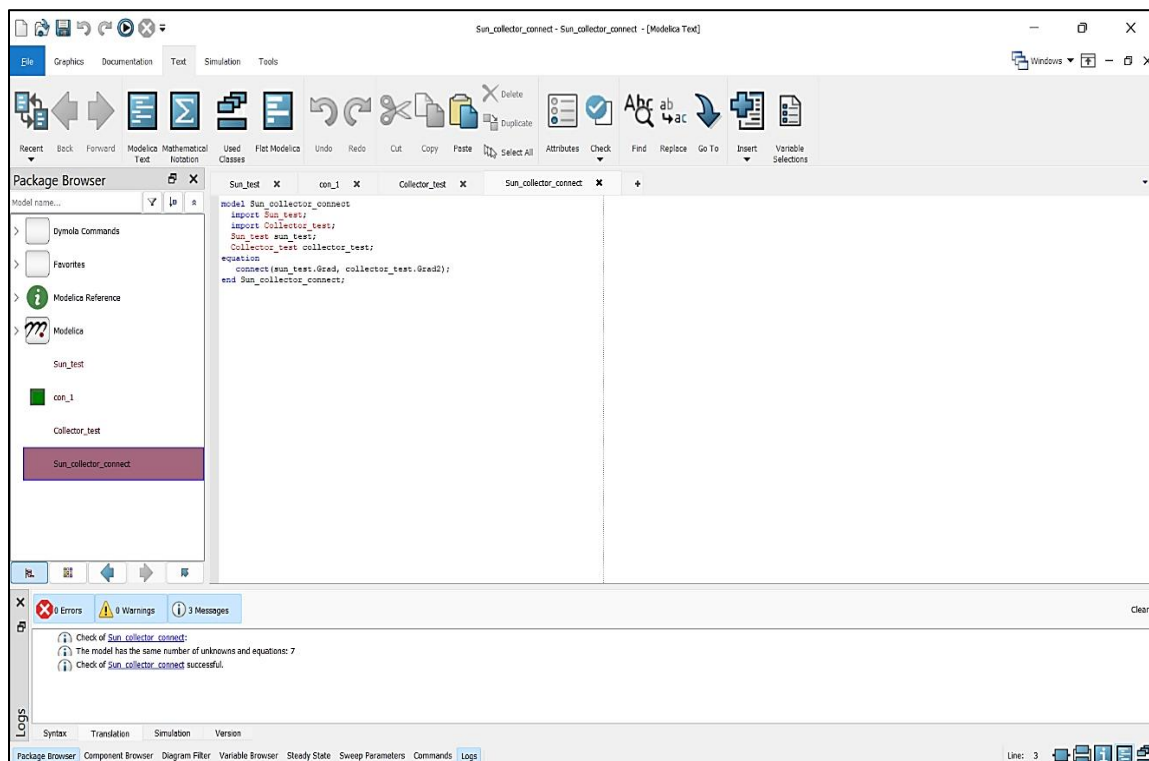
Εικόνα 107: Δημιουργία συνδέσμου (connector) στο λογισμικό Dymola [72]



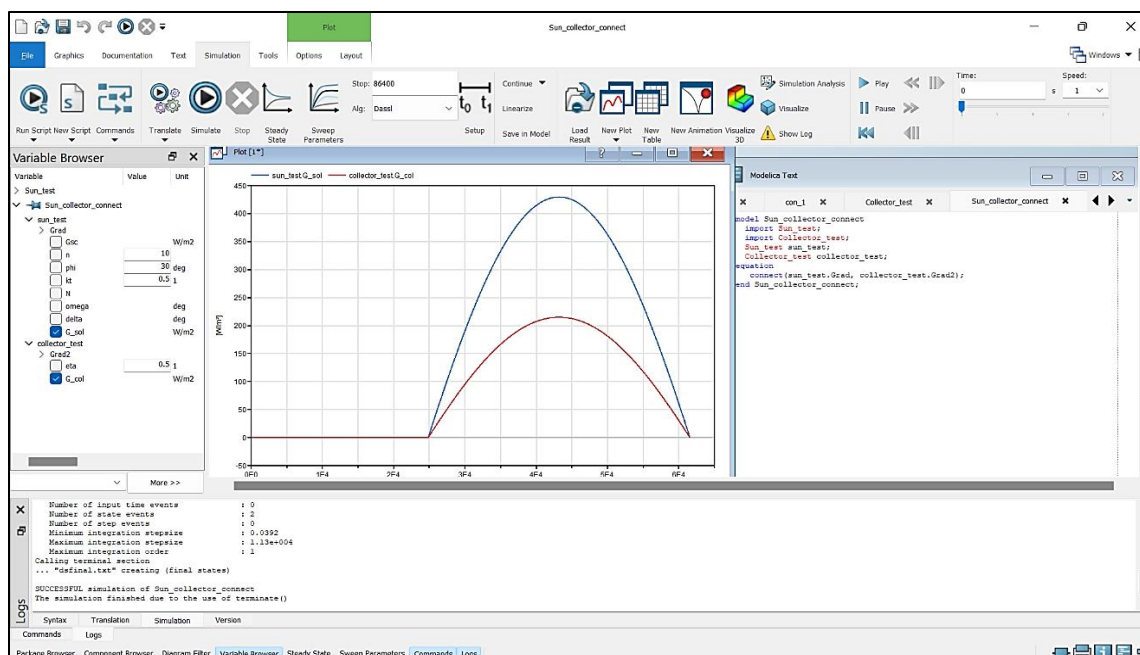
Εικόνα 108: Μοντέλο αντικειμένου «Sun_test» με σύνδεσμο στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 109: Μοντέλο αντικειμένου «Collector_test» με σύνδεσμο στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 110: Μοντέλο σύνδεσης δύο αντικειμένων στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 111: Προσομοίωση και ενδεικτικά αποτελέσματα μοντέλου σύνδεσης δύο αντικειμένων στο λογισμικό Dymola [72]

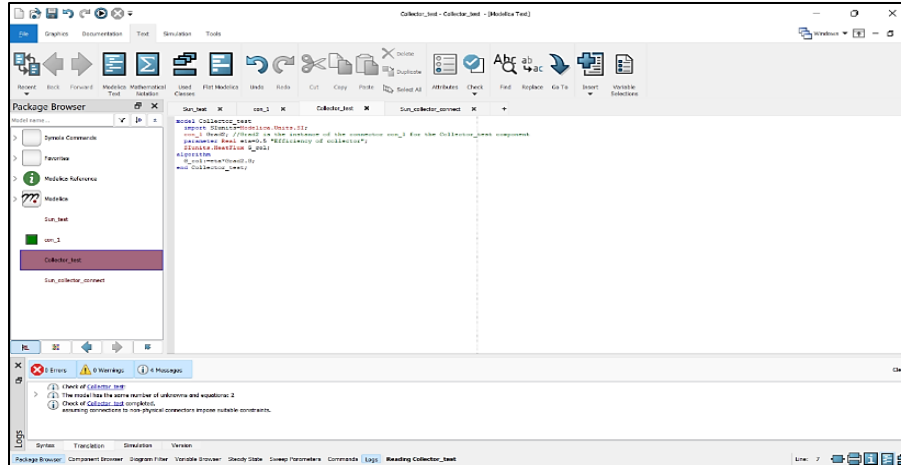
Σε περίπτωση που μια μεταβλητή ‘*threw*’ δεν συνδεθεί σε κάποιο αντικείμενο, τότε το λογισμικό δημιουργεί αυτόματα μια επιπλέον εξίσωση που θέτει το άθροισμα των μεταβλητών ‘*threw*’ στη σύνδεση ίσο με το μηδέν. Αυτό, δημιουργεί προειδοποιητικά μηνύματα (warnings) από το λογισμικό κατά τον έλεγχο μεμονωμένων αντικειμένων που απαρτίζουν το γενικό σύστημα προς μοντελοποίηση. Το σημαντικό είναι να μην δημιουργείται κάποιο σφάλμα κατά τον έλεγχο του τελικού μοντέλου που περιγράφει τη σύνδεση των αντικειμένων του συστήματος [72].

7.7. Modelica: Αλγόριθμοι (Algorithms)

Οι αλγόριθμοι είναι σαν εξισώσεις αλλά με μια ειδοποιώ διαφορά. Στους αλγόριθμους ορίζεται η υπολογιστική αιτιότητα. Στο **Σχήμα 16** παρουσιάζεται η διατύπωση ενός αλγόριθμου. Η μεταβλητή που βρίσκεται στα αριστερά της εξίσωσης είναι αυτή που θα υπολογιστεί από την συγκεκριμένη εξίσωση κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Έτσι, σε περιπτώσεις που είναι γνωστή η ροή των μεταβλητών κατά τους υπολογισμούς σε ένα πρόβλημα, προτιμάται η χρήση αλγορίθμων προς διευκόλυνση της διαδικασίας επίλυσης από το λογισμικό. Οι αλγόριθμοι δηλώνονται σε ξεχωριστό τμήμα ενός μοντέλου, το οποίο ορίζεται με τη λέξη-κλειδί ‘*algorithm*’. Στην **Εικόνα 112** παρουσιάζεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε προηγουμένως στην **Εικόνα 109**, αλλά με τη χρήση αλγορίθμου. Η ταυτόχρονη χρήση αλγορίθμων και εξισώσεων σε ένα μοντέλο είναι επιτρεπτή [68].

```
var_1:=expression_1;
```

Σχήμα 16: Διατύπωση εξίσωσης αλγορίθμου (*algorithm*) σε γλώσσα Modelica [68]



Εικόνα 112: Παράδειγμα διατύπωσης αλγορίθμου στο λογισμικό Dymola [72]

7.8. Modelica: Συναρτήσεις (Functions)

Οι συναρτήσεις (functions) αποτελούν μια ειδική κατηγορία των μοντέλων. Δημιουργώντας μια συνάρτηση και δηλώνοντας τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται, αυτή μπορεί πλέον να καλείται στην κανονική δομή του κώδικα. Σε μια συνάρτηση όλες οι μεταβλητές θα πρέπει να δηλώνονται κατά πόσο θα είναι μεταβλητές εισόδου (input) η εξόδου (output). Οποιαδήποτε άλλη δήλωση είδους μεταβλητής δεν επιτρέπεται. Επιπλέον, μια συνάρτηση επιτρέπεται να έχει μόνο αλγορίθμους και δεν επιτρέπεται να περιλαμβάνει κανονικές εξισώσεις. Στο **Σχήμα 17** παρουσιάζεται ο τρόπος διατύπωσης μιας συνάρτησης, καθώς επίσης και ο τρόπος που καλείται στην κανονική δομή του κώδικα σε γλώσσα Modelica [68].

Δημιουργία function:

```
function fun_1;
input var_type inp_1;
.....
input var_type inp_n;
output var_type out_1;
.....
output var_type out_m;
algorithm
out_1:=expression_1(inputs);
.....
out_m:=expression_2(inputs);
end fun_1;
```

Κλήση function σε κώδικα Modelica:

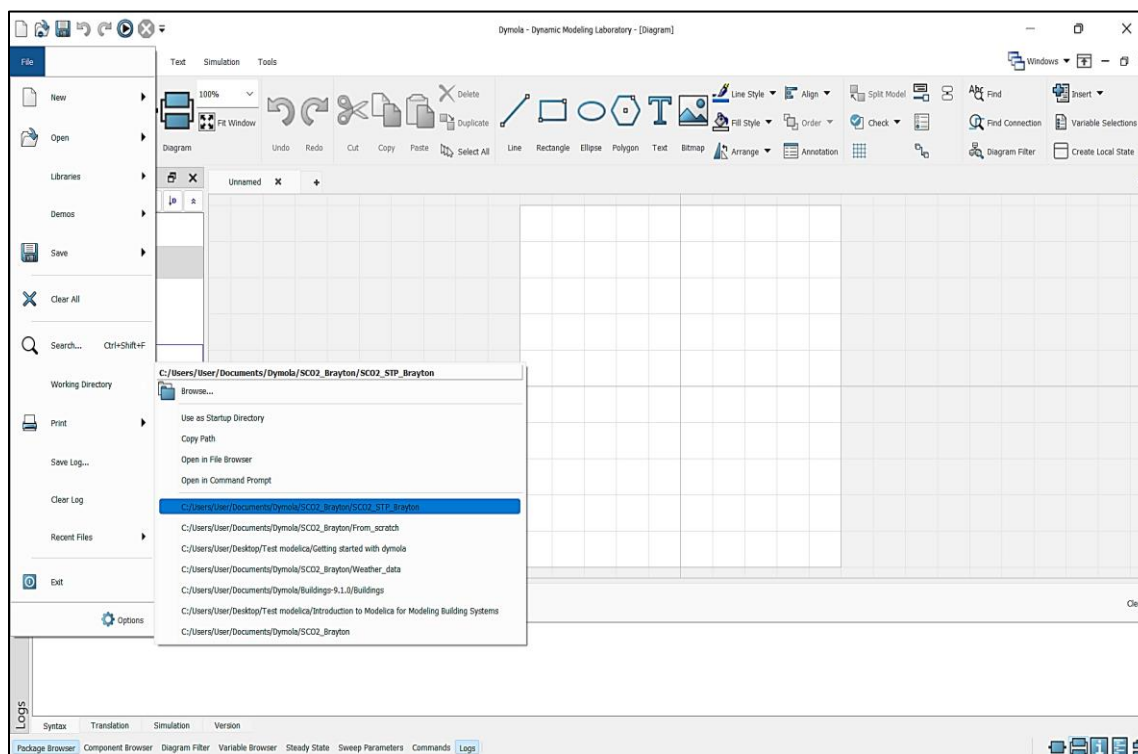
(out_1,...,out_m)=fun_1(inp_1=val_1,...,inp_n=val_n);

Σχήμα 17: Διατύπωση συνάρτησης (function) στη γλώσσα Modelica [68]

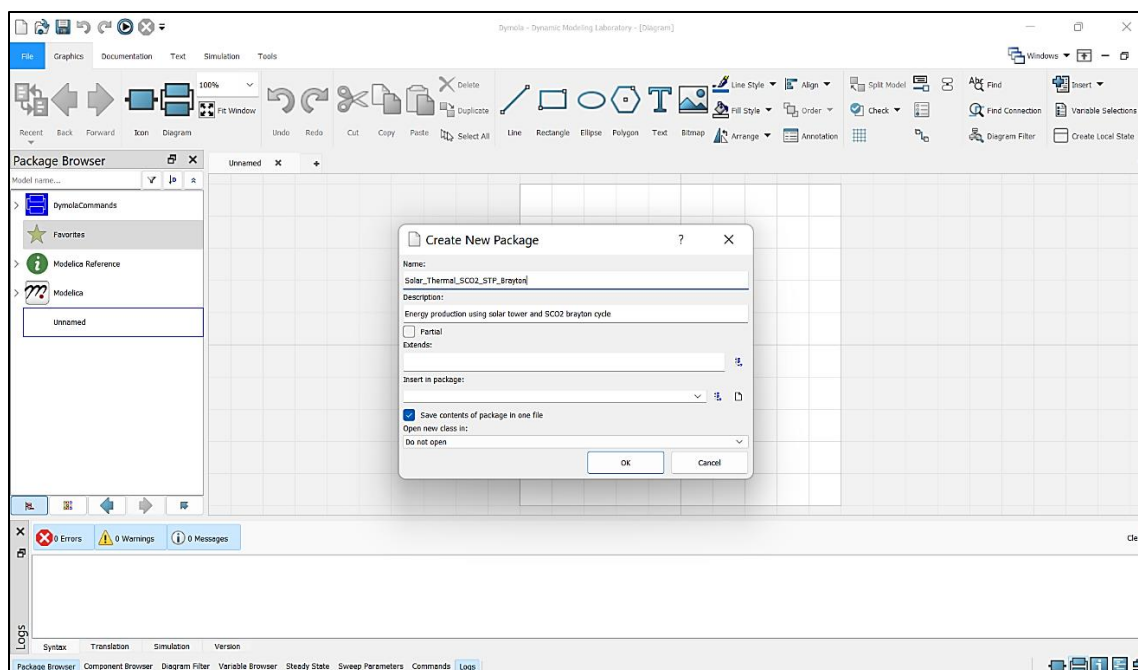
8. Μοντελοποίηση STP με Modelica

8.1. Μοντελοποίηση βιβλιοθηκών (packages modelling)

Η ιεράρχηση και η κατηγοριοποίηση των μοντέλων είναι πολύ σημαντική στη Modelica. Για σκοπούς καλύτερης οργάνωσης, θα δημιουργηθεί μια καινούρια βιβλιοθήκη η οποία θα ονομάζεται «Solar_Thermal_SCO2_STP_Brayton», μέσα στην οποία θα δημιουργηθούν όλα τα απαραίτητα μοντέλα που θα χρειαστούν για τη μοντελοποίηση του τελικού συστήματος. Αρχικά, θα τεθεί σε λειτουργία το λογισμικό Dymola και θα επιλεγθεί ως θέση εργασίας (working directory) ένας νέος φάκελος που έχει δημιουργηθεί στο λειτουργικό σύστημα για την εν λόγω μοντελοποίηση, ο φάκελος «SCO2_STP_Brayton». Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην **Εικόνα 113**. Στη συνέχεια, δημιουργείται η νέα βιβλιοθήκη (package) που θα αντιπροσωπεύει την κεντρική βιβλιοθήκη των μοντέλων, η οποία όπως έχει προαναφερθεί θα είναι η «Solar_Thermal_SCO2_STP_Brayton». Για τη δημιουργία της εκτελείται η σειρά εντολών 'File→New→Package'. Στο παράθυρο που εμφανίζεται, εισάγονται στα αντίστοιχα πεδία το όνομα (Name) και η βασική περιγραφή (Description) που αντιστοιχούν στη βιβλιοθήκη. Η δημιουργία της εν λόγω βιβλιοθήκης παρουσιάζεται στην **Εικόνα 114**. Πατώντας 'OK', η βιβλιοθήκη αυτή δημιουργείται και εμφανίζεται αριστερά στο παράθυρο του λογισμικού στο τμήμα των βιβλιοθηκών (Package Browser) [72].

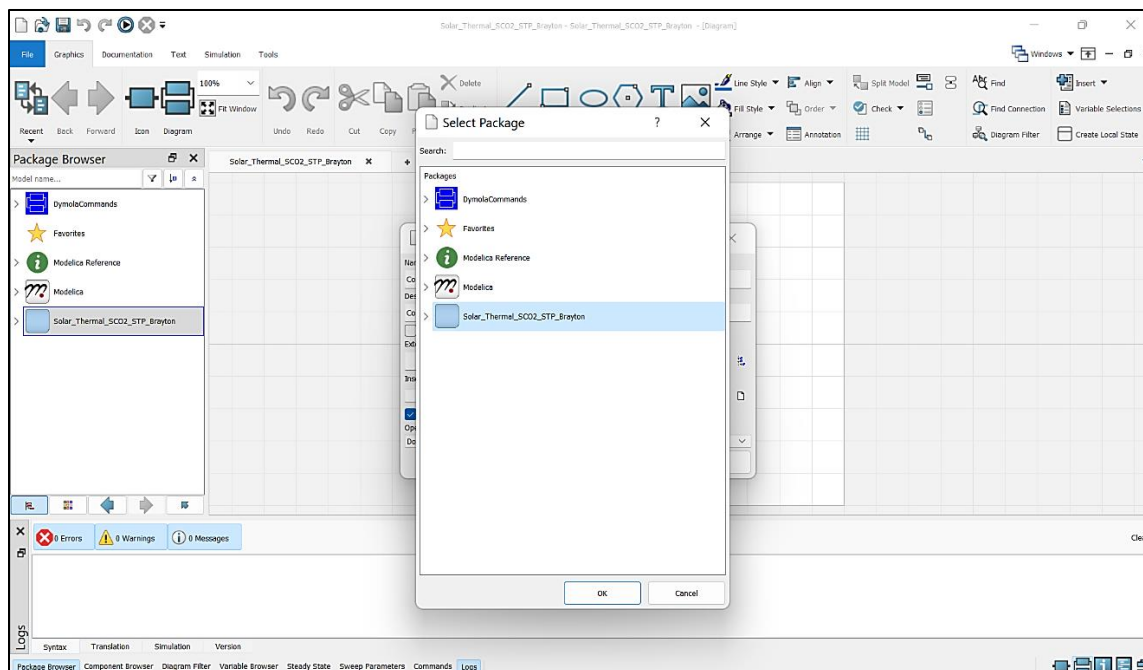


Εικόνα 113: Επιλογή θέσης εργασίας (working directory) στο λογισμικό Dymola [72]

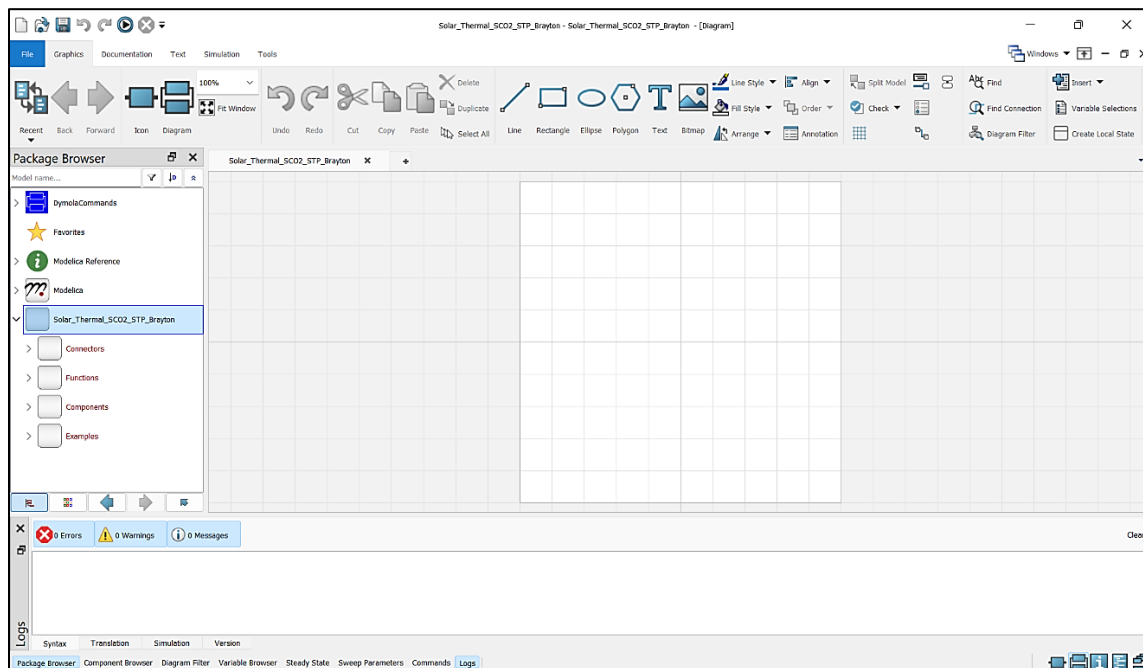


Εικόνα 114: Δημιουργία κεντρικής βιβλιοθήκης στο λογισμικό Dymola [72]

Με τον ίδιο τρόπο δημιουργούνται και οι υπόλοιπες βιβλιοθήκες που θα χρειαστούν για την καλύτερη οργάνωση της μοντελοποίησης του συστήματος. Για να εισαχθεί μια βιβλιοθήκη μέσα σε μια προϋπάρχουσα, αυτό θα πρέπει να οριστεί στο πεδίο εισαγωγής σε βιβλιοθήκη (Insert in package) το οποίο φαίνεται στην **Εικόνα 114**. Επιλέγοντας το εικονίδιο επιλογής βιβλιοθήκης (Select Package) που βρίσκεται ακριβώς δίπλα από το πεδίο αυτό, εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο με το περιεχόμενο του τμήματος βιβλιοθηκών. Αφού γίνει η επιλογή της επιθυμητής βιβλιοθήκης, πατώντας 'OK' και ξανά 'OK' η νέα βιβλιοθήκη έχει ένα ρόλο υποφακέλου σε σχέση με την κεντρική. Στην **Εικόνα 115** παρουσιάζεται η προαναφερθείσα διαδικασία εισαγωγής μοντέλων μέσα σε προϋπάρχοντα. Με βάση τη διαδικασία αυτή, δημιουργούνται τέσσερις βιβλιοθήκες που θα χρειαστούν για την αποτελεσματική οργάνωση της μοντελοποίησης, η «Connectors», η «Components», η «Functions» και η «Examples». Στην **Εικόνα 116** φαίνεται το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής και η τελική μορφή που λαμβάνει η κεντρική βιβλιοθήκη «Solar_Thermal_SCO2_STP_Brayton» [72].



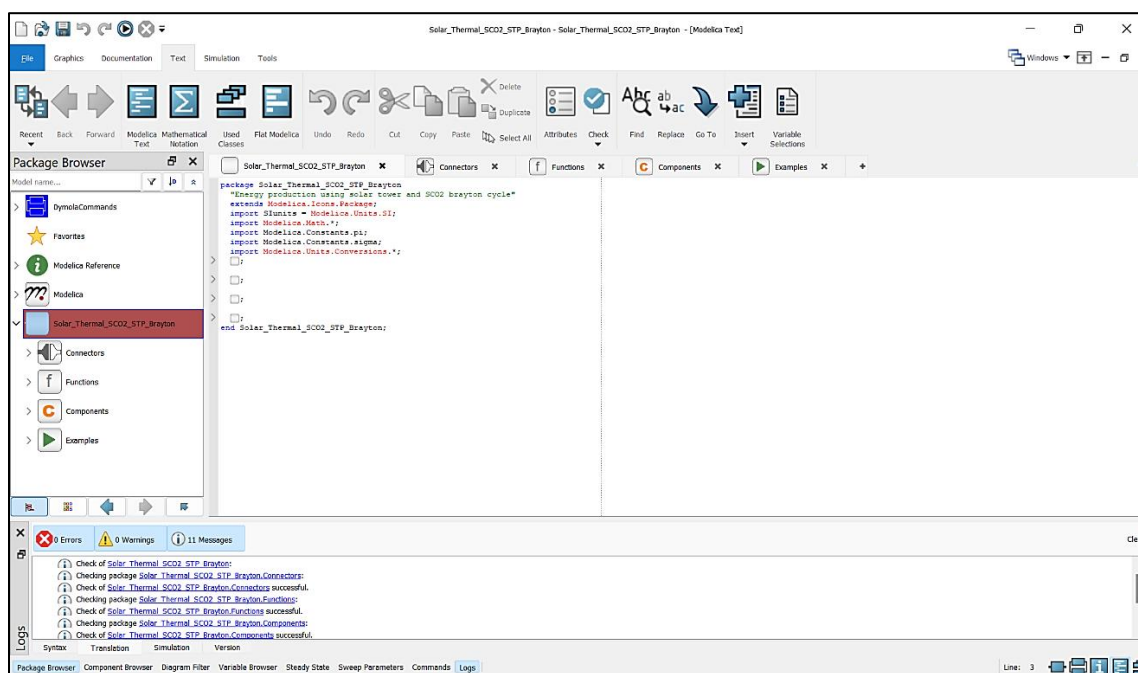
Εικόνα 115: Εισαγωγή μοντέλου μέσα σε ένα προϋπάρχον μοντέλο στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 116: Δημιουργία απαραίτητων βιβλιοθηκών για τη μοντελοποίηση του συστήματος στο λογισμικό Dymola [72]

Στην εκάστοτε βιβλιοθήκη θα πρέπει να εισαχθούν οι απαραίτητες έτοιμες βιβλιοθήκες, καθώς επίσης και άλλες σταθερές που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη μοντελοποίηση, έτσι ώστε να μη χρειάζεται να ανακαλείται ολόκληρη η διαδρομή θέσης (path) κάθε φορά

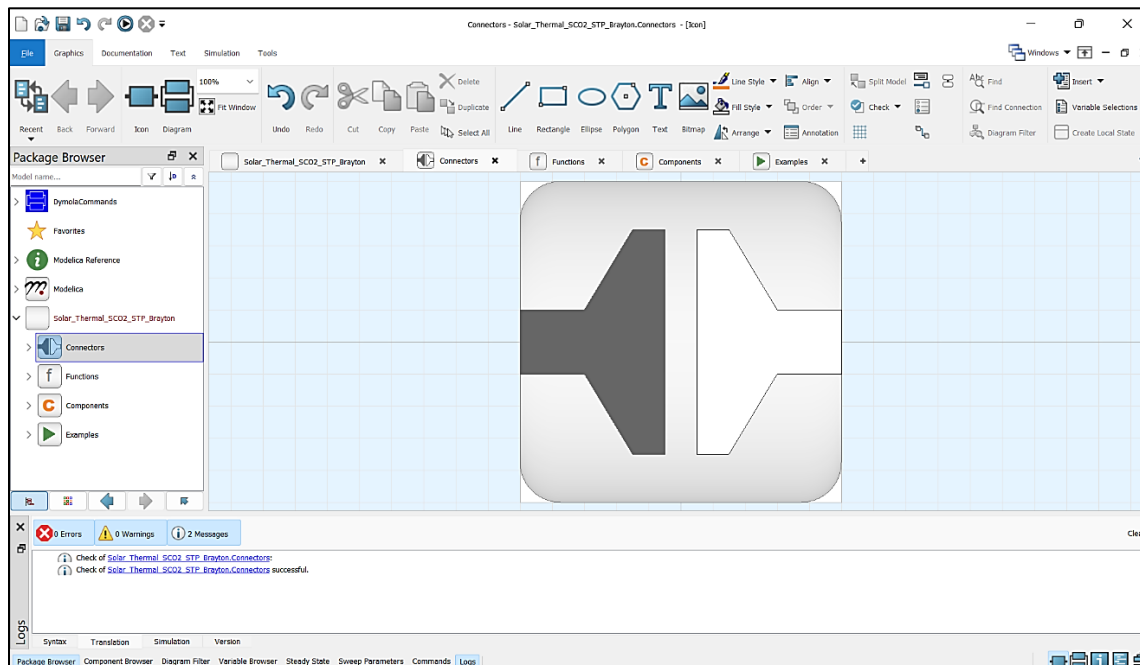
που γίνεται χρήση κάποιου στοιχείου της βασικής βιβλιοθήκης «Modelica Standard Library». Οι βιβλιοθήκες που αφορούν όλα τα μοντέλα εισάγονται στη βασική βιβλιοθήκη, τη «Solar_Thermal_SCO2_STP_Brayton». Η εισαγωγή βιβλιοθηκών γίνεται με χρήση της γλώσσας Modelica στην καρτέλα κειμένου (Text) της κάθε βιβλιοθήκης, όπως έχει παρουσιαστεί στο έβδομο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, γίνεται επιλογή στην εμφάνιση που θα έχει η κάθε βιβλιοθήκη, η οποία μπορεί να βασίζεται σε ήδη υπάρχοντα εικονίδια της βασικής βιβλιοθήκης «Modelica Standard Library». Η επιλογή αυτή γίνεται με τη χρήση της λέξης-κλειδί 'extends' και στη συνέχεια αναγράφεται η διαδρομή θέσης του επιθυμητού εικονιδίου. Επιπλέον, στο λογισμικό Dymola επιτρέπεται η δημιουργία μιας καινούριας εικόνας για οποιοδήποτε μοντέλο. Στην **Εικόνα 117** παρουσιάζεται η τελική μορφή της προβολής κειμένου (Text view) της βασικής βιβλιοθήκης «Solar_Thermal_SCO2_STP_Brayton». Στη βασική βιβλιοθήκη εισάγονται οι βιβλιοθήκες των μονάδων μέτρησης του διεθνούς συστήματος (βιβλιοθήκη SI), των μαθηματικών συναρτήσεων (βιβλιοθήκη Math) και των μετατροπών μονάδων μέτρησης (βιβλιοθήκη Conversions). Ο αστερίσκος υποδηλώνει ότι εισάγεται ολόκληρο το περιεχόμενο που βρίσκεται στη συγκεκριμένη διαδρομή θέσης. Επιπλέον, εισάγονται οι επιθυμητές σταθερές π και σ (σταθερά Stefan-Boltzmann) οι οποίες μπορούν πλέον να χρησιμοποιούνται απευθείας στη γλώσσα Modelica ως 'rho' και 'sigma' αντίστοιχα [72].



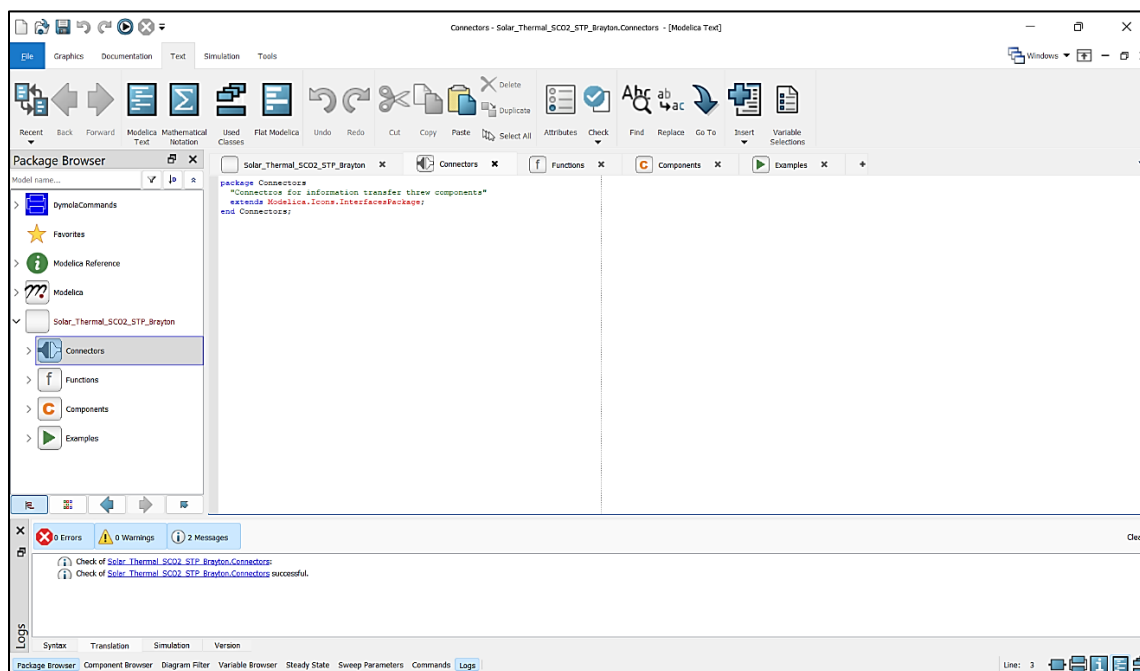
Εικόνα 117: Προβολή κειμένου της βασικής βιβλιοθήκης του συστήματος «Solar_Thermal_SCO2_STP_Brayton» στο λογισμικό Dymola [72]

Για τη βιβλιοθήκη «Connectors» επιλέγεται η βασική εικόνα της βιβλιοθήκης διεπαφών (Interfaces Package), ενώ για τη βιβλιοθήκη «Functions» αυτή της βιβλιοθήκης συναρτήσεων (Functions). Στην **Εικόνα 118** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας (Icon view) της καρτέλας γραφικών (Graphics) της βιβλιοθήκης «Connectors», ενώ στην **Εικόνα 119** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης αυτής. Στην **Εικόνα 120** παρουσιάζεται

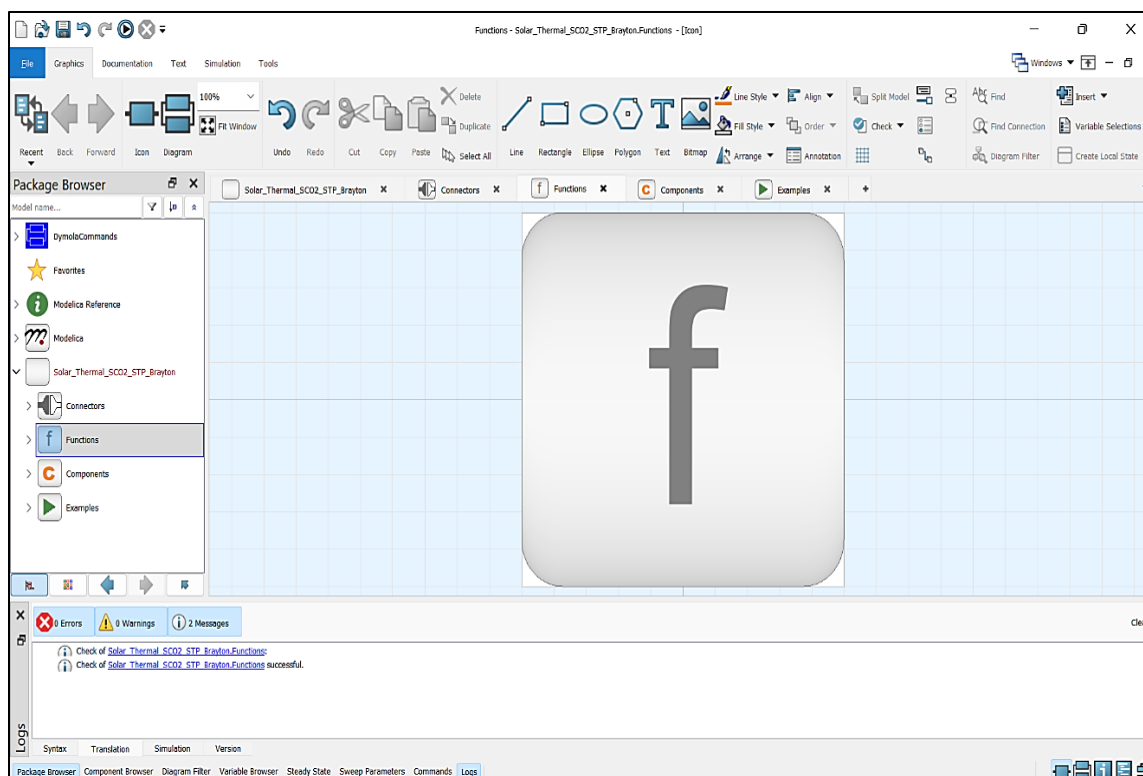
η προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Functions», ενώ στην **Εικόνα 121** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης αυτής. Στην **Εικόνα 122** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Examples», ενώ στην **Εικόνα 123** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης αυτής [72].



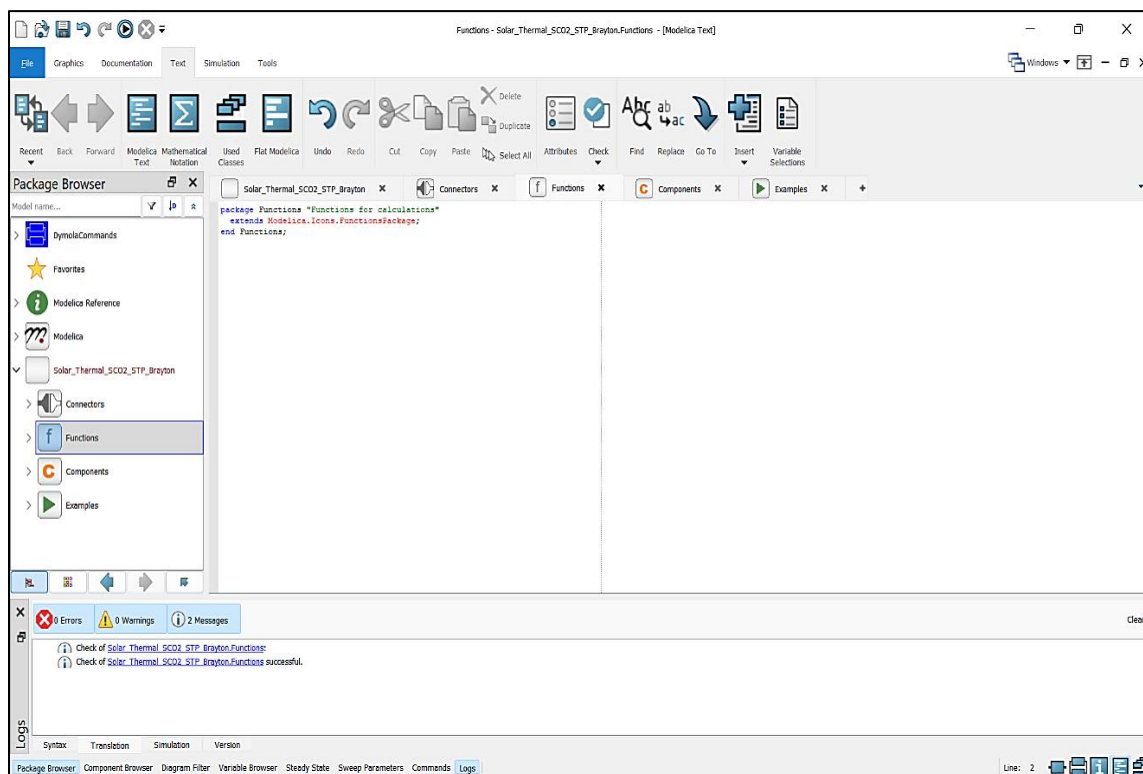
Εικόνα 118: Προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Connectors» στο λογισμικό Dymola [72]



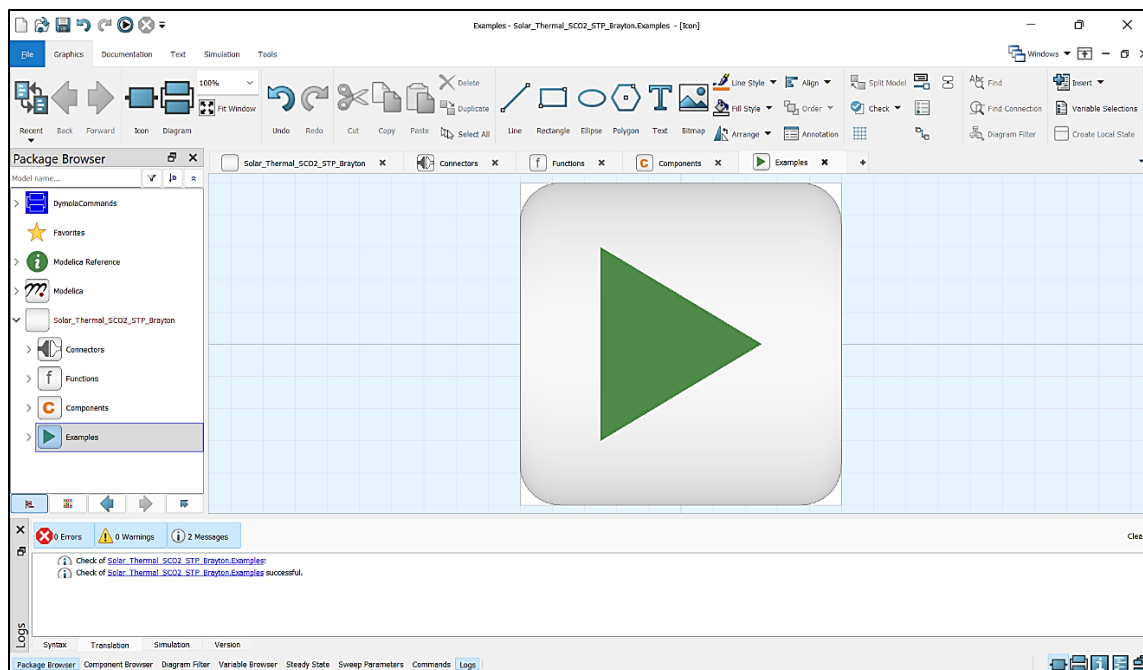
Εικόνα 119: Προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Connectors» στο λογισμικό Dymola [72]



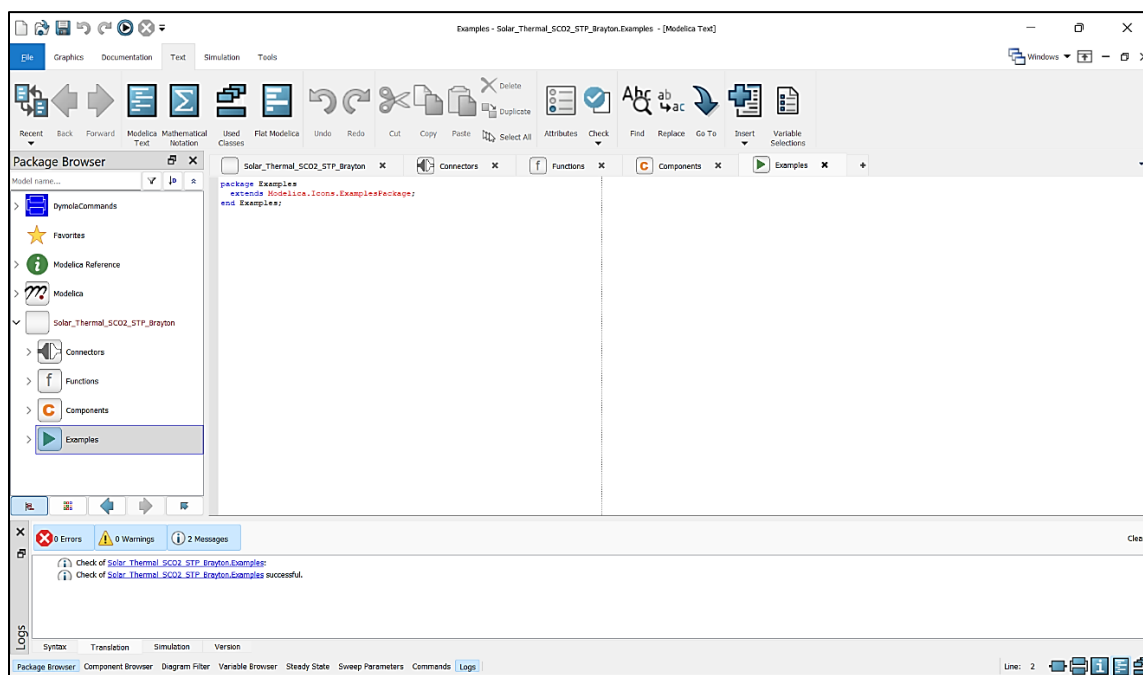
Εικόνα 120: Προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Functions» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 121: Προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Functions» στο λογισμικό Dymola [72]



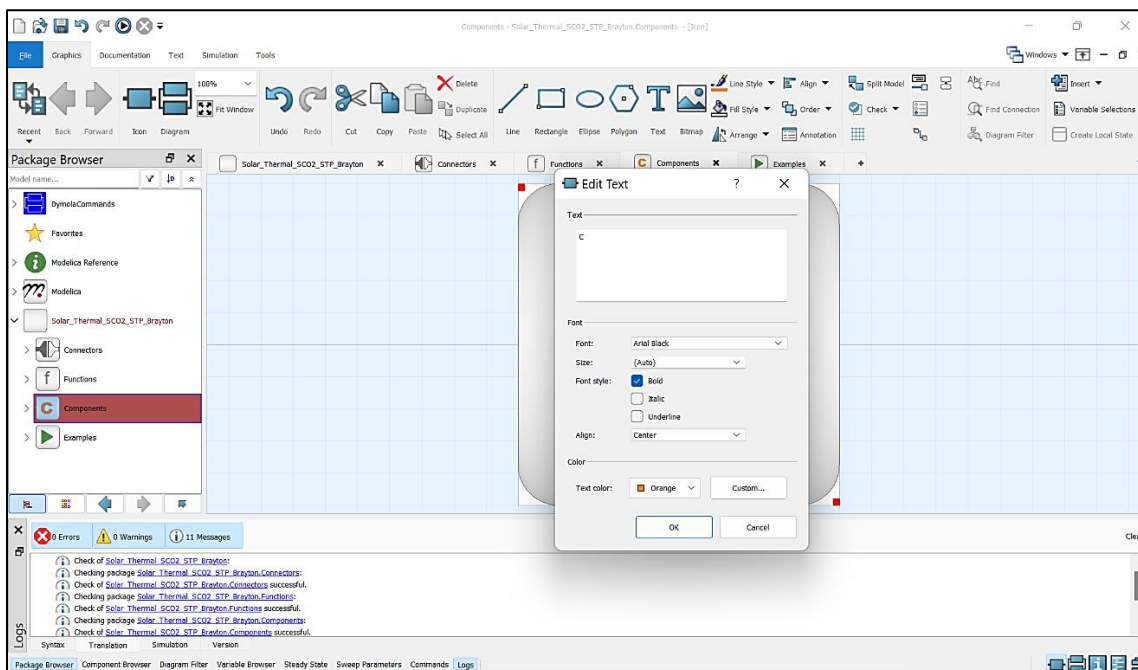
Εικόνα 122: Προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Examples» στο λογισμικό Dymola [72]



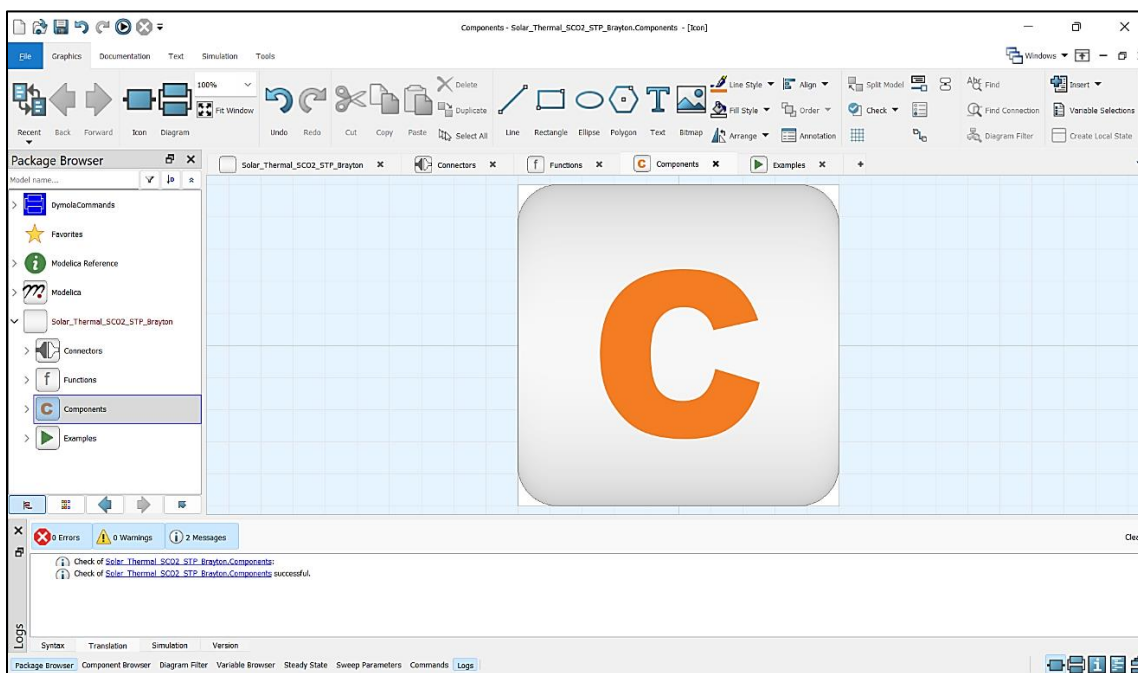
Εικόνα 123: Προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Examples» στο λογισμικό Dymola [72]

Στη βιβλιοθήκη «Components», θα πρέπει να γίνει εισαγωγή του περιεχομένου της βιβλιοθήκης «Functions» έτσι ώστε να μπορεί να γίνεται χρήση των συναρτήσεων που θα δημιουργηθούν από όλα τα μοντέλα των αντικειμένων (components). Επιπλέον, γίνεται χρήση του εργαλείου 'Text', που βρίσκεται στη γραμμή εργαλείων της καρτέλας γραφικών, προς μορφοποίηση αυτής της βιβλιοθήκης. Στην **Εικόνα 124** παρουσιάζεται η χρήση

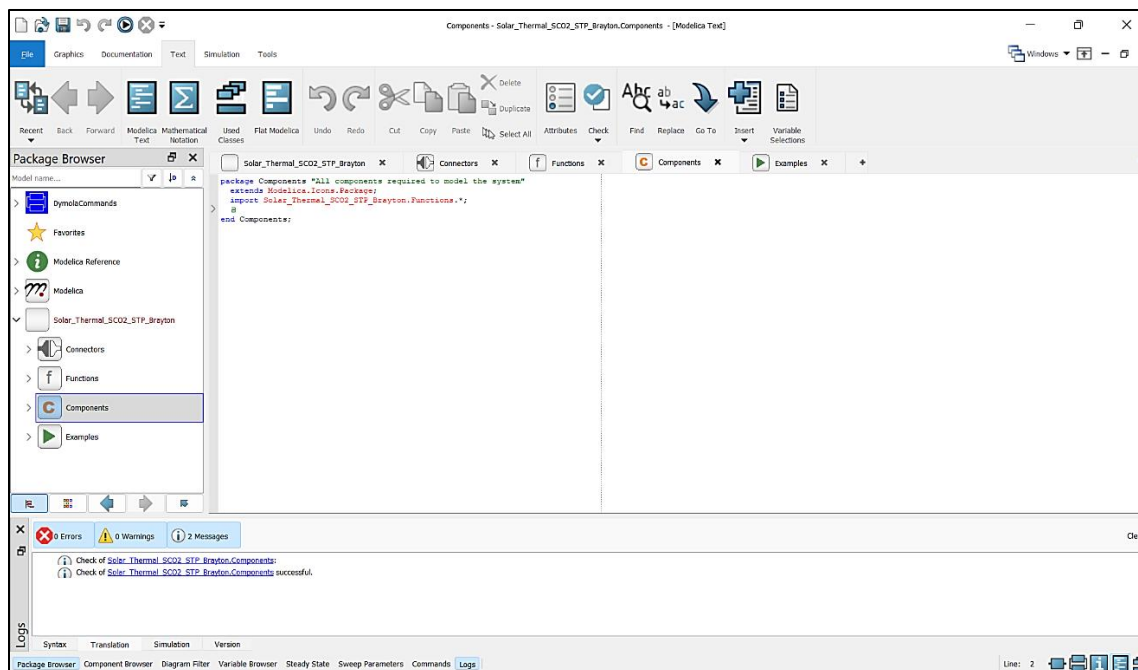
του εργαλείου 'Text'. Στην **Εικόνα 125** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Components», ενώ στην **Εικόνα 126** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης αυτής [72].



Εικόνα 124: Παράθυρο εργαλείου 'Text' της καρτέλας γραφικών στο λογισμικό Dymola [72]



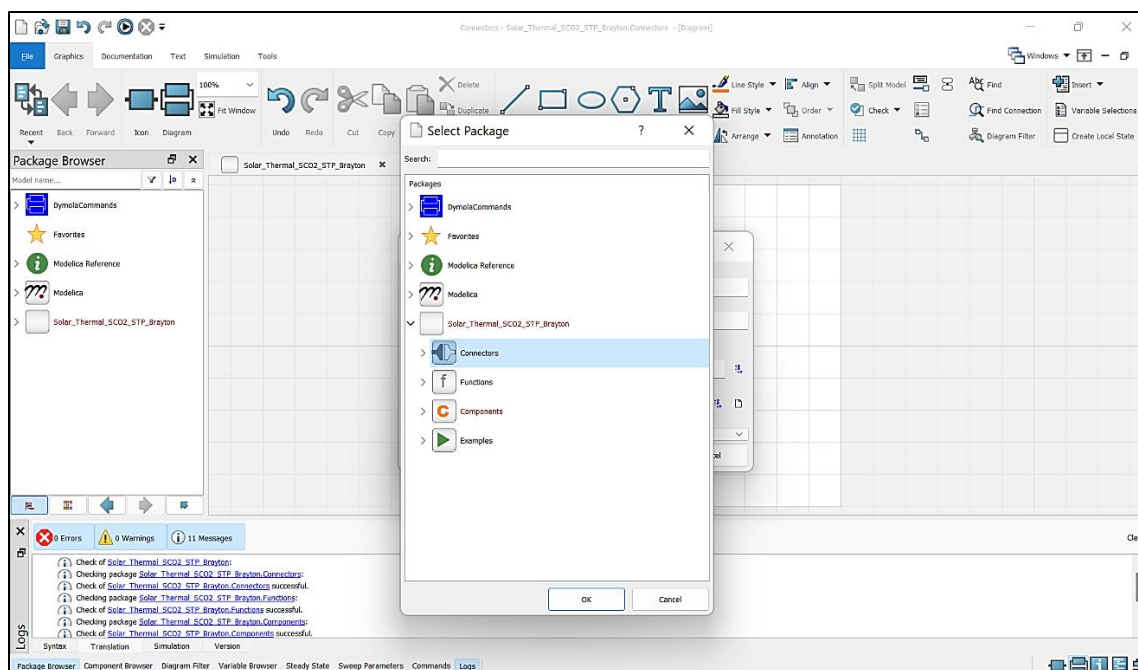
Εικόνα 125: Προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Components» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 126: Προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Components» στο λογισμικό Dymola [72]

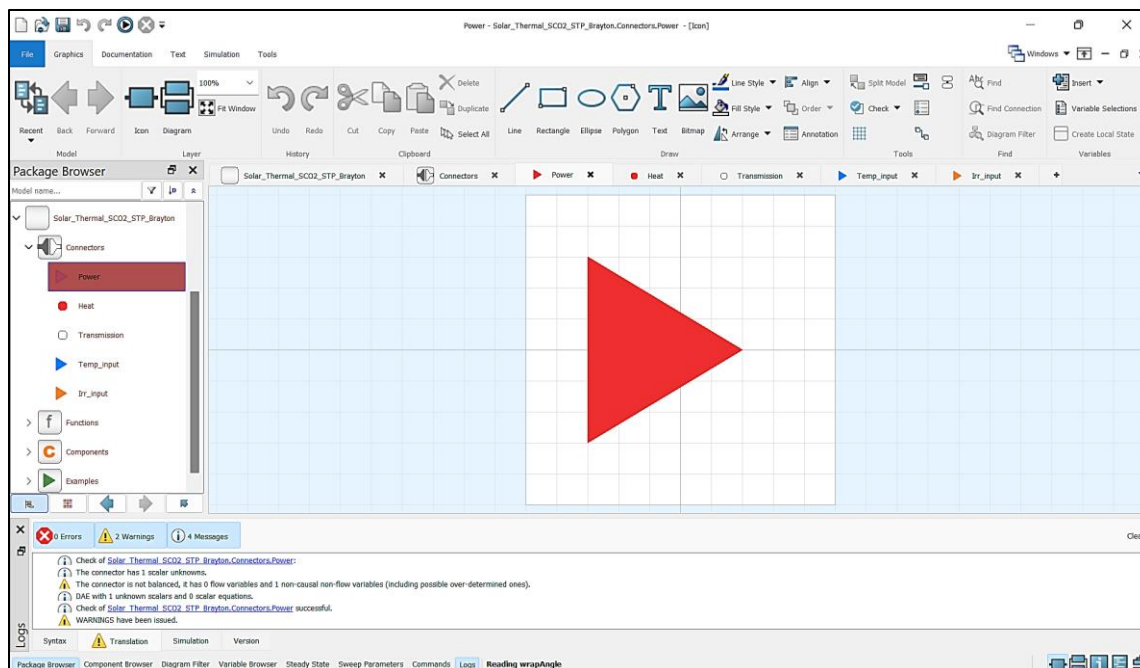
8.2. Μοντελοποίηση συνδέσμων (connectors modelling)

Οι σύνδεσμοι (connectors) είναι τα μοντέλα που καθορίζουν τη ροή των μεγεθών και των πληροφοριών μέσα στο σύστημα που προσομοιώνεται. Για τη δημιουργία ενός νέου συνδέσμου εκτελείται η σειρά εντολών 'File→New→Connector'. Στο παράθυρο που εμφανίζεται, συμπληρώνονται τα στοιχεία του προς δημιουργία συνδέσμου στα αντίστοιχα πεδία. Οι σύνδεσμοι που θα δημιουργηθούν θα πρέπει να τοποθετηθούν στη βιβλιοθήκη «Connectors» η οποία έχει ήδη δημιουργηθεί. Στην **Εικόνα 127** φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτό, ο οποίος είναι αντίστοιχος με αυτό που περιγράφηκε στο προηγούμενο εδάφιο για την εισαγωγή βιβλιοθηκών σε προϋπάρχουσες. Αυτή η διαδικασία ισχύει για κάθε είδος μοντέλου [72].

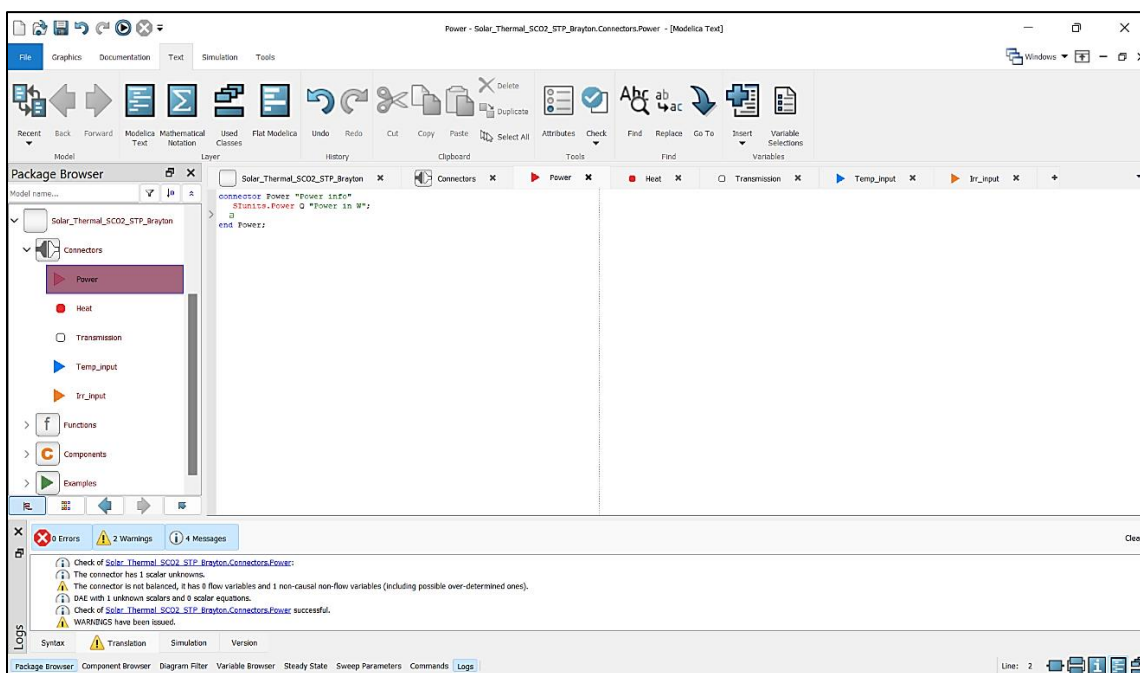


Εικόνα 127: Εισαγωγή ενός μοντέλου μέσα σε μια προϋπάρχουσα βιβλιοθήκη στο λογισμικό Dymola [72]

Για τη μοντελοποίηση θα χρειαστεί να δημιουργηθούν συνολικά πέντε διαφορετικοί σύνδεσμοι. Ο πρώτος που δημιουργείται είναι ο σύνδεσμος «Power», ο οποίος θα μεταφέρει τη συνολική ισχύ που θα εστιάζουν οι ηλιοστάτες προς τον κεντρικό δεκτή. Για διευκόλυνση στη δημιουργία του τελικού συστήματος προς μελέτη, δημιουργείται μια ξεχωριστή εικόνα για τον κάθε σύνδεσμο έτσι ώστε να διακρίνονται οπτικά μέσα στις βιβλιοθήκες, αφού στη συνέχεια θα εισάγονται στα μοντέλα με τη μέθοδο 'drag and drop'. Η μορφοποίηση αυτή γίνεται με χρήση των εργαλείων της καρτέλας γραφικών, η οποία δίνει τη δυνατότητα για δημιουργία σχημάτων, όπως για παράδειγμα γραμμών (Line). Στην **Εικόνα 128** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του συνδέσμου «Power», ενώ στην **Εικόνα 129** η προβολή κειμένου του συνδέσμου αυτού. Πραγματοποιώντας έλεγχο (check) αυτού του συνδέσμου, διαπιστώνεται ότι προκύπτουν κάποιες προειδοποιήσεις (warnings) από το λογισμικό Dymola. Αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι ο συγκεκριμένος σύνδεσμος δεν διαθέτει ίσο αριθμό 'across' και 'threw' μεταβλητών. Η προειδοποίηση αυτή δεν προκαλεί κάποιο πρόβλημα κατά τη μοντελοποίηση, αφού σημασία έχει ο οριστικός έλεγχος των βιβλιοθηκών και του τελικού μοντέλου που θα προσομοιωθεί [72].



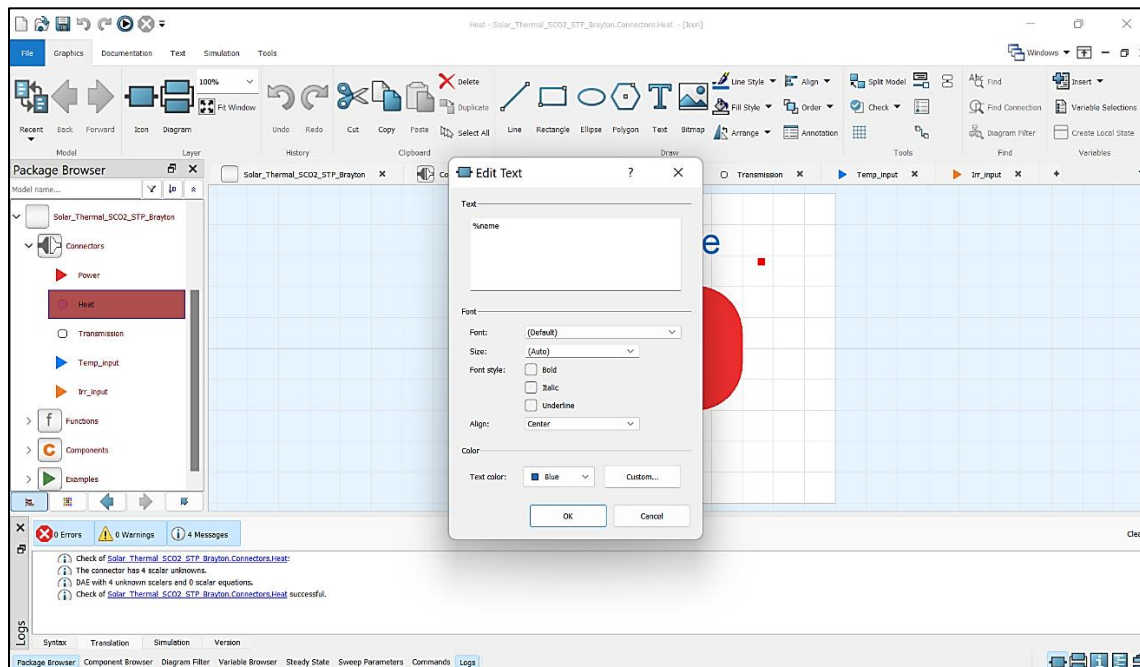
Εικόνα 128: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Power» στο λογισμικό Dymola [72]



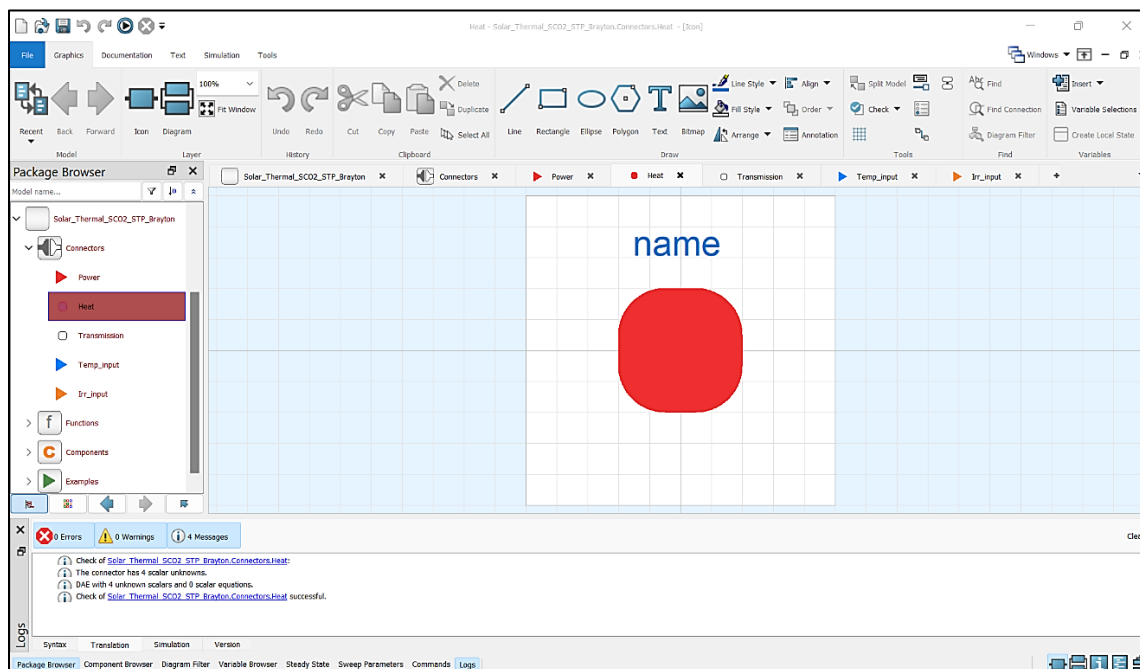
Εικόνα 129: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Power» στο λογισμικό Dymola [72]

Ο δεύτερος σύνδεσμος που δημιουργείται ονομάζεται «Heat». Αυτός ο σύνδεσμος μεταφέρει πληροφορίες που αφορούν το ρευστό και πιο συγκεκριμένα τη θερμοκρασία, την πίεση, την παροχή μάζας και την ενθαλπία του. Επειδή σε κάποια μοντέλα θα χρειαστεί να γίνει χρήση τουλάχιστον δυο τέτοιων συνδέσμων, επιλέγεται να εμφανίζεται και το όνομα του κάθε συνδέσμου στο εικονίδιο του έτσι ώστε να διακρίνονται πιο εύκολα.

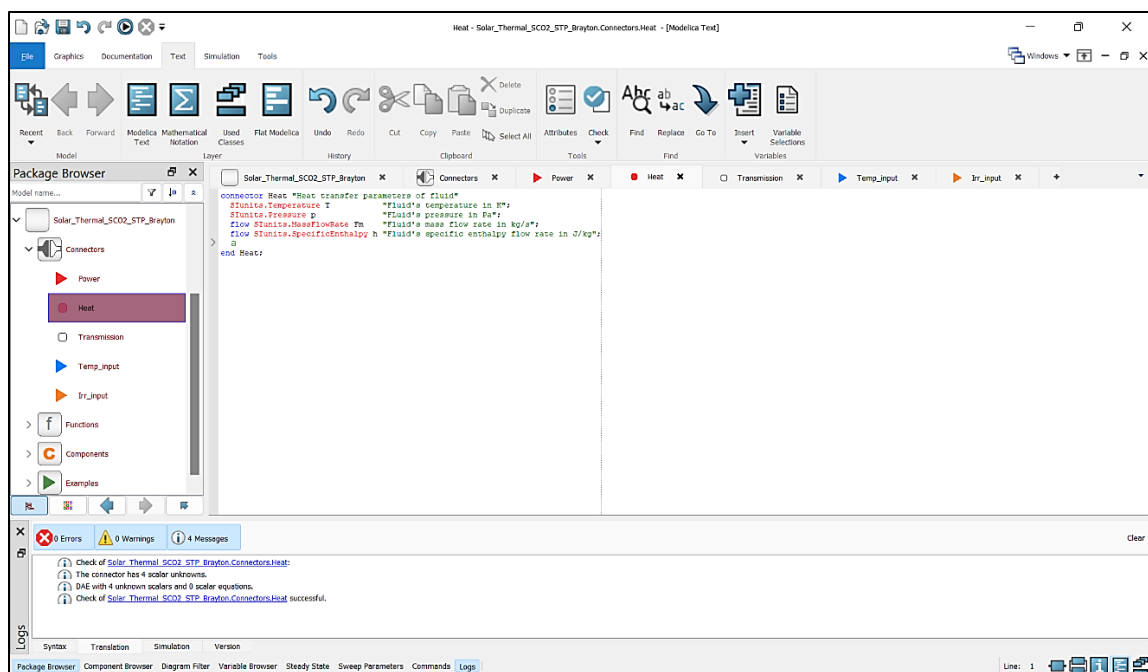
Αυτό επιτυγχάνεται εισάγοντας το κείμενο '%name' στο πεδίο του ονόματος του εργαλείου 'Text' της καρτέλας γραφικών. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στην **Εικόνα 130**. Στην **Εικόνα 131** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του συνδέσμου «Heat», ενώ στην **Εικόνα 132** η προβολή κειμένου του [72].



Εικόνα 130: Ρύθμιση εμφάνισης ονόματος μοντέλου στο εικονίδιο του λογισμικού Dymola [72]

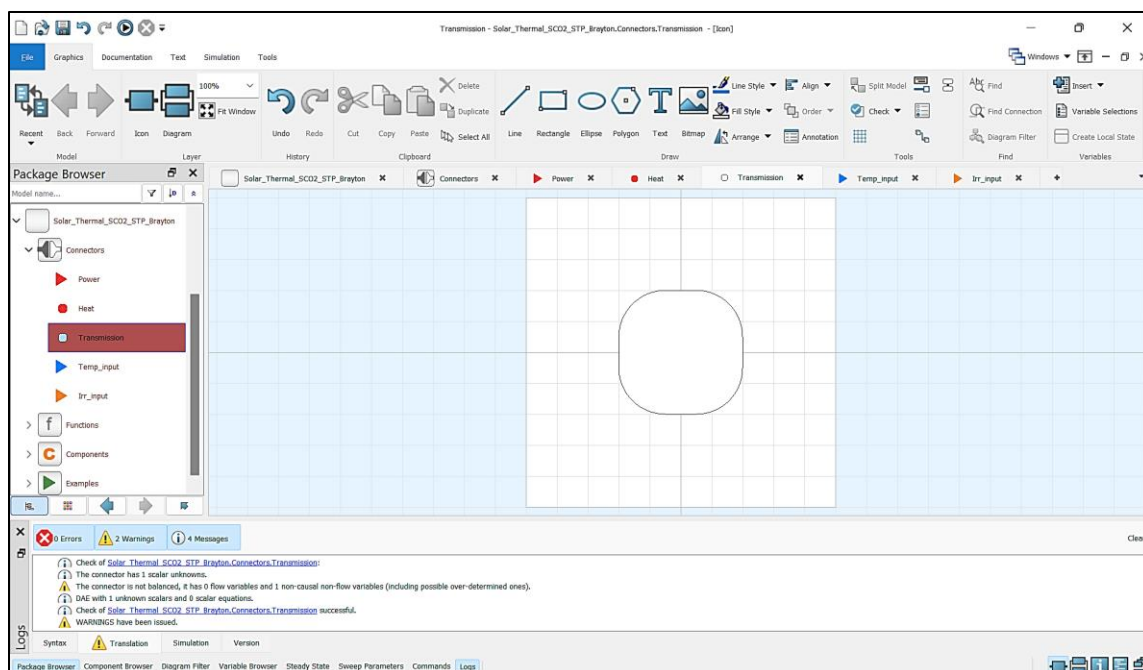


Εικόνα 131: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Heat» στο λογισμικό Dymola [72]

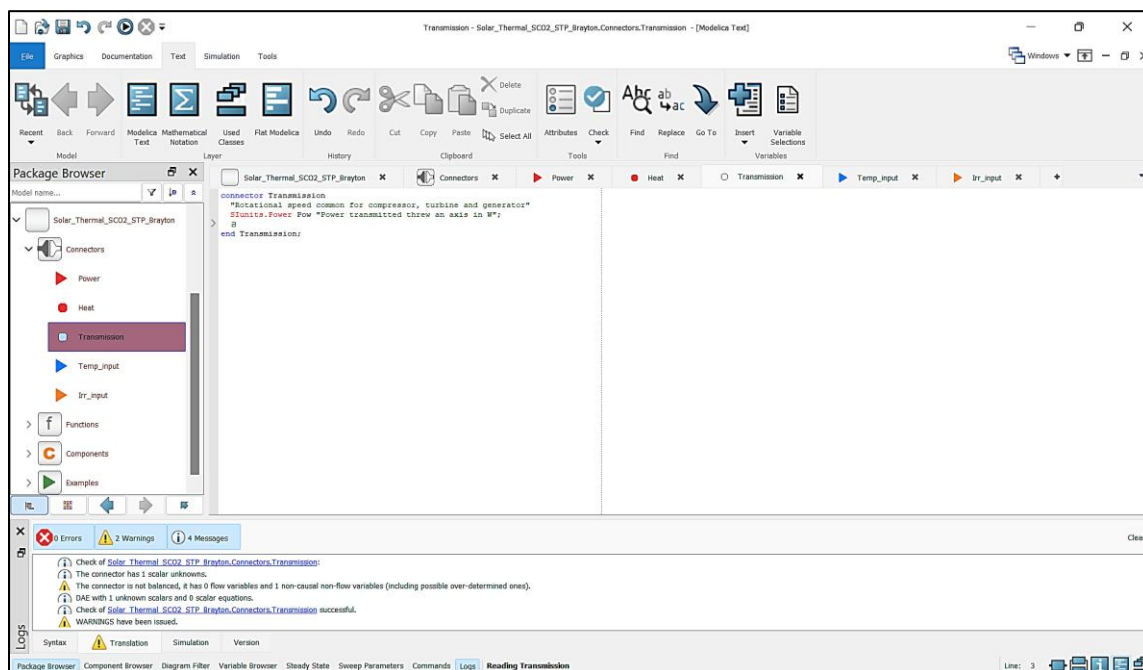


Εικόνα 132: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Heat» στο λογισμικό Dymola [72]

Ο τρίτος σύνδεσμος που δημιουργείται είναι ο «Transmission» και αφορά τον κοινό άξονα περιστροφής που συνδέει τα περιστρεφόμενα μηχανολογικά εξαρτήματα του θερμοδυναμικού κύκλου Brayton, τον συμπιεστή, τον στρόβιλο και τη γεννήτρια. Η πληροφορία που μεταφέρει αφορά την ισχύ που παράγεται η καταναλώνεται στο κάθε εξάρτημα, με σκοπό τον υπολογισμό της καθαρά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στη γεννήτρια. Οι προειδοποιήσεις που εμφανίζονται κατά τον έλεγχο του μοντέλου που αφορούν το ισοζύγιο 'across' και 'threw' μεταβλητών μπορούν να αγνοηθούν, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Στην **Εικόνα 133** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του συνδέσμου «Transmission», ενώ στην **Εικόνα 134** η προβολή κειμένου του [72].



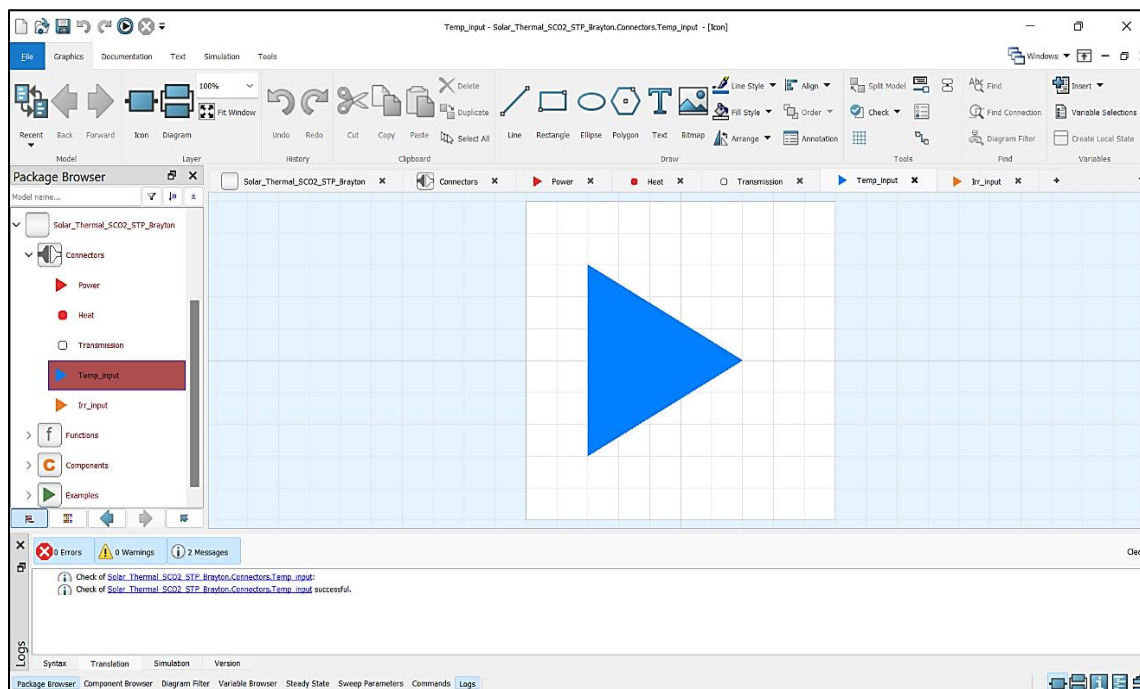
Εικόνα 133: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Transmission» στο λογισμικό Dymola [72]



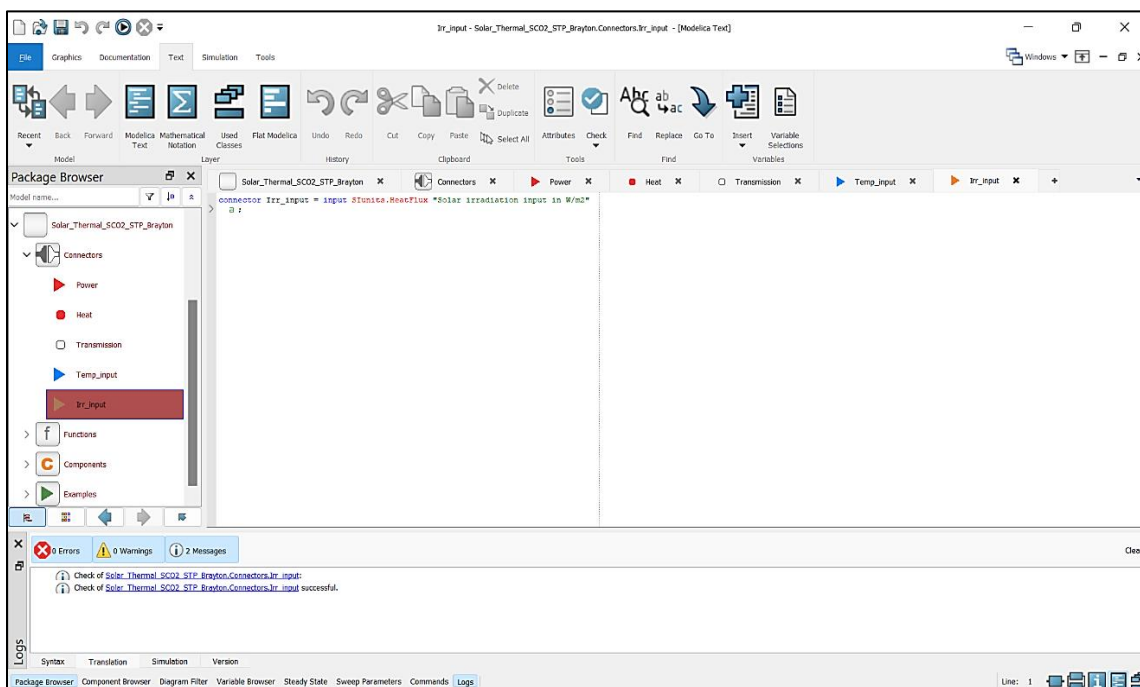
Εικόνα 134: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Transmission» στο λογισμικό Dymola [72]

Ο τέταρτος σύνδεσμος που δημιουργείται ονομάζεται «Temp_input». Αυτός ο σύνδεσμος είναι τύπου εισόδου (input) και θα μεταφέρει πληροφορίες από το μοντέλο των καιρικών συνθηκών οι οποίες θα είναι τύπου εξόδου (output) και θα αφορούν τη

θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο τύπος του συνδέσμου δηλώνεται σε γλώσσα Modelica στην καρτέλα προβολής κειμένου. Στην **Εικόνα 135** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του συνδέσμου «Temp_input», ενώ στην **Εικόνα 136** η προβολή κειμένου του [72].

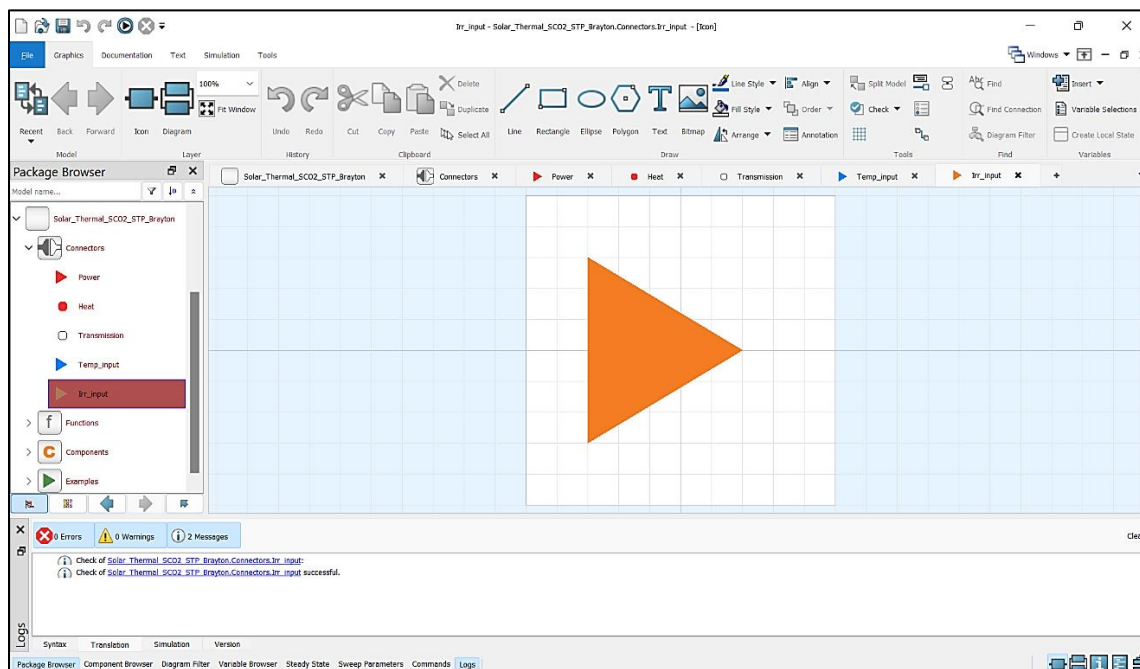


Εικόνα 135: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Temp_input» στο λογισμικό Dymola [72]

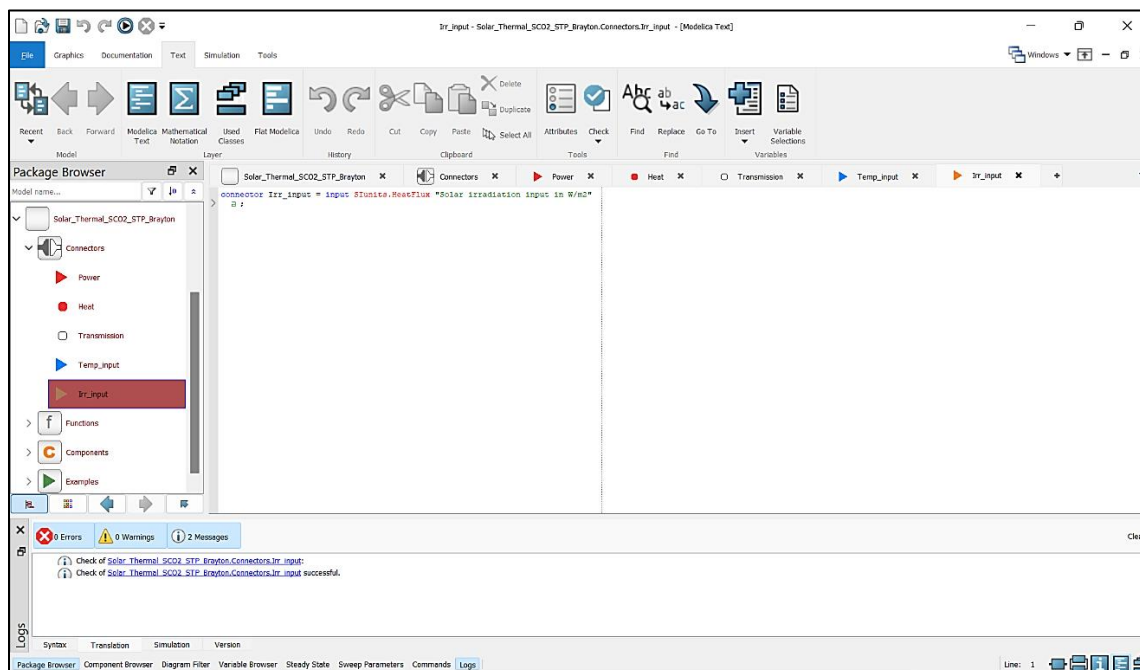


Εικόνα 136: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Temp_input» στο λογισμικό Dymola [72]

Ο πέμπτος σύνδεσμος που δημιουργείται ονομάζεται «Irr_input». Αυτός ο σύνδεσμος θα είναι επίσης τύπου εισόδου και θα μεταφέρει πληροφορίες από το μοντέλο των καιρικών συνθηκών (που θα είναι τύπου εξόδου) και θα αφορούν την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία. Στην **Εικόνα 137** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του συνδέσμου «Irr_input», ενώ στην **Εικόνα 138** η προβολή κειμένου του [72].

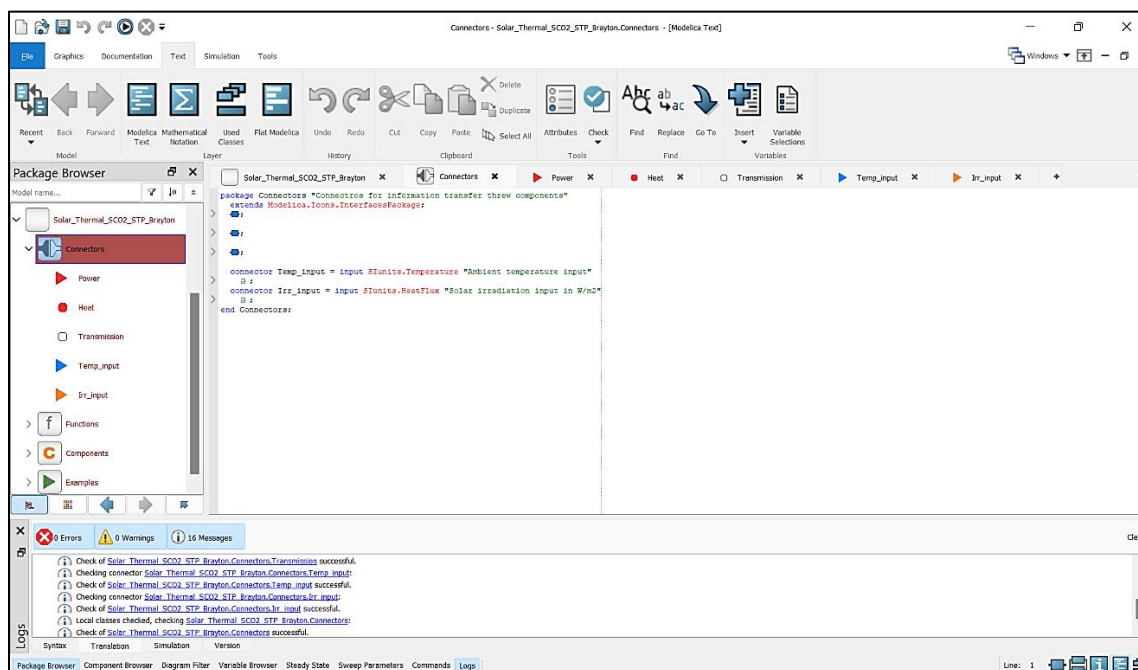


Εικόνα 137: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Irr_input» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 138: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Irr_input» στο λογισμικό Dymola [72]

Στην **Εικόνα 139** παρουσιάζεται η τελική μορφή της βιβλιοθήκης «Connectors». Όπως φαίνεται στο αρχείο καταγραφής του λογισμικού (Logs) που βρίσκεται στο κάτω μέρος του παραθύρου, ο έλεγχος ολοκληρώνεται με επιτυχία παρόλο που κάποια επιμέρους μοντέλα των συνδέσμων είχαν εμφανίσει κάποιες προειδοποιήσεις. Τα μπλε σύμβολα αντιπροσωπεύουν τους συνδέσμους που βρίσκονται σε αυτή τη βιβλιοθήκη. Πατώντας το βέλος που βρίσκεται στα αριστερά τους, γίνεται επέκταση του εικονιδίου και φαίνεται ολόκληρος ο κώδικας σε γλώσσα Modelica. Το ίδιο μπορεί να γίνει και για το σύμβολο των σχολιασμών (annotations), το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το σχεδιαστικό κομμάτι του εικονιδίου του εκάστοτε μοντέλου. [72].



Εικόνα 139: Τελική προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Connectors» στο λογισμικό Dymola [72]

8.3. Μοντελοποίηση συναρτήσεων (functions modelling)

Οι συναρτήσεις (functions) είναι τα μοντέλα τα οποία ορίζουν συγκεκριμένες συναρτήσεις εξισώσεων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από άλλα μοντέλα του υπό εξέταση συστήματος. Για τη δημιουργία μιας νέας συνάρτησης εκτελείται η σειρά εντολών 'File→New→Function'. Στο παράθυρο που εμφανίζεται συμπληρώνονται τα στοιχεία της προς δημιουργία συνάρτησης. Οι συναρτήσεις που θα δημιουργηθούν θα πρέπει να τοποθετηθούν στη βιβλιοθήκη «Functions» η οποία έχει ήδη δημιουργηθεί. Η μεθοδολογία είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε στο προηγούμενο εδάφιο, με μοναδική διαφορά την επιλεγόμενη βιβλιοθήκη που πλέον είναι η «Functions» [72].

Η πρώτη συνάρτηση που θα δημιουργηθεί ονομάζεται «Cr_CO2_NIST». Με αυτή την συνάρτηση, θα υπολογίζεται προσεγγιστικά η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή

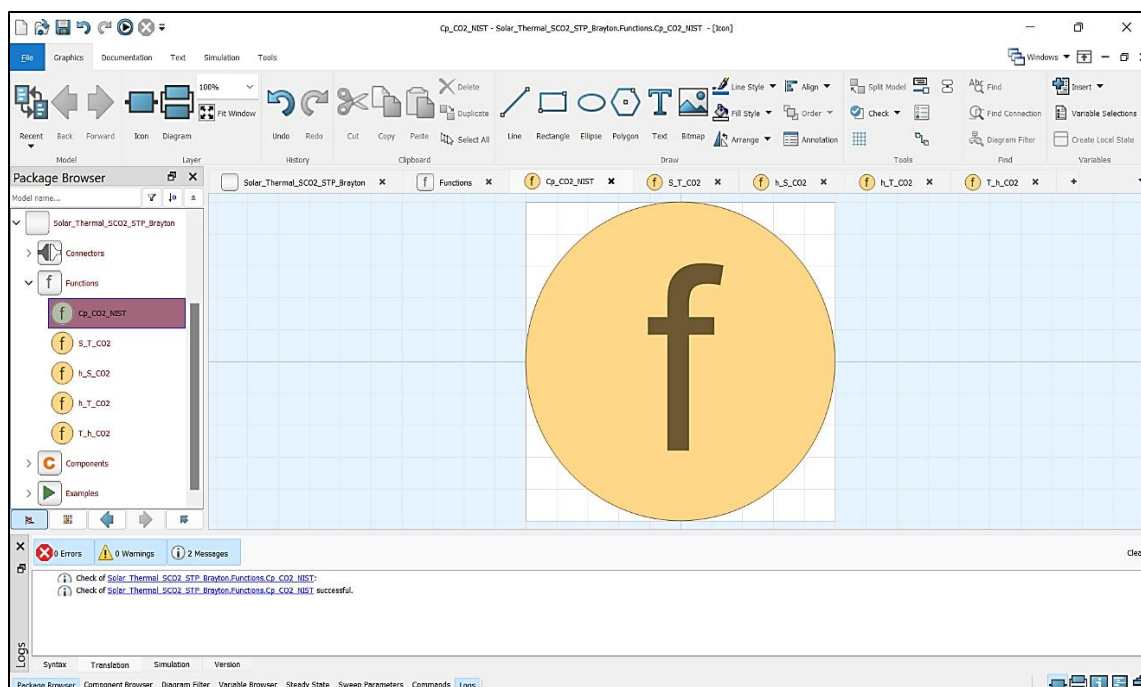
πίεση του διοξειδίου του άνθρακα. Ο υπολογισμός αυτός θα γίνεται με δεδομένο εισόδο τη θερμοκρασία του διοξειδίου του άνθρακα και με βάση την **Εξίσωση (49)**, η οποία προκύπτει με βάση το ινστιτούτο NIST, στην οποία η θερμοκρασία (T) θα πρέπει να εισάγεται σε μονάδες K/1000. Στον **Πίνακα 10** παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που αφορούν την εξίσωση για το διοξείδιο του άνθρακα [75].

$$C_{p_CO2} = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + E/T^2 \quad (49)$$

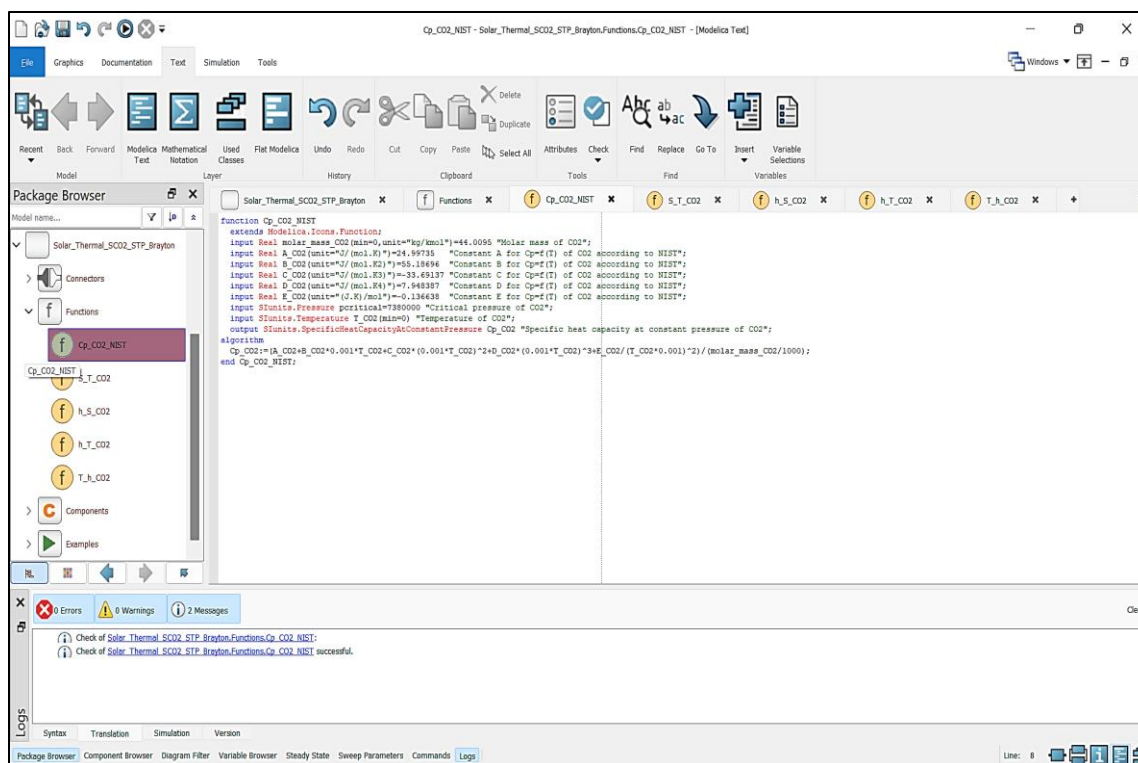
Πίνακας 10: Σταθερές υπολογισμού ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση διοξειδίου του άνθρακα [75]

Εύρος θερμοκρασιών [K]	298 – 1200
A [J/molK]	24,99735
B [J/molK²]	55,18696
C [J/molK³]	-33,69137
D [J/molK⁴]	7,948387
E [JK/mol]	-0,136638

Για παραστατικούς λόγους εισάγεται το εικονίδιο των συναρτήσεων από τα έτοιμα εικονίδια της βασικής βιβλιοθήκης «Modelica Standard Library». Επιπλέον, εισάγεται η μοριακή μάζα του διοξειδίου του άνθρακα για σκοπούς μετατροπής των μονάδων σε J/kgK. Στην **Εικόνα 140** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας της συνάρτησης «Cp_CO2_NIST», η οποία στην παρούσα εργασία θα είναι η ίδια για κάθε συνάρτηση, ενώ στην **Εικόνα 141** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της συνάρτησης αυτής. [72].

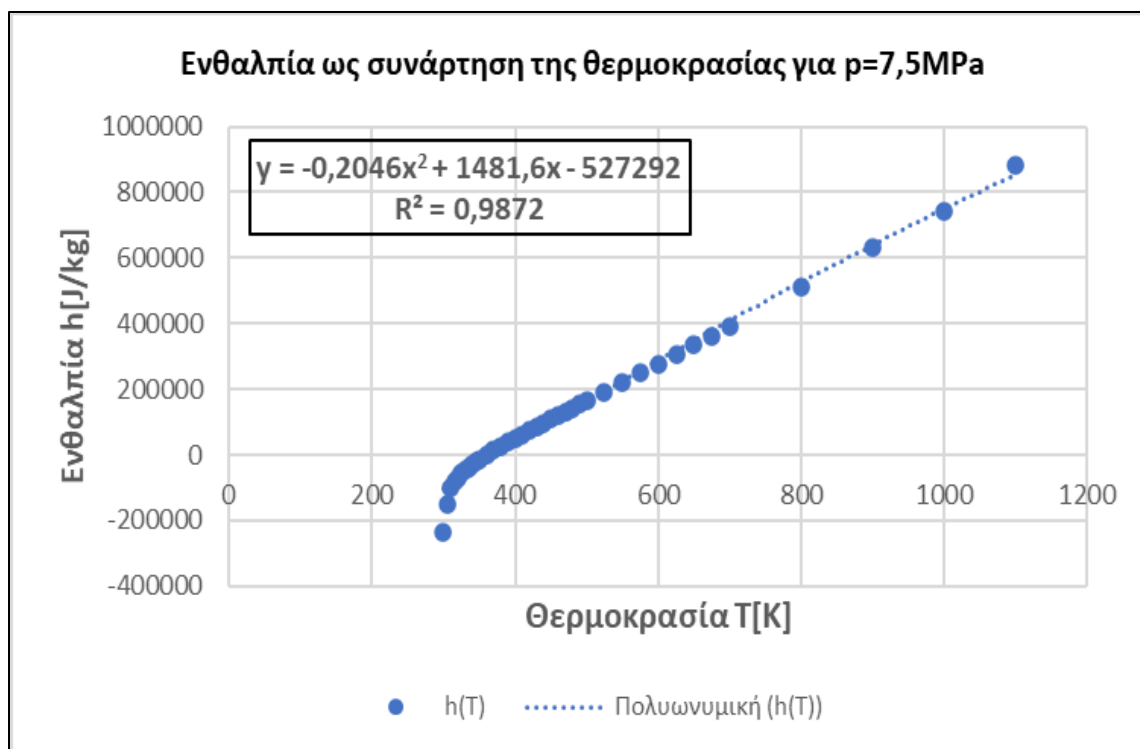


Εικόνα 140: Προβολή εικόνας των συναρτήσεων στο λογισμικό Dymola [72]

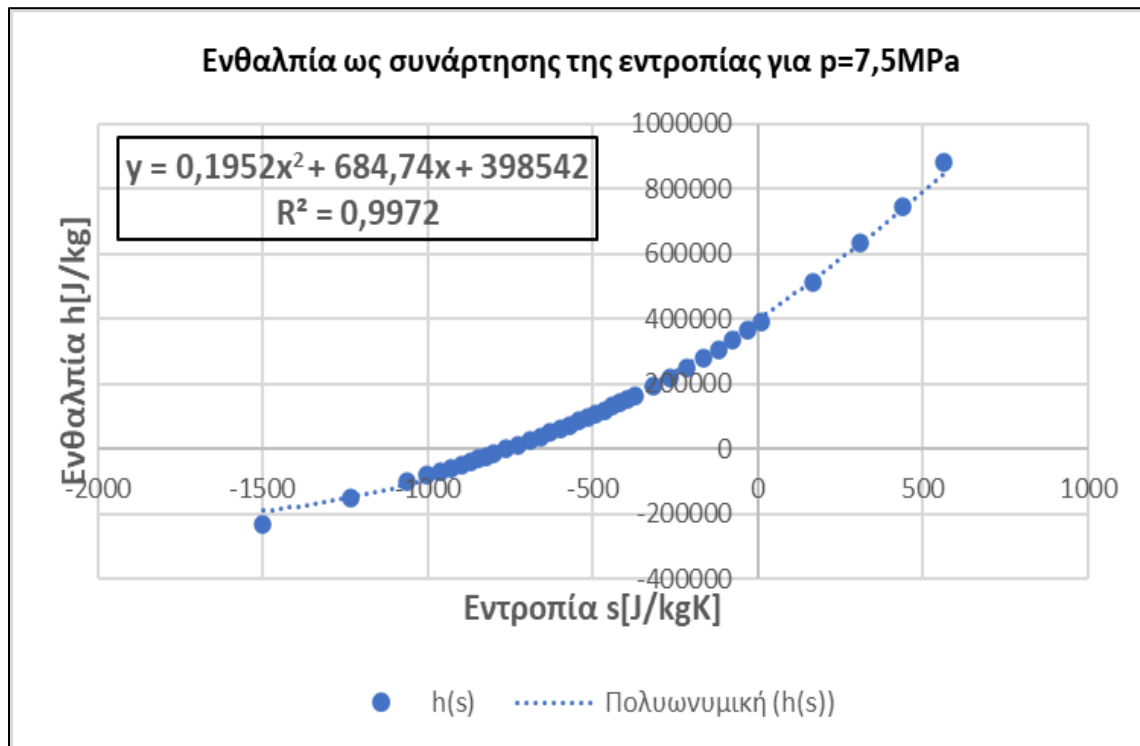


Εικόνα 141: Προβολή κειμένου της συνάρτησης «Cp_CO2_NIST» στο λογισμικό Dymola [72]

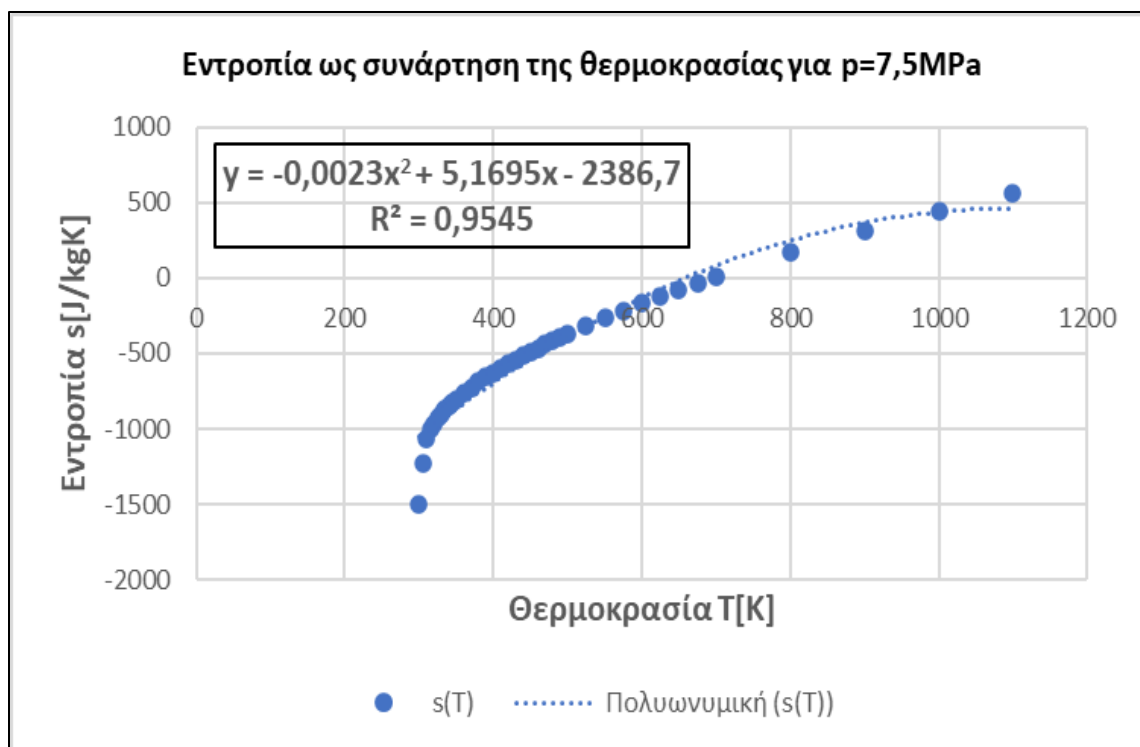
Οι επόμενες συναρτήσεις που θα δημιουργηθούν, αφορούν τη συσχέτιση των μεγεθών θερμοκρασίας, πίεσης, ενθαλπίας και εντροπίας του διοξειδίου του άνθρακα υπό σταθερή πίεση. Με βάση τους πίνακες ιδιοτήτων του ρευστού, παράγονται με τη μέθοδο της παρεμβολής οι συναρτήσεις που συσχετίζουν αυτά τα μεγέθη μεταξύ τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα που αφορά την ισόθλιπτη των 7,5MPa, πίεση η οποία είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την κρίσιμη πίεση του διοξειδίου του άνθρακα. Στο **Σχήμα 18** παρουσιάζεται η μεταβολή της ενθαλπίας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, καθώς επίσης και η πολυωνυμική συνάρτηση παρεμβολής αλλά και ο συντελεστής συσχέτισης που την αντιπροσωπεύει. Με αντίστοιχη διαδικασία, προκύπτει η συσχέτιση ενθαλπίας ως προς την εντροπία, η οποία παρουσιάζεται στο **Σχήμα 19**, αλλά και εντροπίας ως προς τη θερμοκρασία, η οποία παρουσιάζεται στο **Σχήμα 20**. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και για τη συσχέτιση της θερμοκρασίας ως προς την εντροπία, με μοναδική διαφορά το γεγονός ότι η συνάρτηση παρεμβολής είναι εκθετικής αντί πολυωνυμικής μορφής. Η συσχέτιση αυτή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 21** [76].



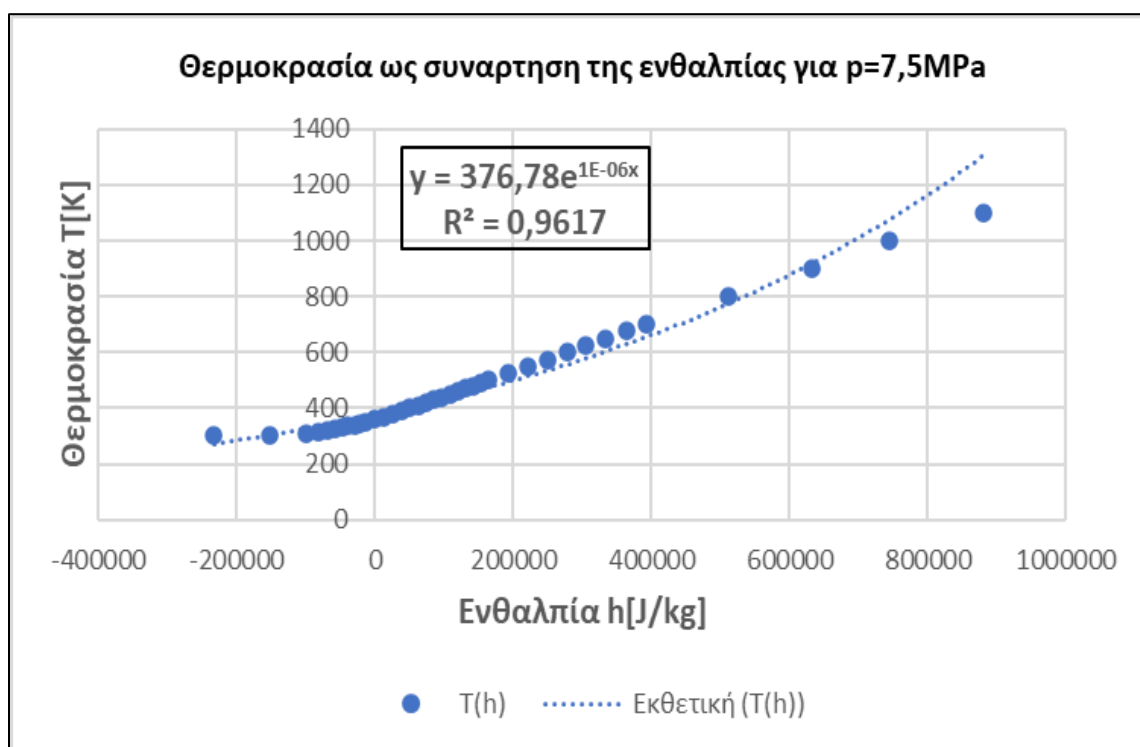
Σχήμα 18: Μεταβολή ενθαλπίας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας υπό σταθερή πίεση 7,5MPa για το διοξείδιο του άνθρακα [76]



Σχήμα 19: Μεταβολή ενθαλπίας ως συνάρτηση της εντροπίας υπό σταθερή πίεση 7,5MPa για το διοξείδιο του άνθρακα [76]

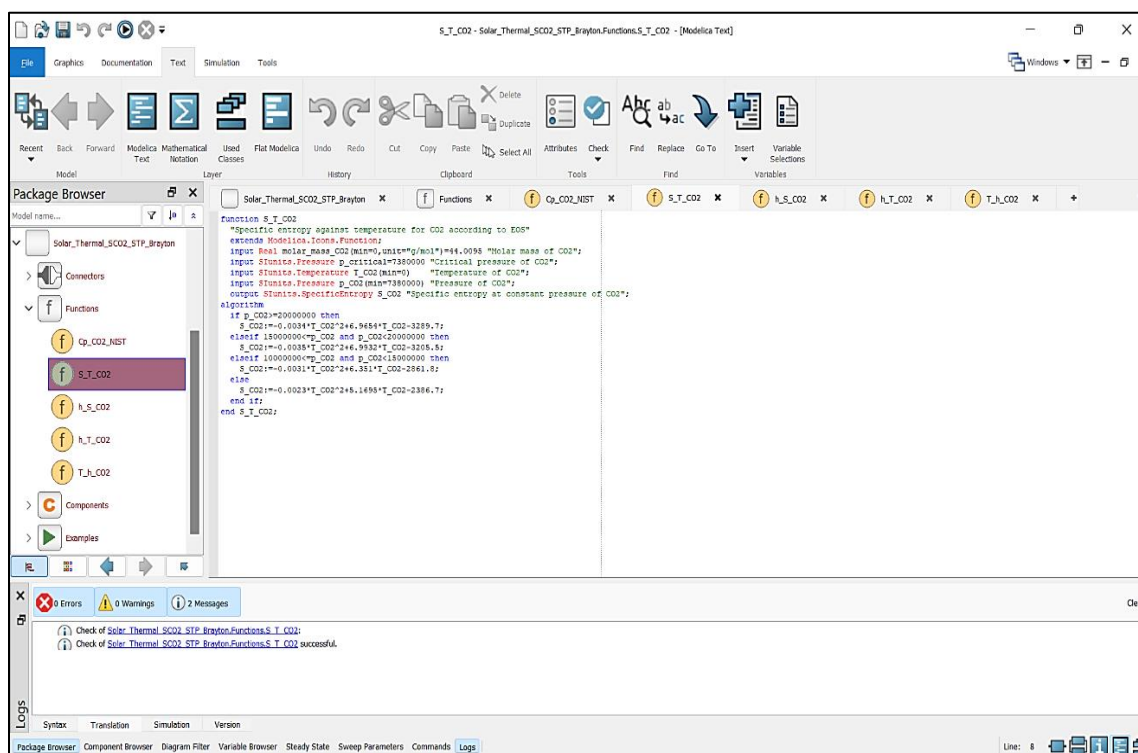


Σχήμα 20: Μεταβολή εντροπίας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας υπό σταθερή πίεση 7,5MPa για το διοξείδιο του άνθρακα [76]

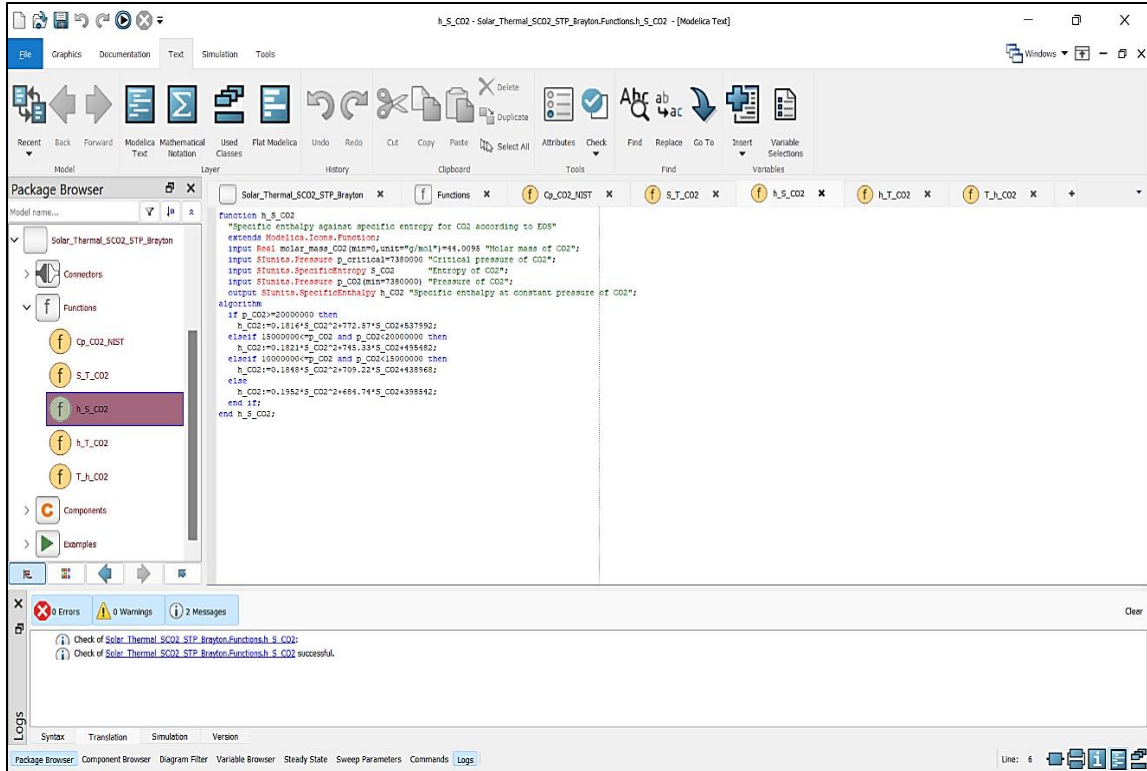


Σχήμα 21: Μεταβολή θερμοκρασίας ως συνάρτηση της ενθαλπίας υπό σταθερή πίεση 7,5MPa για το διοξείδιο του άνθρακα [76]

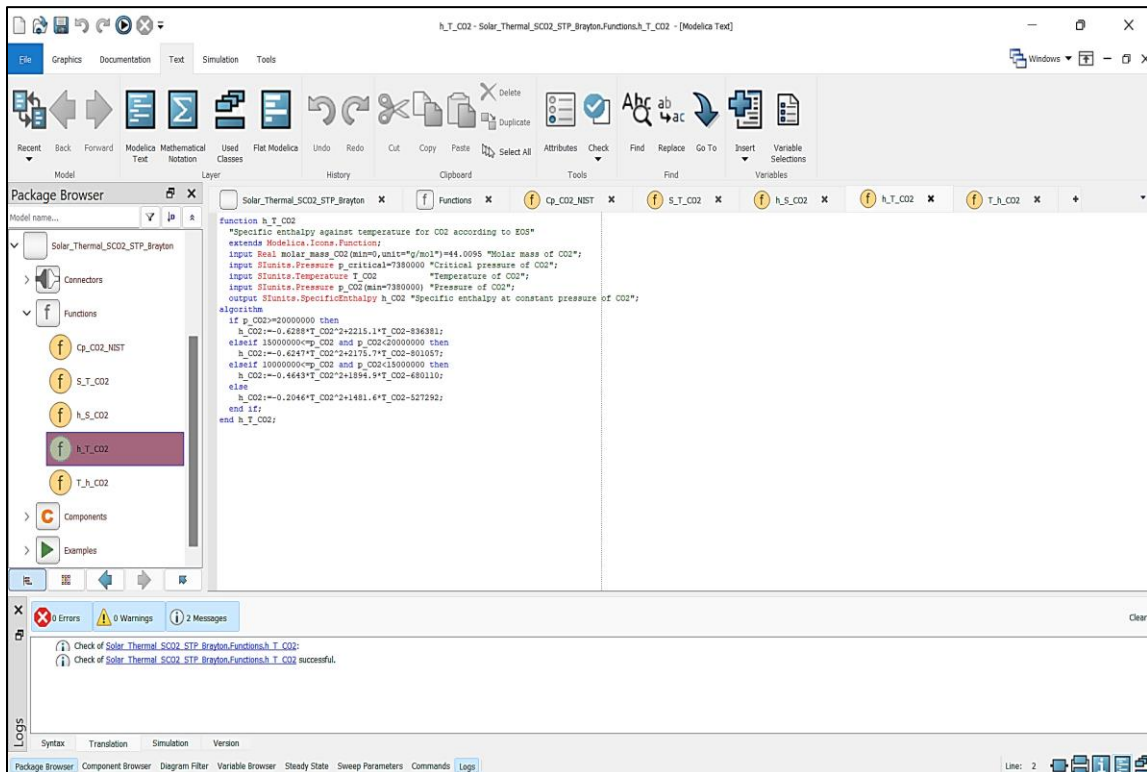
Με βάση την προηγούμενη μεθοδολογία η οποία αφορά στη μοντελοποίηση των ιδιοτήτων του διοξειδίου του άνθρακα, δημιουργούνται οι αντίστοιχες συναρτήσεις μία για κάθε συσχέτιση μεγεθών. Στην **Εικόνα 142** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της συνάρτησης « $S_T_CO_2$ », η οποία αφορά τη συσχέτιση εντροπίας και θερμοκρασίας. Στην **Εικόνα 143** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της συνάρτησης « $h_S_CO_2$ », η οποία αφορά τη συσχέτιση ενθαλπίας και εντροπίας. Στην **Εικόνα 144** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της συνάρτησης « $h_T_CO_2$ », η οποία αφορά τη συσχέτιση ενθαλπίας και θερμοκρασίας. Στην **Εικόνα 145** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της συνάρτησης « $T_h_CO_2$ », η οποία αφορά τη συσχέτιση θερμοκρασίας και ενθαλπίας, αλλά με την ενθαλπία ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Τέλος, στην **Εικόνα 146** παρουσιάζεται η τελική προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Functions» [72].



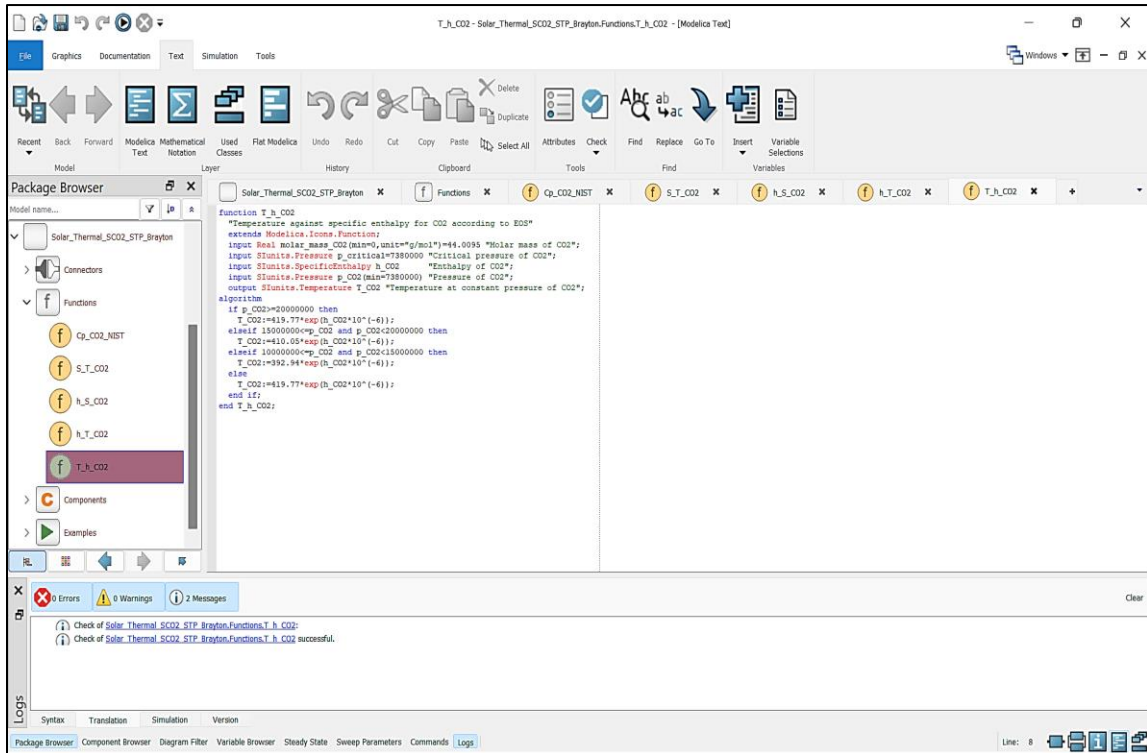
Εικόνα 142: Προβολή κειμένου της συνάρτησης « $S_T_CO_2$ » στο λογισμικό Dymola [72]



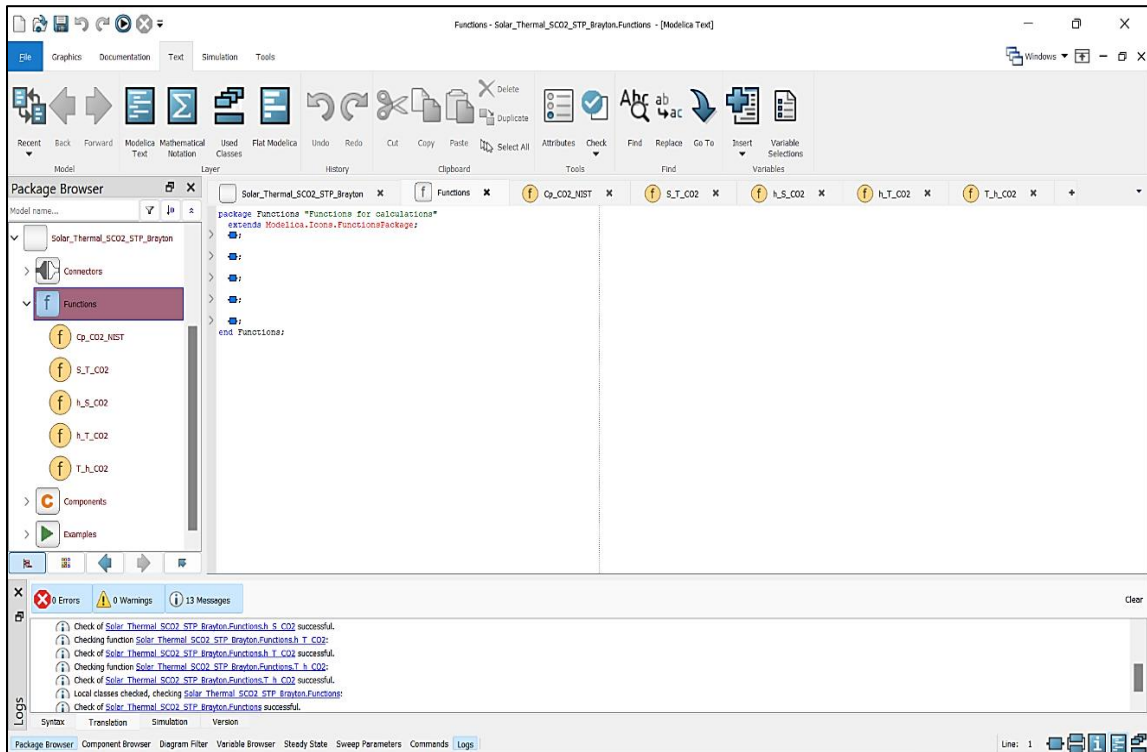
Εικόνα 143: Προβολή κειμένου της συνάρτησης «h_S_CO2» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 144: Προβολή κειμένου της συνάρτησης «h_T_CO2» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 145: Προβολή κειμένου της συνάρτησης «T_h_CO2» στο λογισμικό Dymola [72]



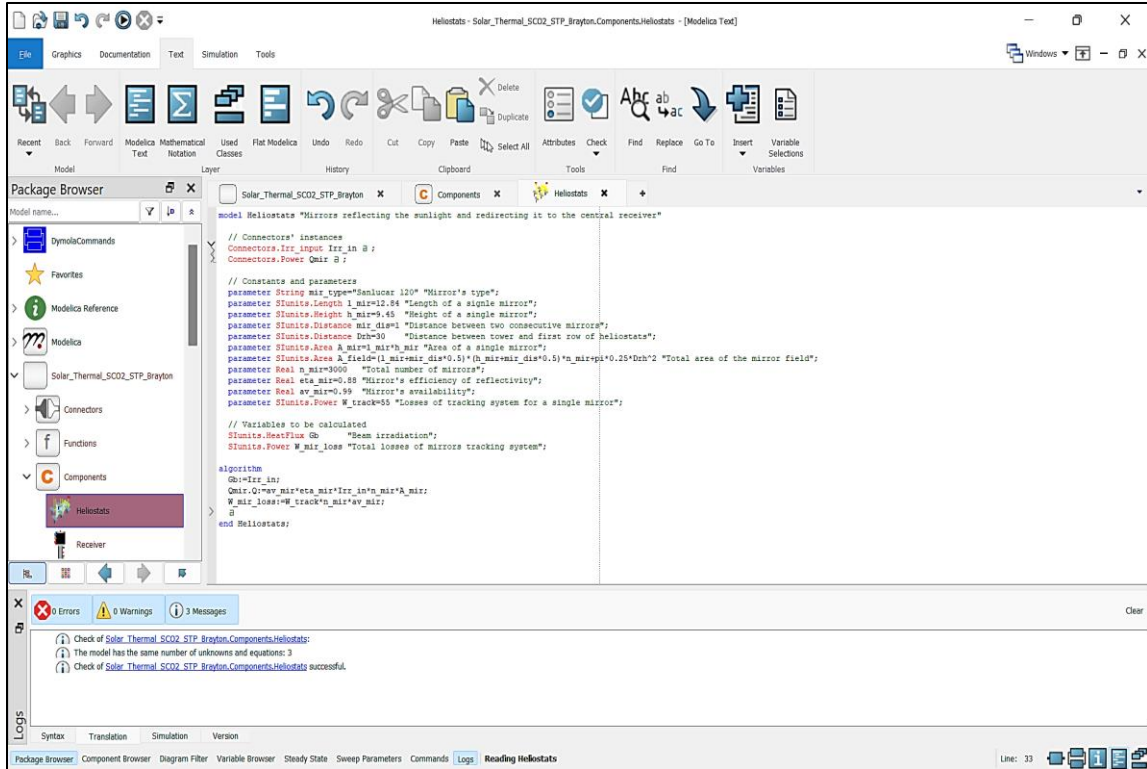
Εικόνα 146: Τελική προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Functions» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4. Μοντελοποίηση αντικειμένων (models modelling)

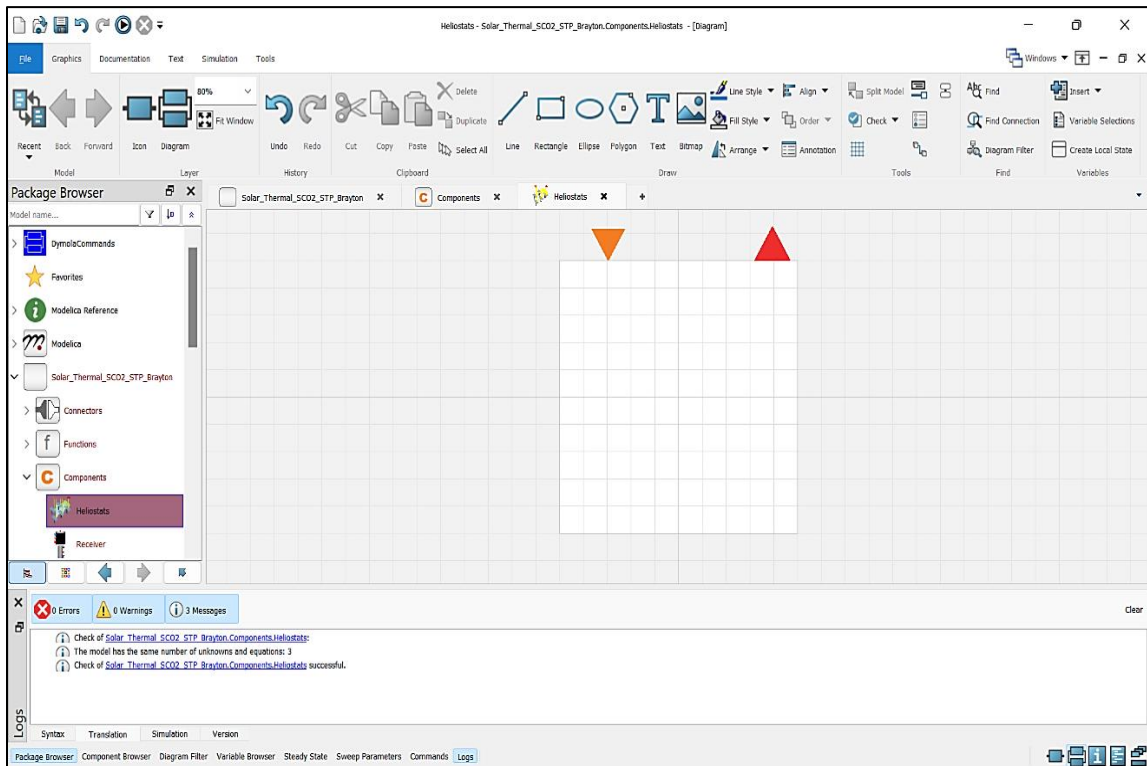
8.4.1. Μοντελοποίηση ηλιοστατών (Heliostats model)

Οι ηλιοστάτες αντανακλούν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και την ανακατευθύνουν προς ένα κοινό σημείο, τον κεντρικό δέκτη του ηλιακού πύργου. Αρχικά επιλέγεται ο τύπος του ηλιοστάτη και καθορίζεται η γεωμετρία του η οποία θα είναι ορθογωνική. Επιπλέον, καθορίζεται η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών ηλιοστατών, καθώς επίσης και η απόσταση της πρώτης σειράς από τη βάση του πύργου του κεντρικού δεκτή. Καθορίζοντας και τον συνολικό αριθμό τους, είναι δυνατός ο υπολογισμός της συνολικής έκτασης της εγκατάστασης. Επίσης, εισάγεται η τιμή της ανακλαστικότητας της επιφάνειας των ηλιοστατών, η οποία αποτελεί τον πρώτο παράγοντα για τον υπολογισμό του συνολικού οπτικού βαθμού απόδοσης (ο οποίος υπολογίζεται στο μοντέλο του κεντρικού δέκτη). Τέλος, καθορίζεται η ετήσια διαθεσιμότητα των ηλιοστατών καθώς επίσης και οι απώλειες του συστήματος κίνησης σε δυο άξονες, το οποίο σκοπό έχει να ακολουθεί ο ηλιοστάτης την κίνηση του ηλίου κατά τη διάρκεια της ημέρας [7][77].

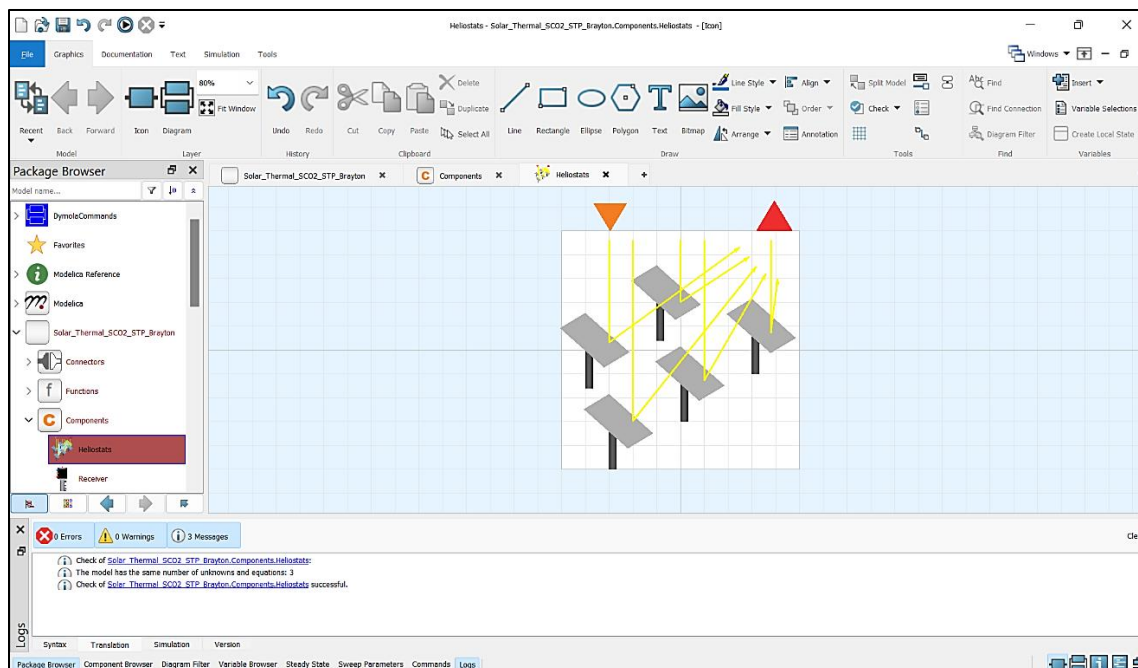
Στην προβολή διαγράμματος (Diagram view) της καρτέλας των γραφικών (Graphics) εισάγονται τα μοντέλα που αποτελούν το εκάστοτε σύστημα. Στην παρούσα εργασία, δεν γίνεται χρήση έτοιμων μοντέλων του λογισμικού Dymola, με μοναδική εξαίρεση τον ολοκληρωτή (Integrator model). Όμως, θα πρέπει να γίνει εισαγωγή των συνδέσμων που απαιτούνται για το κάθε μοντέλο. Το μοντέλο των ηλιοστατών απαιτεί δυο συνδέσμους, έναν τύπου «Irr_input» για να εισάγει τις τιμές της άμεσης προσπίπτουσας ακτινοβολίας από το μοντέλο των καιρικών συνθηκών και έναν τύπου «Power», ο οποίος θα εξάγει τη συνολική διαθέσιμη ισχύ που ανακλάται από τους ηλιοστάτες προς τον κεντρικό δέκτη. Οι σύνδεσμοι εισάγονται με τη μέθοδο *'drag and drop'* από το τμήμα των βιβλιοθηκών (Package Browser) προς το σχεδιαστικό μέρος της προβολής διαγράμματος. Η θέση τους τροποποιείται μετακινώντας τους είτε με το ποντίκι, είτε επιλέγοντας τους και μετακινώντας τους με τα βέλη ενός πληκτρολογίου. Το μέγεθος τους τροποποιείται μετακινώντας τα κόκκινα τετράγωνα κουτάκια που οριοθετούν το μέγεθος τους, αφού επιλεγεί το επιθυμητό αντικείμενο. Ο προσανατολισμός τους τροποποιείται με χρήση του εργαλείου διευθέτησης (Arrange) της γραμμής εργαλείων της καρτέλας γραφικών. Στην προβολή εικόνας του αντικειμένου και με τη χρήση των εργαλείων της καρτέλας γραφικών, είναι δυνατή η δημιουργία ενός σχεδιαγράμματος του μοντέλου για οπτικούς και αισθητικούς λόγους. Στην **Εικόνα 147** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου των ηλιοστατών. Στην **Εικόνα 148** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 149** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



Εικόνα 147: Προβολή κειμένου του μοντέλου «HelioStats» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 148: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «HelioStats» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 149: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Heliostats» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.2. Μοντελοποίηση κεντρικού δέκτη (Receiver model)

Ο κεντρικός δέκτης απορροφά μέρος της ανακλώμενης ακτινοβολίας που προσπίπτει στην εξωτερική του επιφάνεια. Στη συνέχεια, μέσω ενός εσωτερικού εναλλάκτη θερμότητας, μεταφέρει τη θερμότητα που διαθέτει λόγω πολύ υψηλής θερμοκρασίας στο ρευστό που διακινεί, δηλαδή κάποιο τηγμένο άλας. Αρχικά, δηλώνονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πύργου και του δέκτη, δηλαδή το ύψος τους αλλά και η διάμετρος της κυλινδρικής επιφάνειας του δέκτη. Επίσης, ορίζεται ο συντελεστής εκπομπής της εξωτερικής επιφάνειας του δέκτη, ο οποίος λαμβάνει μικρή τιμή κυρίως λόγω του χρώματος του δέκτη, το οποίο είναι συνήθως μαύρο ακριβώς για να μειώνονται οι απώλειες ακτινοβολίας από τον δέκτη προς το περιβάλλον. Έπειτα, είναι απαραίτητη η γνώση των επιμέρους βαθμών απόδοσης οι οποίοι χρειάζονται για τον υπολογισμό του συνολικού οπτικού βαθμού απόδοσης του ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος. Επιπρόσθετα, δηλώνονται οι παράμετροι που αφορούν τον εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας του κεντρικού δέκτη, καθώς επίσης και οι ιδιότητες του αέρα έτσι ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής θερμικής συναγωγής μέσω του αδιάστατου αριθμού Nusselt [77].

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται για εγκάρσια ροή σε κύλινδρο με βάση την **Εξίσωση (50)**, όπου ο αδιάστατος αριθμός Reynolds υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (51)** και ο αδιάστατος αριθμός Prandtl με βάση την **Εξίσωση (52)**. Τέλος, δηλώνονται οι παράμετροι που αφορούν το τηγμένο άλας, δηλαδή η παροχή μάζας του, η πίεση, ο τύπος και η ειδική του θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση. Ο ισολογισμός ενέργειας στον κεντρικό δέκτη γίνεται με βάση τις εξισώσεις που έχουν αναλυθεί στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας [47][78][79].

$$Nu_D = \frac{h \cdot D}{k} = 0,3 + \frac{0,62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (\frac{0,4}{Pr})^{2/3}]^{1/4}} [1 + (\frac{Re_D}{282000})^{5/8}]^{4/5} \quad (50)$$

$$Re_D = \frac{V_a \cdot D}{\nu} \quad (51)$$

$$Pr = \frac{10^9}{1,1 \cdot T^3 - 1200 \cdot T^2 + 322000 \cdot T + 1,393 \cdot 10^9} \quad (52)$$

οπού:

h = συντελεστής συναγωγής κυλινδρικής επιφάνειας με αέρα περιβάλλοντος [W/m²K]

D = διάμετρος κυλίνδρου [m]

k = συντελεστής αγωγιμότητας αέρα [W/mK]

Nu_D = μέσος αριθμός Nusselt [-]

Re_D = μέσος αριθμός Reynolds [-]

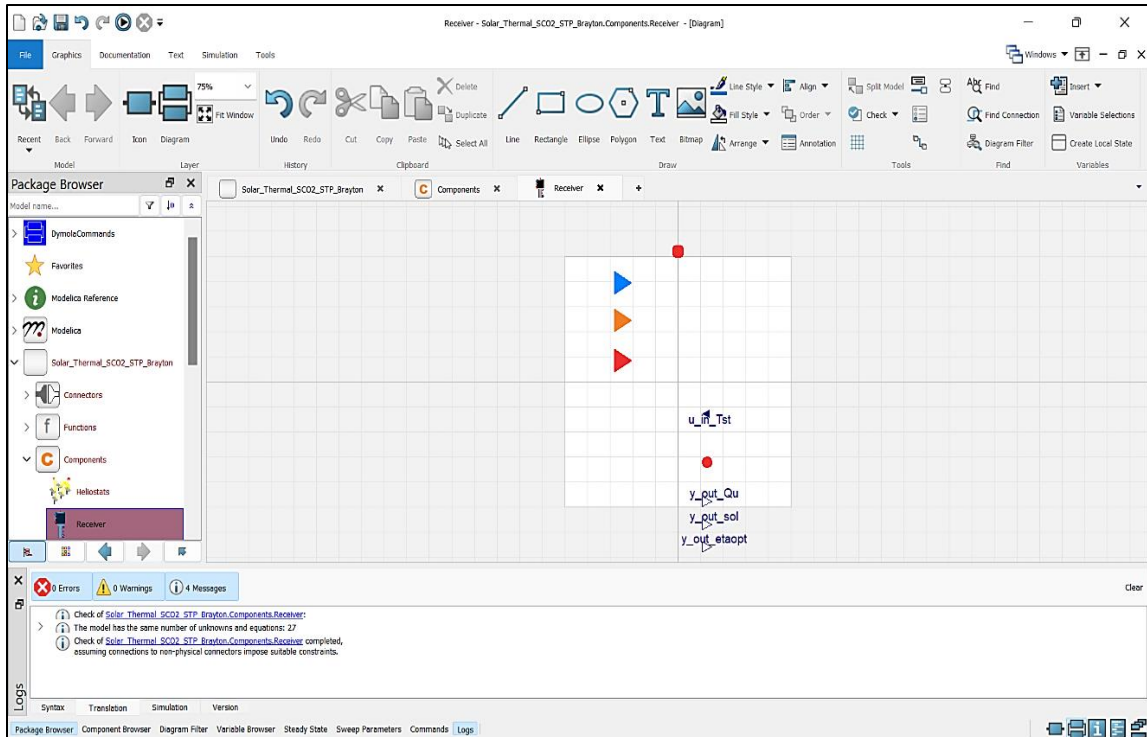
Pr = αριθμός Prandtl [-]

V_a = ταχύτητα του ανέμου [m/s]

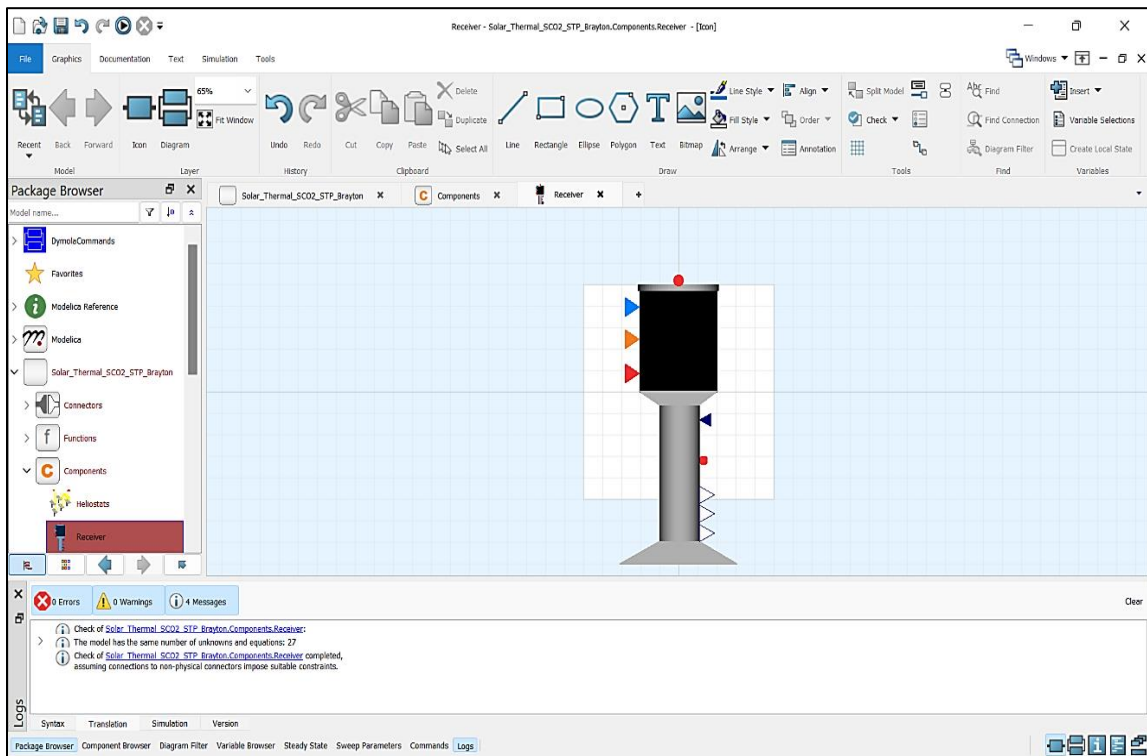
ν = κινηματικό ιξώδες αέρα [m²/s]

T = θερμοκρασία αέρα [°C]

Στην προβολή διαγράμματος εισάγονται τα μοντέλα των συνδέσμων που είναι απαραίτητα για τη μοντελοποίηση του κεντρικού δέκτη. Αρχικά, εισάγονται δυο σύνδεσμοι τύπου «Heat», οι οποίοι μοντελοποιούν το τηγμένο άλας στην είσοδο και την έξοδο από τον κεντρικό δέκτη αντίστοιχα. Επίσης, εισάγεται ένας σύνδεσμος τύπου «Temp_input» έτσι ώστε να εισάγεται στο δέκτη η πληροφορία της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος και να είναι δυνατός ο υπολογισμός των θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον, τόσο λόγω συναγωγής, όσο και λόγω ακτινοβολίας. Επιπλέον, εισάγεται ένας σύνδεσμος τύπου «Power» ο οποίος θα εισάγει την πληροφορία της συνολικής διαθέσιμης ηλιακής ισχύος, όπως αυτή υπολογίζεται και εξάγεται από το γήπεδο των ηλιοστατών. Επιπρόσθετα, εισάγεται ένας σύνδεσμος τύπου «Irr_input» έτσι ώστε να γίνεται έλεγχος λειτουργίας του πύργου. Όταν η τιμή της διαθέσιμης άμεσης ακτινοβολίας είναι μικρότερη από κάποιο όριο, το τηγμένο άλας δεν περνά μέσω του εναλλάκτη του δέκτη αλλά αντίθετα τον παρακάμπτει. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγονται αρνητικές τιμές της ωφέλιμης ισχύος οι οποίες θα προέκυπταν λόγω του γεγονότος ότι κατά τη διάρκεια της νύχτας εξακολουθούν να υπάρχουν απώλειες από τον δέκτη προς το περιβάλλον λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Στη συνέχεια, εισάγεται ένας σύνδεσμος τύπου «RealInput» ο οποίος θα εισάγει την πληροφορία της θερμοκρασίας του θερμού δοχείου. Όταν η θερμοκρασία του θερμού δοχείου πέφτει κάτω από κάποιο όριο, η διακινούμενη παροχή μάζας του τηγμένου άλατος μειώνεται, έτσι ώστε να μην απάγεται μεγάλη ποσότητα θερμότητας από το δοχείο έως ότου η θερμοκρασία του επανέλθει σε υψηλά επίπεδα. Τέλος, εισάγονται τρεις σύνδεσμοι τύπου «RealOutput» οι οποίοι θα εξάγουν δεδομένα για τον υπολογισμό των βαθμών απόδοσης που αντιπροσωπεύουν την εγκατάσταση [72]



Εικόνα 152: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Receiver» στο λογισμικό Dymola [72]

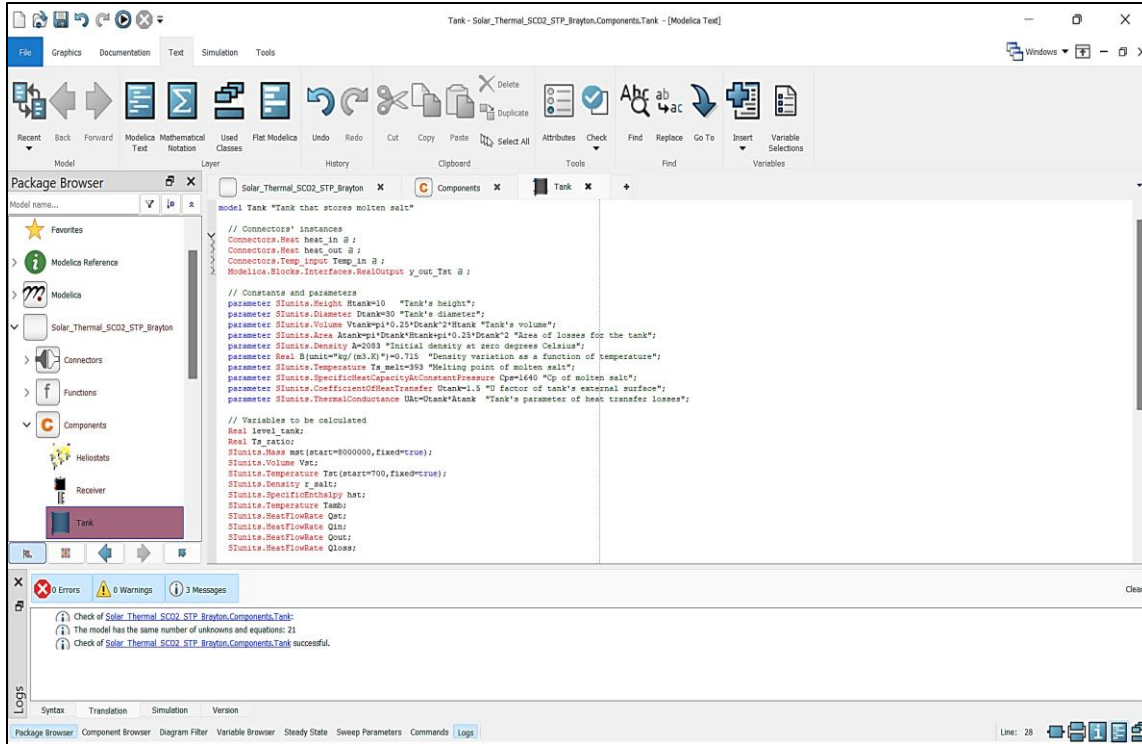


Εικόνα 153: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Receiver» στο λογισμικό Dymola [72]

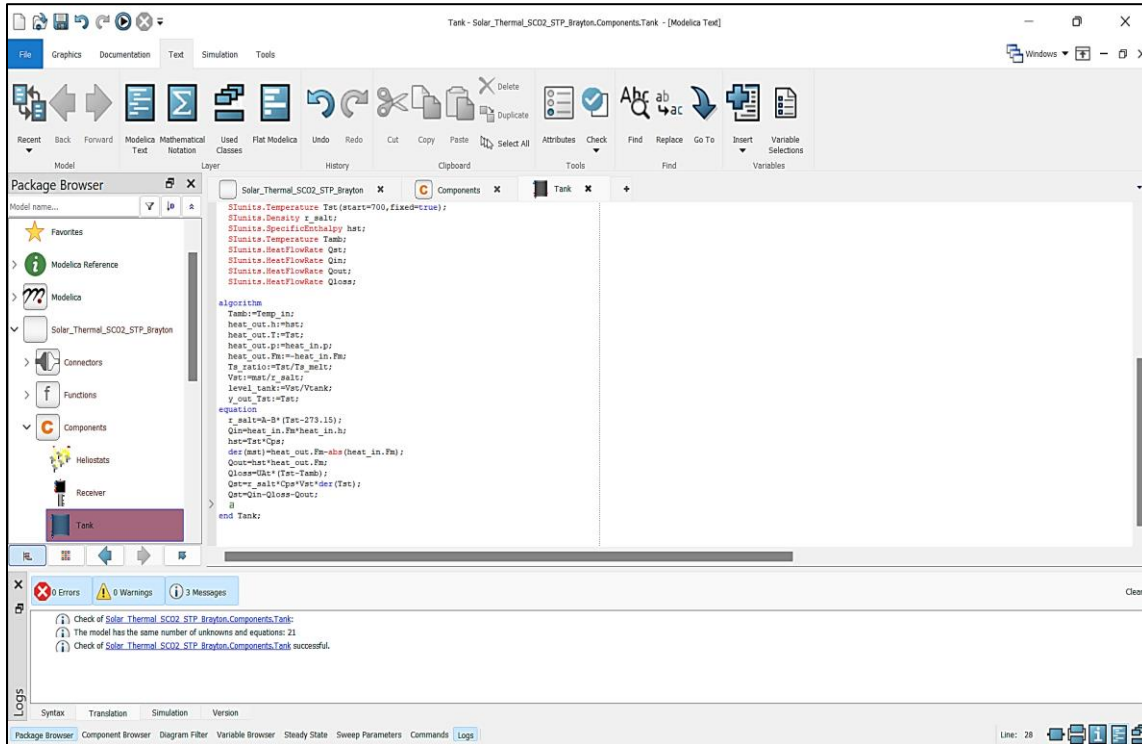
8.4.3. Μοντελοποίηση δεξαμενής (Thermal storage model)

Στο σύστημα που εξετάζεται υπάρχουν δυο δεξαμενές (thermal storages), μια κατάντη του κεντρικού δέκτη στην οποία αποθηκεύεται το θερμό τηγμένο άλας που εξέρχεται αυτού και μια ανάντη του κεντρικού δέκτη στην οποία αποθηκεύεται το τηγμένο άλας μειωμένης θερμοκρασίας που εξέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας. Στις παραμέτρους της δεξαμενής εισάγονται οι γεωμετρικές διαστάσεις της, καθώς επίσης και πληροφορίες που αφορούν τον συντελεστή θερμοπερατότητας (U factor) της επιφάνειας της, έτσι ώστε να υπολογίζονται οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Επίσης, εισάγονται πληροφορίες που αφορούν το τηγμένο άλας, όπως αυτές ορίστηκαν και περιγράφηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο. Ο ισολογισμός ενέργειας γίνεται με βάση τις εξισώσεις που περιγράφηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο. Σημαντικές μεταβλητές που πρέπει να καταγράφονται αποτελούν η στάθμη του άλατος εντός της δεξαμενής, καθώς επίσης και η θερμοκρασία του, η οποία δεν θα πρέπει να γίνει μικρότερη από τη θερμοκρασία του σημείου τήξης του άλατος. Η μεταβολή στη στάθμη του άλατος δεν μεταβάλλεται μόνο λόγω της εισερχομένης και εξερχομένης του μάζας, αλλά και εξαιτίας της μεταβαλλόμενης πυκνότητας του λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας του. Τέλος, κατά την έναρξη της προσομοίωσης, η ποσότητα και η θερμοκρασία του άλατος εντός της δεξαμενής θα πρέπει να είναι γνωστές. Γι' αυτό, ορίζονται ως αρχικοποιήσεις στο σύστημα των εξισώσεων που θα επιλυθεί κατά την προσομοίωση. Η διάκριση μεταξύ των δυο δεξαμενών θα γίνει από τον ορισμό των παραμέτρων της κάθε μιας. Έτσι, δεν είναι απαραίτητη η δημιουργία δυο ξεχωριστών μοντέλων για κάθε μία δεξαμενή [7][50].

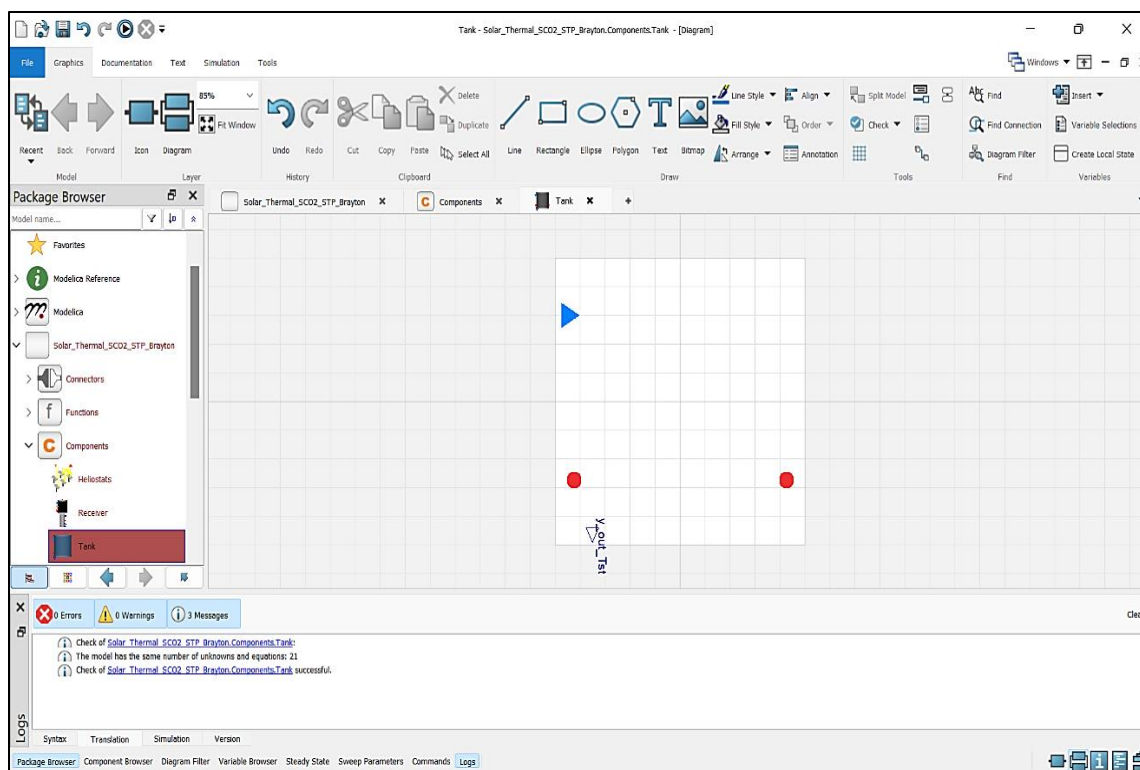
Στην προβολή διαγράμματος θα πρέπει να εισαχθούν οι απαραίτητοι σύνδεσμοι για τη μοντελοποίηση της δεξαμενής. Αρχικά, εισάγονται δυο σύνδεσμοι τύπου «Heat» για τη μοντελοποίηση των ιδιοτήτων του τηγμένου άλατος κατά την είσοδο και την έξοδο του από τη δεξαμενή. Στη συνέχεια, εισάγεται ένας σύνδεσμος τύπου «Temp_input» έτσι ώστε να είναι διαθέσιμη η πληροφορία της θερμοκρασίας περιβάλλοντος για να είναι δυνατός ο υπολογισμός των θερμικών απωλειών από τη δεξαμενή προς το περιβάλλον. Τέλος, εισάγεται ένας σύνδεσμος τύπου «RealOutput» με σκοπό τη μεταφορά της πληροφορίας της θερμοκρασίας εντός του δοχείου προς άλλα μοντέλα του συστήματος. Στην **Εικόνα 154** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου της δεξαμενής που αφορά τις παραμέτρους, ενώ στην **Εικόνα 155** η προβολή κειμένου που αφορά τους υπολογισμούς και τους ισολογισμούς ενέργειας. Στην **Εικόνα 156** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 157** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



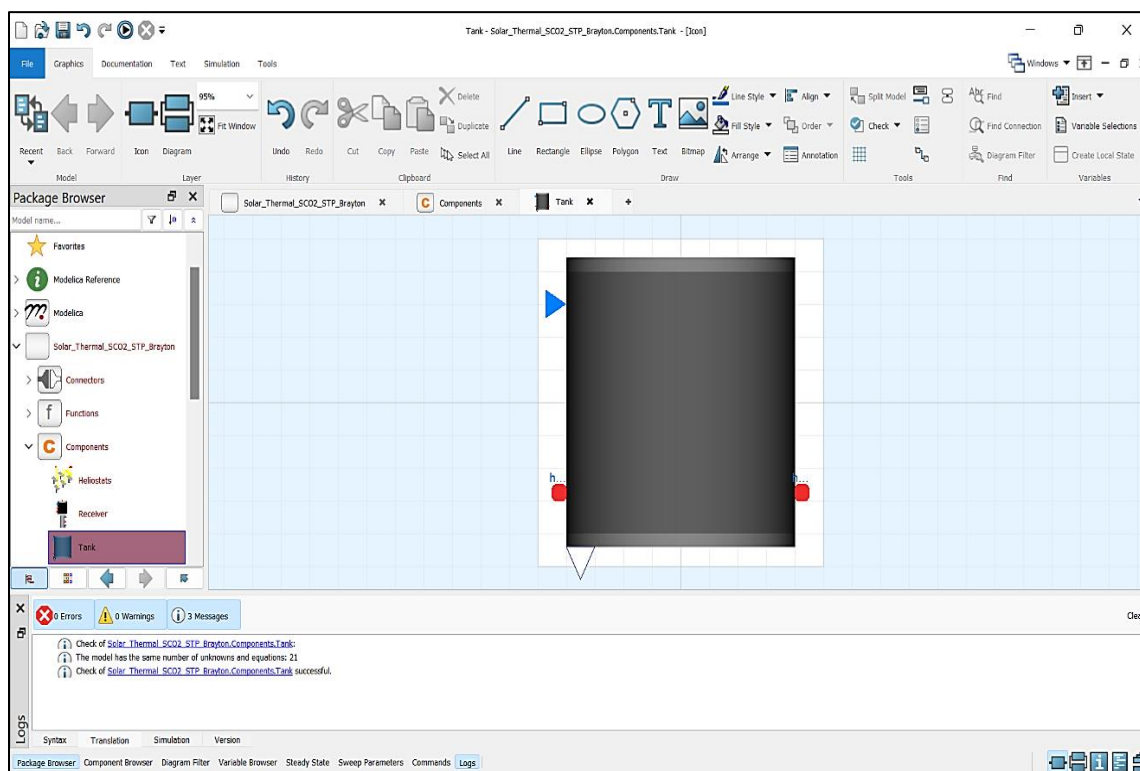
Εικόνα 154: Προβολή κειμένου (παραμέτρων) του μοντέλου «Tank» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 155: Προβολή κειμένου (εξισώσεων) του μοντέλου «Tank» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 156: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Tank» στο λογισμικό Dymola [72]

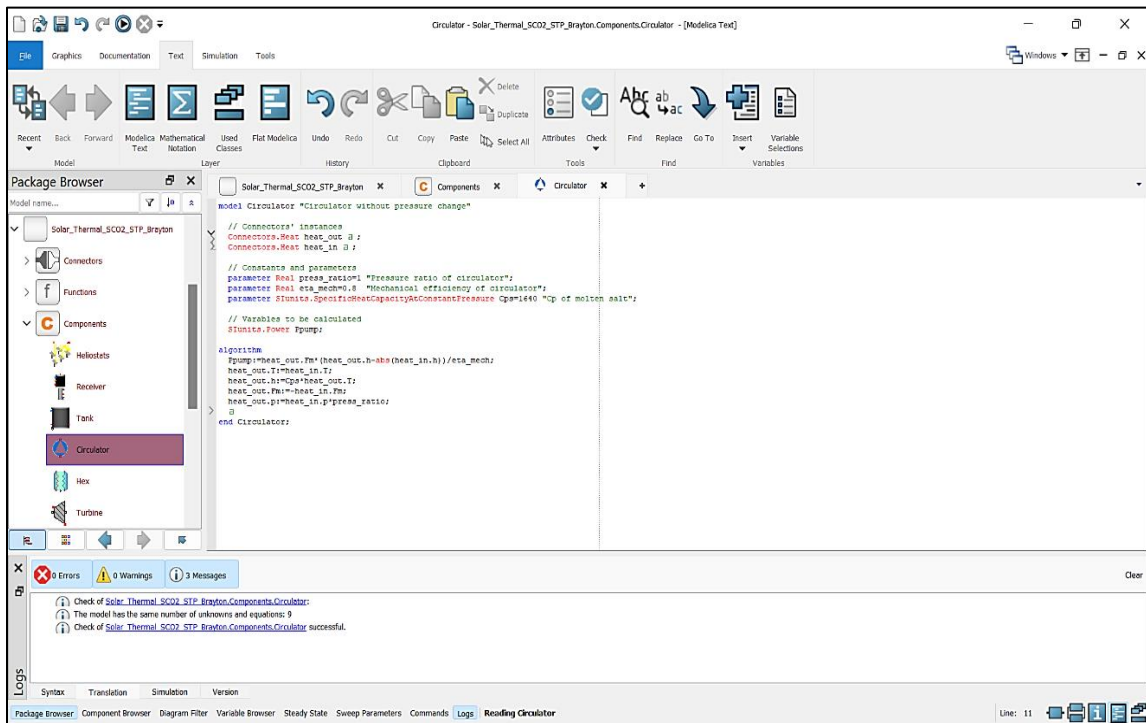


Εικόνα 157: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Tank» στο λογισμικό Dymola [72]

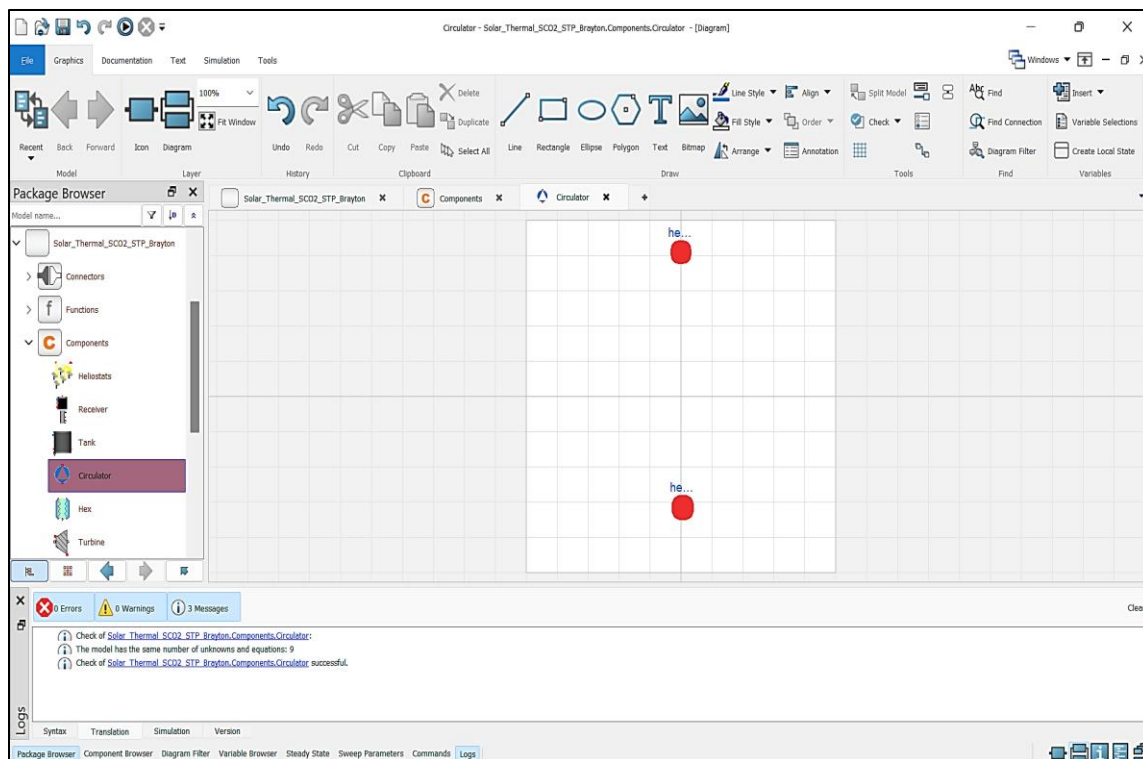
8.4.4. Μοντελοποίηση κυκλοφορητή (Circulator model)

Ο κυκλοφορητής είναι απαραίτητος έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ροή του τηγμένου άλατος στο σύστημα. Οι κυκλοφορητές που χρησιμοποιούνται στην εργασία δεν μεταβάλλουν την πίεση του ρευστού. Παρόλα αυτά, για σκοπούς πληρότητας εισάγεται ένας λόγος συμπίεσης, σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η τροποποίηση και χρήση του εν λόγω μοντέλου ως αντλία σε κάποιο άλλο σύστημα. Θεωρώντας αμελητέα μεταβολή πίεσης και ενθαλπίας, η καταναλισκόμενη ενέργεια στον κυκλοφορητή αναμένεται να είναι μηδενική. Στην πραγματικότητα δεν θα είναι μηδενική, αλλά θα είναι αμελητέα σε σύγκριση με την καθαρά παραγόμενη ενέργεια στο θερμοδυναμικό κύκλο Brayton [51].

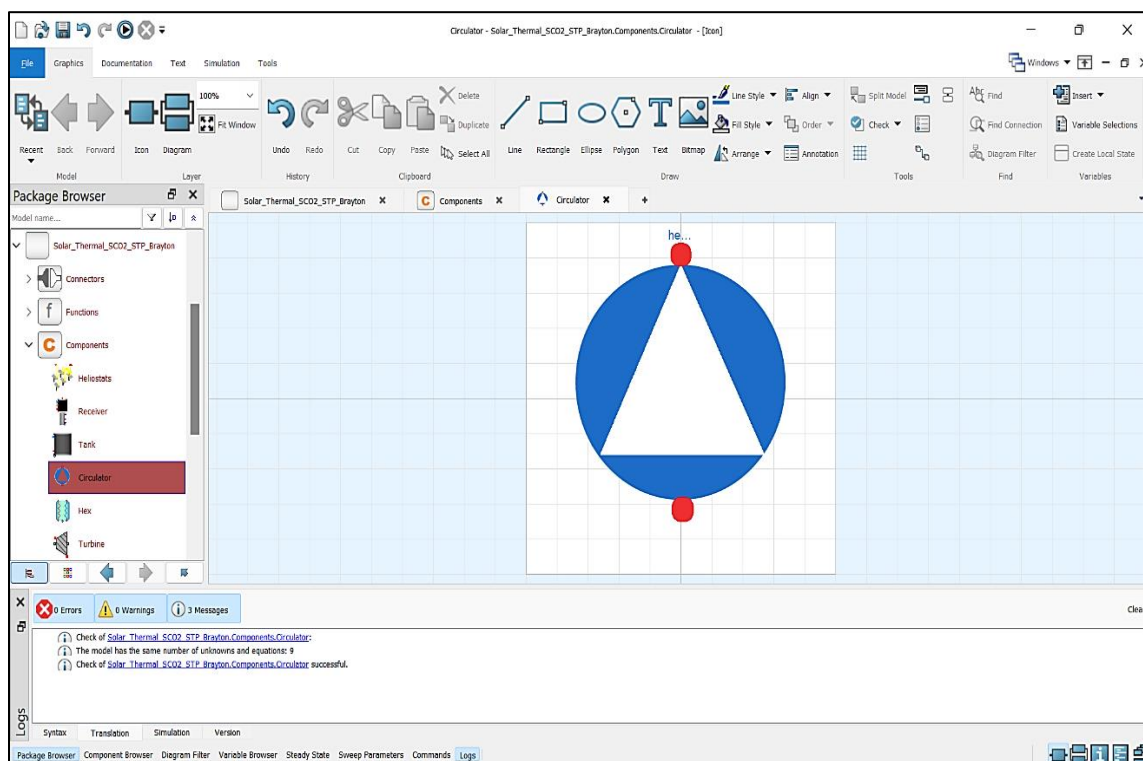
Στην προβολή διαγράμματος εισάγονται οι απαραίτητοι σύνδεσμοι για τη μοντελοποίηση του κυκλοφορητή. Οι μόνοι σύνδεσμοι που απαιτούνται είναι δύο τύπου «Heat» για τη μοντελοποίηση της εισόδου και της εξόδου του τηγμένου άλατος από τον κυκλοφορητή. Στην **Εικόνα 158** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου του κυκλοφορητή. Στην **Εικόνα 159** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 160** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



Εικόνα 158: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Circulator» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 159: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Circulator» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 160: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Circulator» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.5. Μοντελοποίηση εναλλάκτη θερμότητας (Heat exchanger model)

Ο εναλλάκτης θερμότητας μοντελοποιείται με βάση τη μέθοδο NTU (Number of Transfer Units). Αρχικά, θα πρέπει να οριστούν οι παράμετροι που αφορούν την επιφάνεια συναλλαγής και τον συντελεστή θερμοπερατότητας του εναλλάκτη θερμότητας. Οι θερμοκρασίες εισόδου, καθώς επίσης και οι παροχές μάζας των δυο ρευστών είναι γνωστές, αφού για το μεν τηγμένο άλας είναι η παροχή μάζας που εξέρχεται από τη δεξαμενή που είναι αποθηκευμένο σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ για το δε διοξείδιο του άνθρακα είναι η παροχή μάζας που διακινείται στον κύκλο Brayton. Ο ισολογισμός ενέργειας εκφράζεται με βάση την **Εξίσωση (53)**, ενώ η αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη αντιρροής υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (54)**. Ορίζοντας το μέγιστο και το ελάχιστο γινόμενο θερμοχωρητικότητας-παροχής μάζας με βάση την **Εξίσωση (55)** και την **Εξίσωση (56)** αντίστοιχα, το σύστημα εξισώσεων συμπληρώνεται από την **Εξίσωση (57)** που οδηγεί στον υπολογισμό της αύξησης της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου [80].

$$\dot{m}_s C_{p_s} (T_{si} - T_{so}) = \dot{m}_{CO_2} C_{p_{CO_2}} (T_{CO_2o} - T_{CO_2i}) \quad (53)$$

όπου:

\dot{m}_s = παροχή μάζας τηγμένου άλατος [kg/s]

\dot{m}_{CO_2} = παροχή μάζας διοξειδίου του άνθρακα [kg/s]

C_{p_s} = ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση τηγμένου άλατος [J/kgK]

$C_{p_{CO_2}}$ = ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση διοξειδίου του άνθρακα [J/kgK]

T_{si} = θερμοκρασία εισόδου τηγμένου άλατος [K]

T_{so} = θερμοκρασία εξόδου τηγμένου άλατος [K]

T_{CO_2i} = θερμοκρασία εισόδου διοξειδίου του άνθρακα [K]

T_{CO_2o} = θερμοκρασία εξόδου διοξειδίου του άνθρακα [K]

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(-\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \cdot \frac{U \cdot A}{C_{min}}\right)}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} \cdot \exp\left(-\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \cdot \frac{U \cdot A}{C_{min}}\right)} \quad (54)$$

όπου:

ε = αποτελεσματικότητα εναλλάκτη [-]

U = συντελεστής θερμοπερατότητας εναλλάκτη [W/m²K]

A = επιφάνεια εναλλάκτη [m²]

$$C_{max} = \max(\dot{m}_s C_{p_s}, \dot{m}_{CO_2} C_{p_{CO_2}}) \quad (55)$$

$$C_{min} = \min(\dot{m}_s C_{p_s}, \dot{m}_{CO_2} C_{p_{CO_2}}) \quad (56)$$

όπου:

C_{min} = ελάχιστο γινόμενο θερμοχωρητικότητας-παροχής μάζας [W/K]

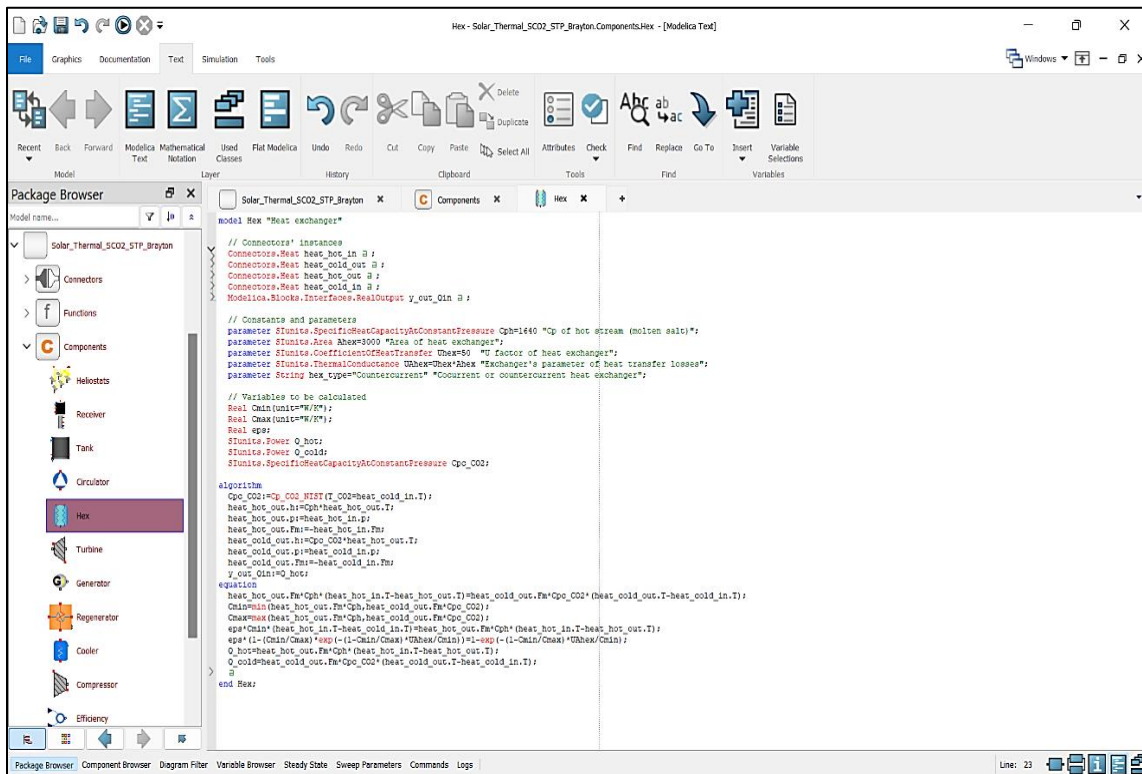
C_{max} = μέγιστο γινόμενο θερμοχωρητικότητας-παροχής μάζας [W/K]

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_s C_{p_s} (T_{si} - T_{so})}{C_{\min} (T_{si} - T_{CO2i})} \quad (57)$$

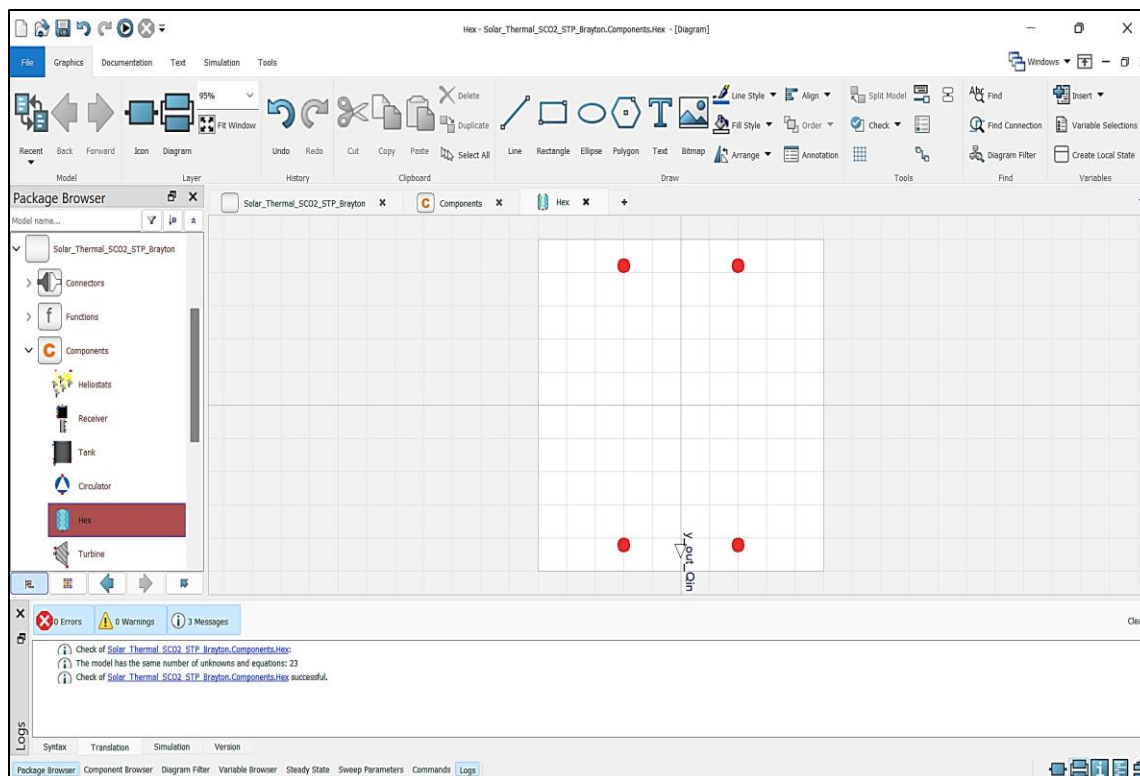
όπου:

ε = αποτελεσματικότητα εναλλάκτη [-]

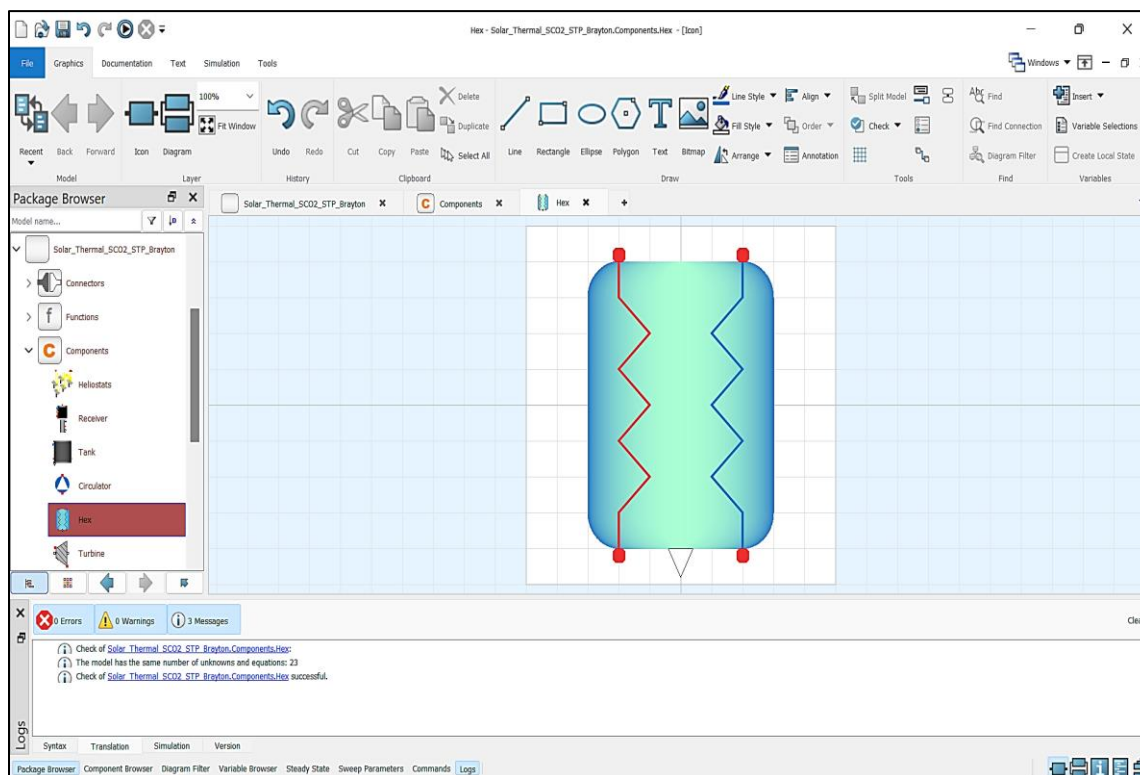
Στην προβολή διαγράμματος εισάγονται τα τέσσερα μοντέλα των συνδέσμων τύπου «Heat» που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση του εναλλάκτη θερμότητας. Οι δυο αφορούν τις ιδιότητες του τηγμένου άλατος στην είσοδο και την έξοδο του εναλλάκτη και οι υπόλοιποι δυο τις αντίστοιχες ιδιότητες για το διοξείδιο του άνθρακα. Επιπλέον, εισάγεται ένας σύνδεσμος τύπου «RealOutput», ο οποίος θα μεταφέρει την πληροφορία της εισερχομένης στο θερμοδυναμικό κύκλο ισχύος, με σκοπό τον υπολογισμό του θερμοδυναμικού βαθμού απόδοσης. Στην **Εικόνα 161** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου του εναλλάκτη θερμότητας. Στην **Εικόνα 162** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 163** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



Εικόνα 161: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Hex» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 162: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Hex» στο λογισμικό Dymola [72]

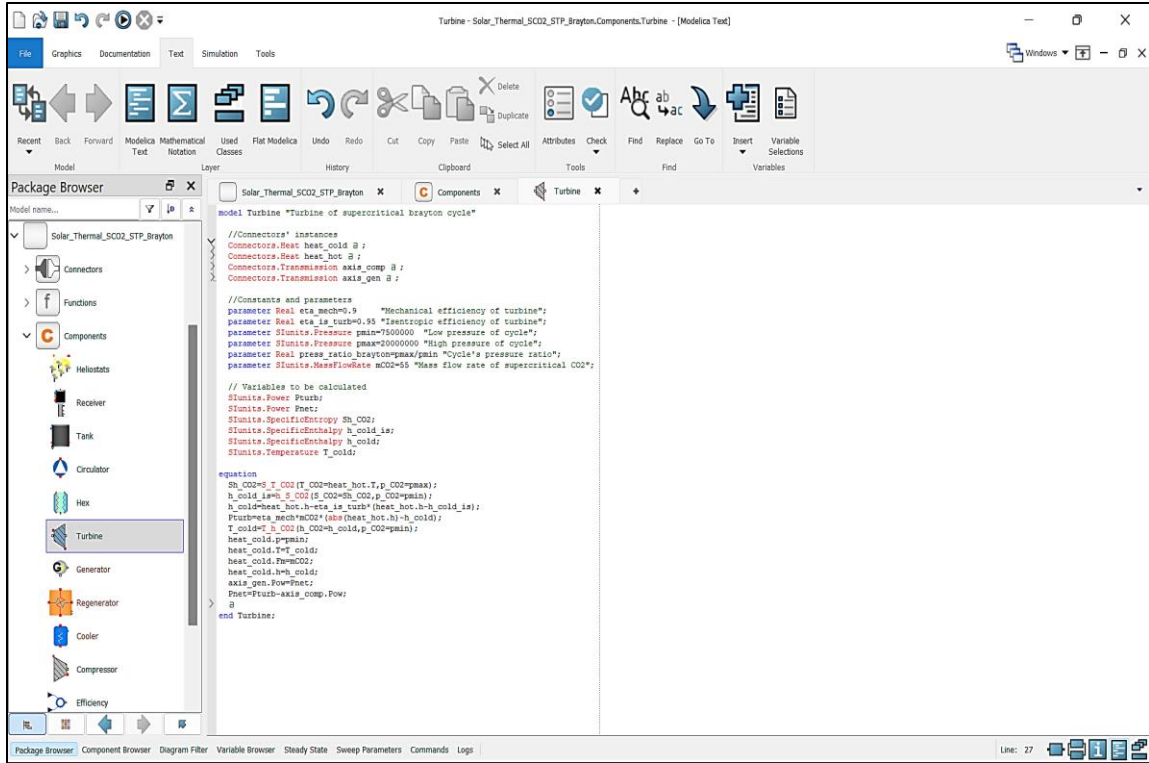


Εικόνα 163: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Hex» στο λογισμικό Dymola [72]

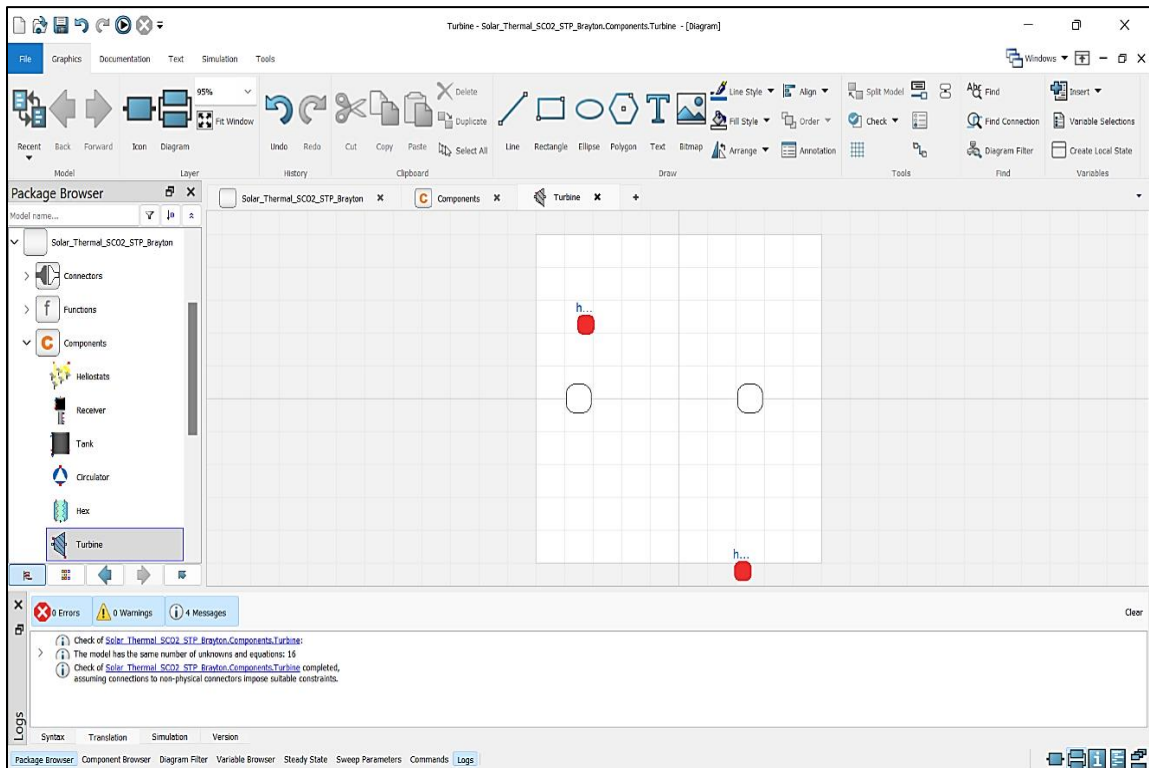
8.4.6. Μοντελοποίηση αεριοστρόβιλου (Turbine model)

Ο αεριοστρόβιλος εκτονώνει το εργαζόμενο μέσο προς παραγωγή μηχανικής ισχύος διαθέσιμης σε μια περιστρεφόμενη άτραχτο. Στον αεριοστρόβιλο, πέραν του μηχανικού βαθμού απόδοσης, ορίζεται ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης έτσι ώστε να υπολογίζεται η πραγματική μεταβολή ενθαλπίας σε αυτόν. Τέλος, ορίζεται η παροχή μάζας διοξειδίου του άνθρακα που θα διακινείται στον κύκλο Brayton καθώς επίσης και η μέγιστη και η ελάχιστη πίεση του κύκλου. Η ελάχιστη πίεση ορίζεται να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη πίεση του εργαζόμενου μέσου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι ο κύκλος θα λειτουργεί σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Γνωρίζοντας την κατάσταση στην είσοδο του αεριοστρόβιλου, υπολογίζεται η εντροπία του διοξειδίου του άνθρακα. Έτσι, είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός της ισεντροπικής και στη συνέχεια της πραγματικής ενθαλπίας. Χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις που επεξηγήθηκαν σε προηγούμενο εδάφιο του παρόντος κεφαλαίου, οι υπολογισμοί αυτοί οδηγούν εντέλει στον υπολογισμό της ισχύος του αεριοστρόβιλου [51][76].

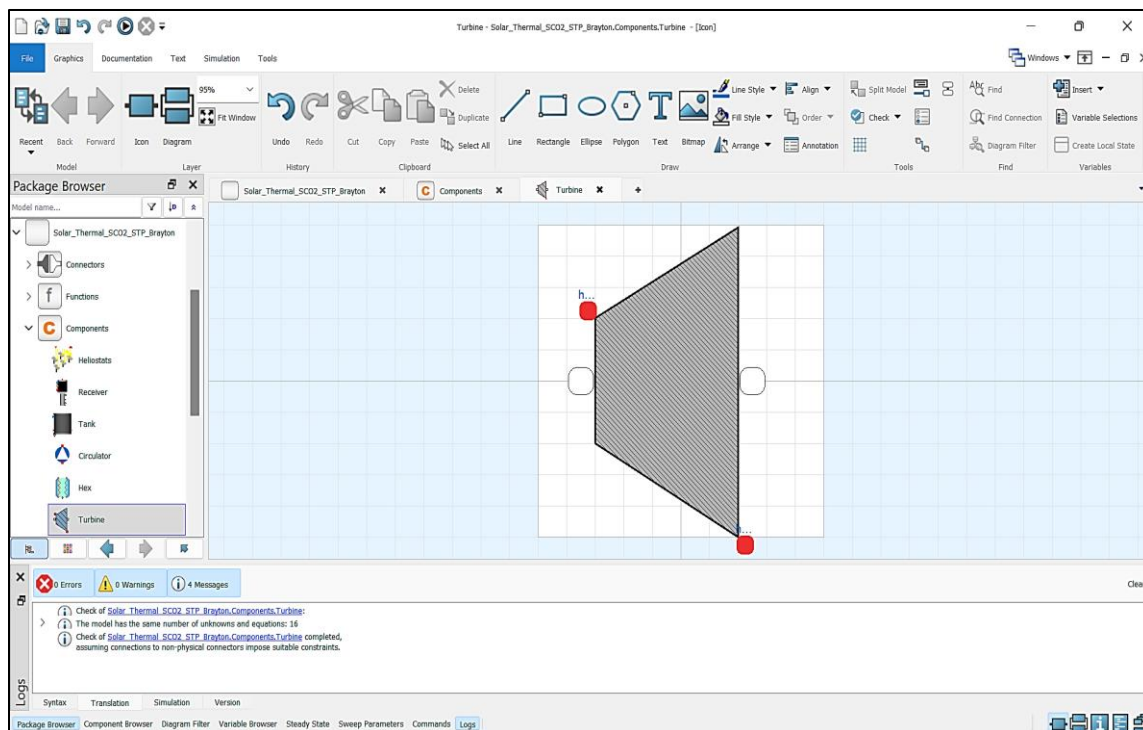
Στην προβολή διαγράμματος εισάγονται οι επιθυμητοί σύνδεσμοι για τη μοντελοποίηση του αεριοστρόβιλου. Αρχικά, εισάγονται δυο σύνδεσμοι τύπου «Heat» έτσι ώστε να μοντελοποιηθούν οι ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο και την έξοδο του αεριοστρόβιλου. Στη συνέχεια, εισάγονται δυο σύνδεσμοι τύπου «Transmission». Ο πρώτος αφορά τη μηχανική σύζευξη μεταξύ αεριοστρόβιλου και συμπιεστή. Διαμέσω αυτού, η καταναλισκόμενη ισχύς από τον συμπιεστή διαβιβάζεται στον αεριοστρόβιλο, έτσι ώστε να αφαιρεθεί από την παραγόμενη ισχύ του αεριοστρόβιλου και εντέλει να προκύψει η καθαρά παραγόμενη ισχύς. Τέλος, η καθαρά παραγόμενη ισχύς διαβιβάζεται μέσω του δεύτερου συνδέσμου τύπου «Transmission» προς τη γεννήτρια, με σκοπό τον τελικό υπολογισμό της καθαρά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Στην **Εικόνα 164** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου του αεριοστρόβιλου. Στην **Εικόνα 165** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 166** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



Εικόνα 164: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Turbine» στο λογισμικό Dymola [72]



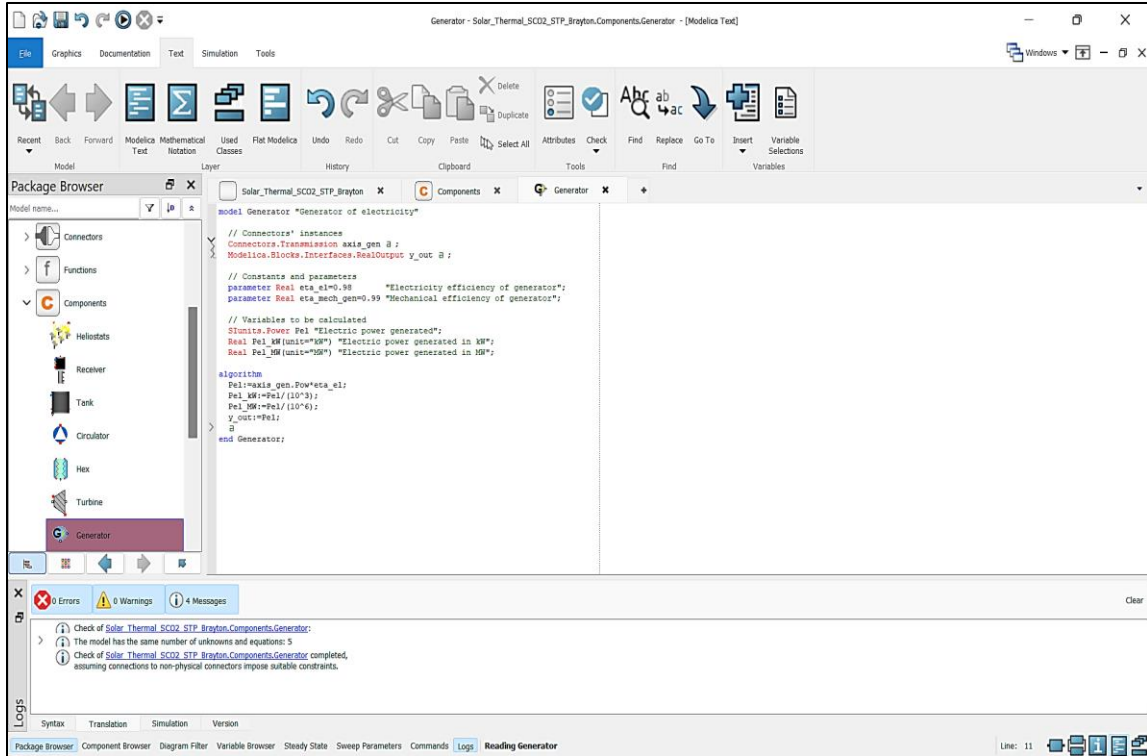
Εικόνα 165: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Turbine» στο λογισμικό Dymola [72]



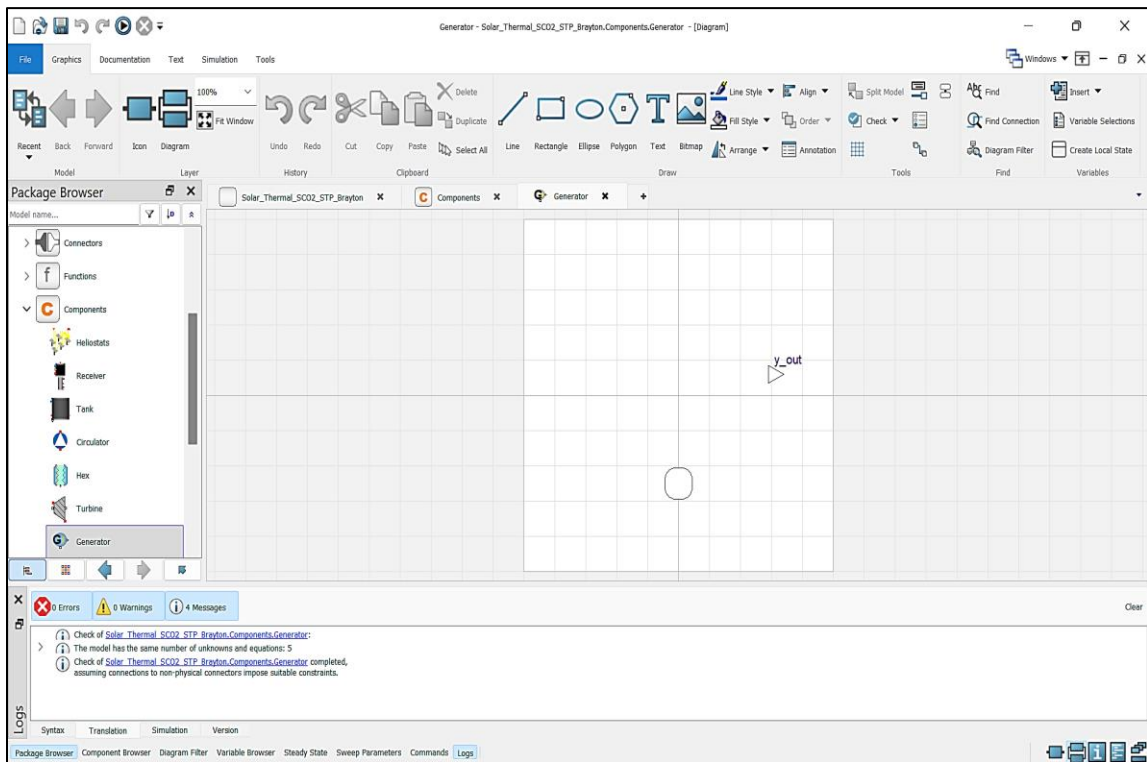
Εικόνα 166: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Turbine» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.7. Μοντελοποίηση γεννήτριας (Generator model)

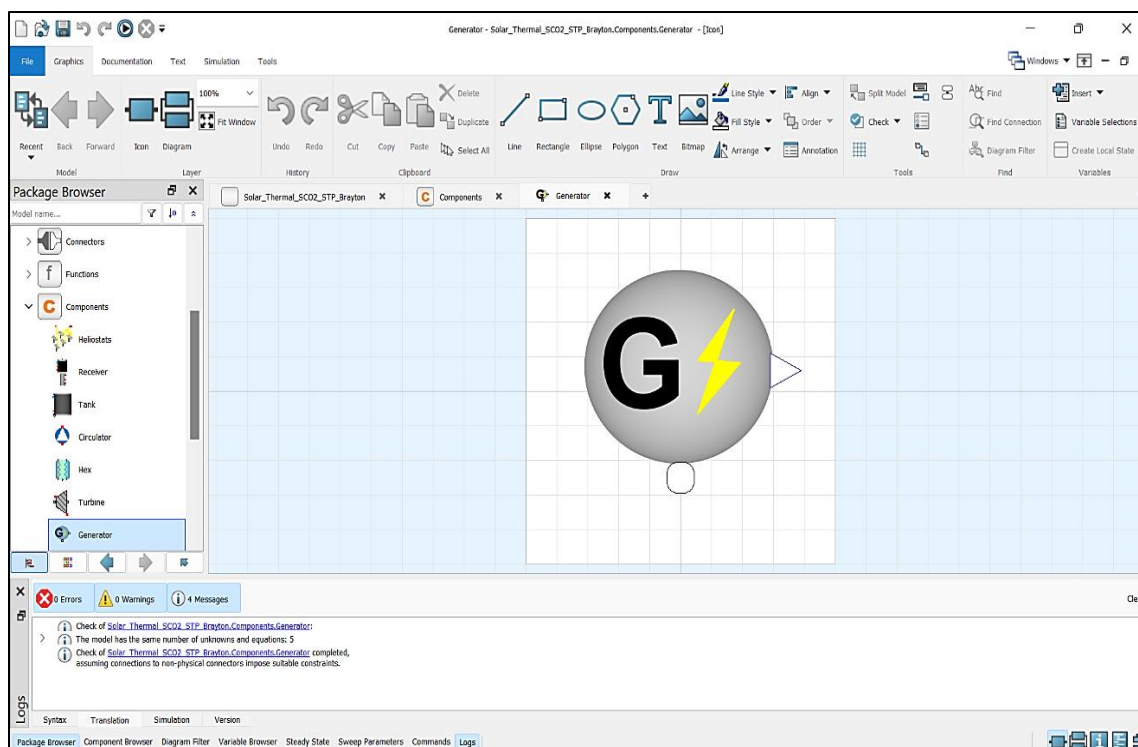
Η γεννήτρια παράγει την ηλεκτρική ισχύ η οποία εντέλει διοχετεύεται στο δίκτυο. Για τη μοντελοποίηση της γεννήτριας είναι απαραίτητη η παράμετρος του ηλεκτρικού αλλά και του μηχανικού βαθμού απόδοσης της. Στην προβολή διαγράμματος εισάγεται ένας σύνδεσμος τύπου «Transmission», με σκοπό να εισάγεται στο μοντέλο της γεννήτριας η πληροφορία της καθαρά παραγόμενης ισχύος από το ζεύγος αεριοστρόβιλου και συμπιεστή έτσι ώστε εντέλει να υπολογίζεται η καθαρά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης. Επιπλέον, εισάγεται ένας σύνδεσμος τύπου «RealOutput» έτσι ώστε σε μεταγενέστερο στάδιο να υπολογιστεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης ολόκληρης της εγκατάστασης. Στην **Εικόνα 167** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου της γεννήτριας. Στην **Εικόνα 168** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 169** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



Εικόνα 167: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Generator» στο λογισμικό Dymola [72]



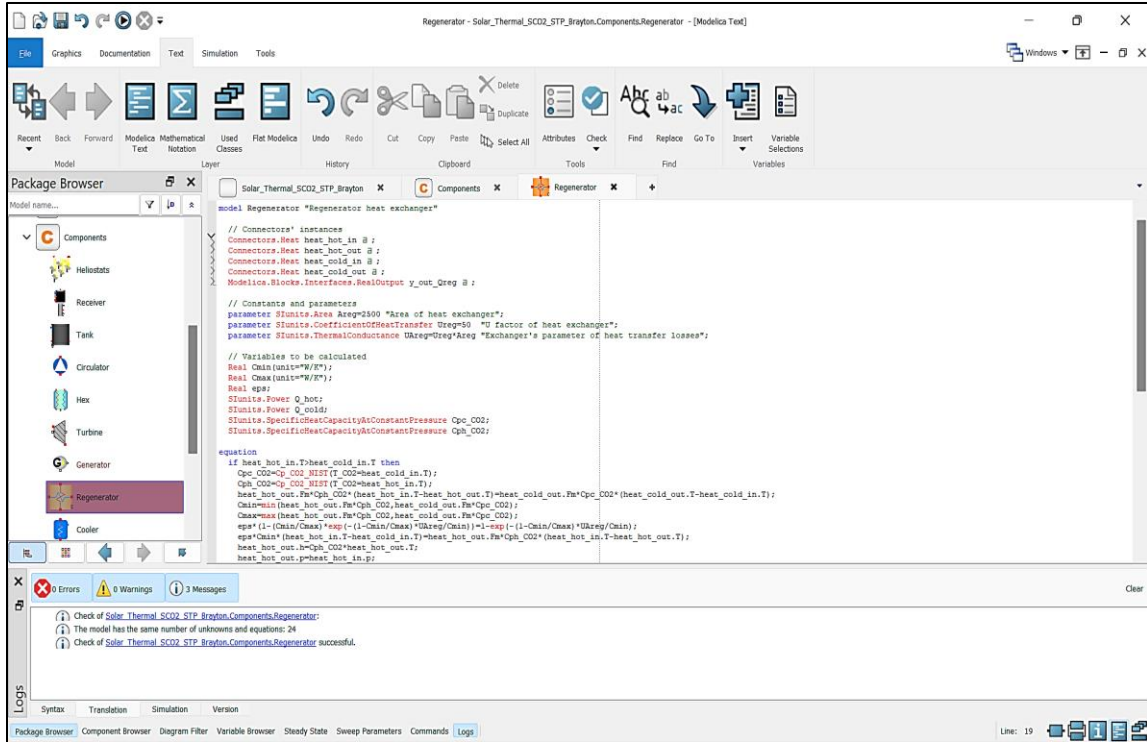
Εικόνα 168: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Generator» στο λογισμικό Dymola [72]



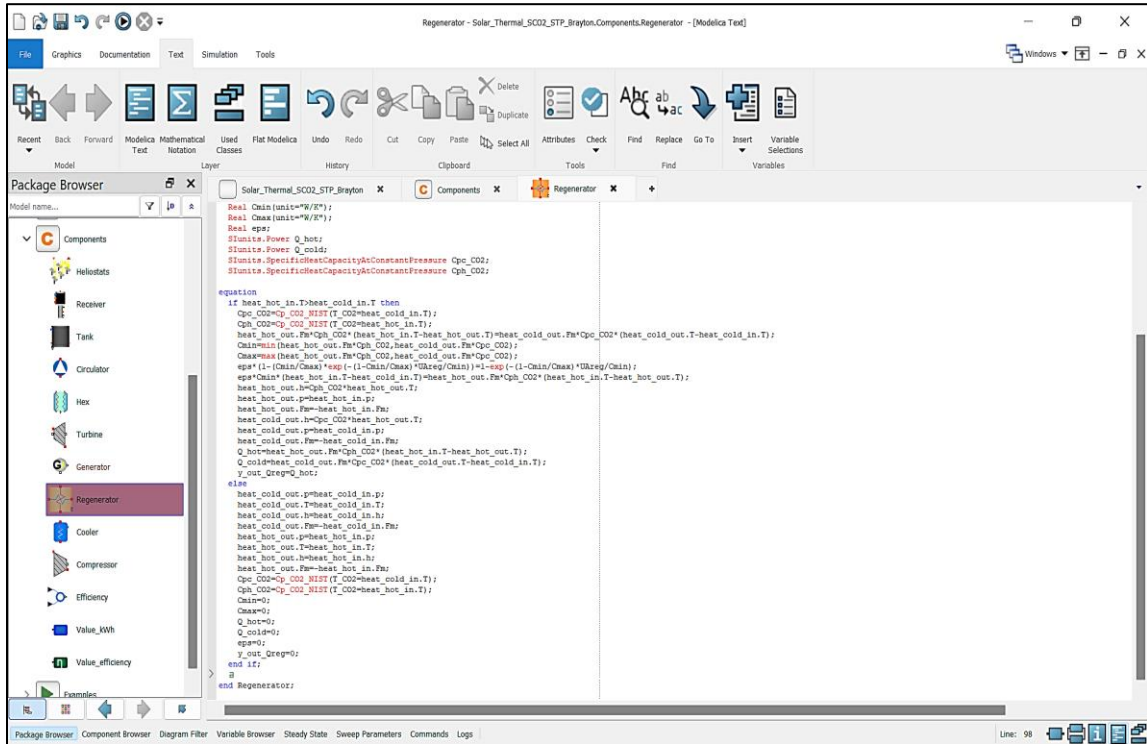
Εικόνα 169: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Generator» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.8. Μοντελοποίηση αναγεννητή (Regenerator model)

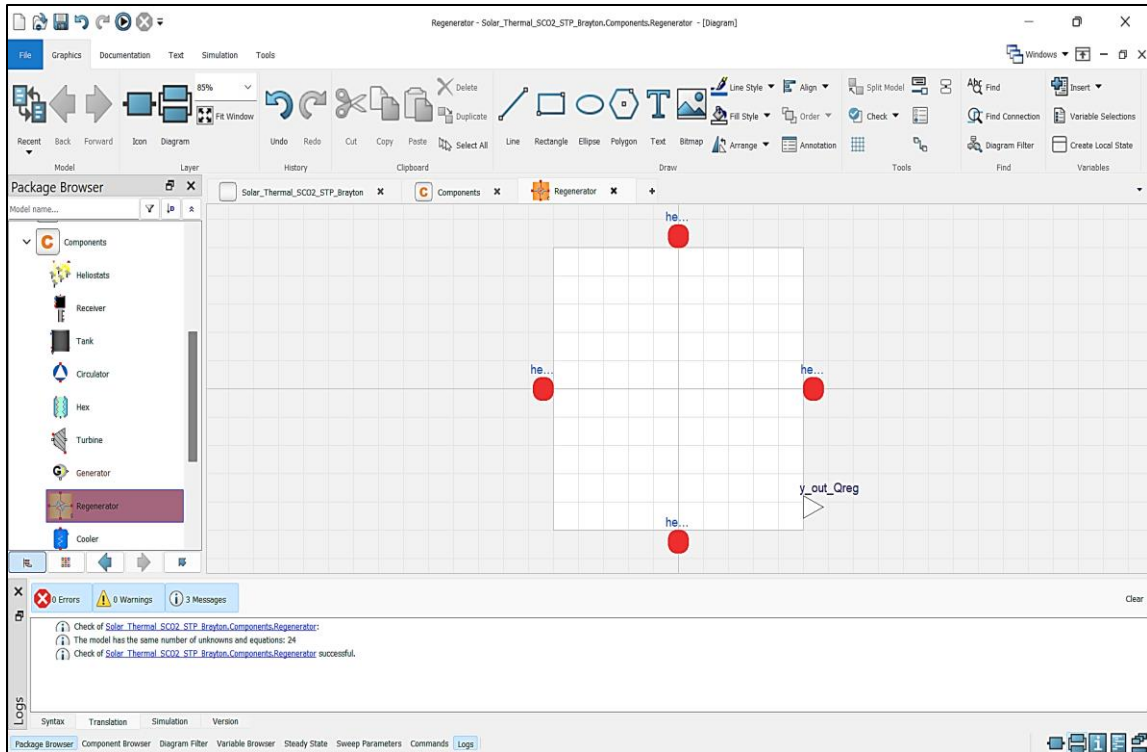
Ο αναγεννητής μοντελοποιείται με τον ίδιο σχεδόν τρόπο που μοντελοποιήθηκε και ο απλός εναλλάκτης θερμότητας σε προηγούμενο εδάφιο του παρόντος κεφαλαίου. Η διαφοροποίηση τους έγκειται στο γεγονός ότι, σε περίπτωση που η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του αεριοστρόβιλου είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία εξόδου του από τον συμπιεστή, τότε ο αναγεννητής τίθεται εκτός λειτουργίας. Ουσιαστικά, σε τέτοιο ενδεχόμενο ο αναγεννητής παρακάμπτεται. Στην **Εικόνα 170** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου του αναγεννητή που αφορά τις παραμέτρους, ενώ στην **Εικόνα 171** η προβολή κειμένου που αφορά τους υπολογισμούς και τους ισολογισμούς ενέργειας. Στην **Εικόνα 172** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 173** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72][80].



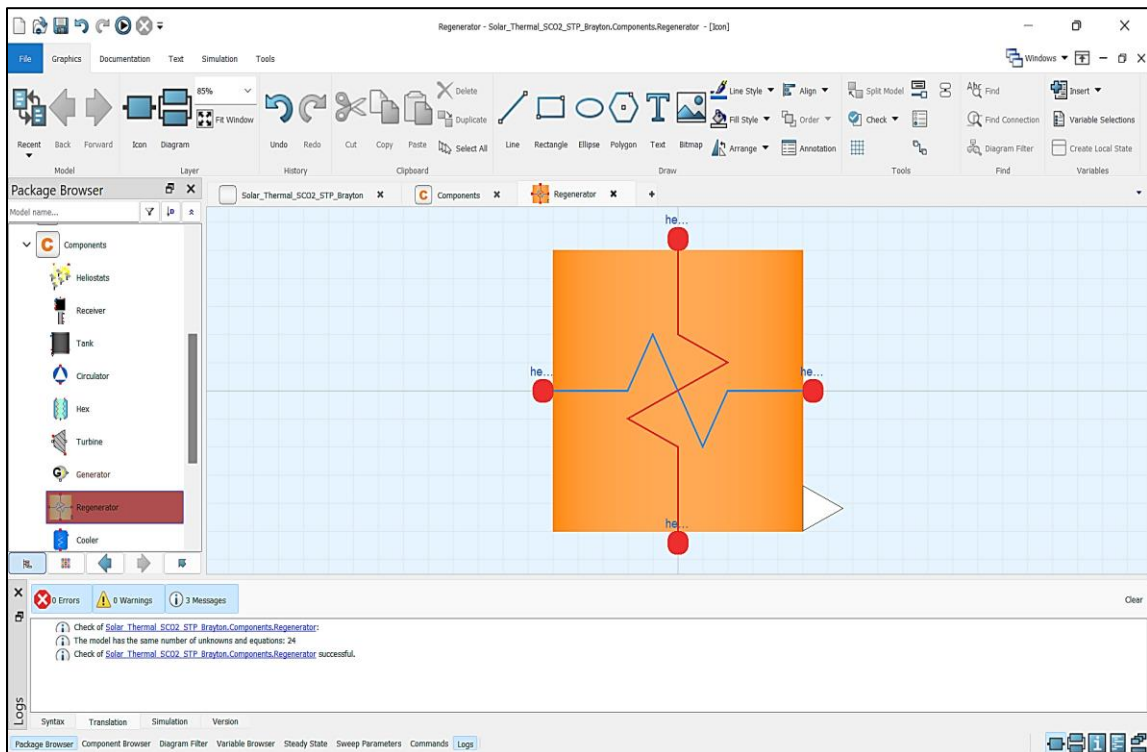
Εικόνα 170: Προβολή κειμένου (παραμέτρων) του μοντέλου «Regenerator» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 171: Προβολή κειμένου (εξισώσεων) του μοντέλου «Regenerator» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 172: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Regenerator» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 173: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Regenerator» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.9. Μοντελοποίηση ψύκτη (Cooler model)

Ο ψύκτης του θερμοδυναμικού κύκλου (gas cooler) μειώνει τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου πριν από την είσοδο του στο συμπιεστή. Λόγω της λειτουργίας του κύκλου σε υπερκρίσιμη κατάσταση δεν παρατηρείται αλλαγή φάσης. Το ψυκτικό μέσο επιλέγεται να είναι αέρας αφού, στις τοποθεσίες που συνήθως εγκαθίστανται τέτοιοι ηλεκτροπαραγωγοί σταθμοί, η διαθεσιμότητα και η προσβασιμότητα σε νερό είναι περιορισμένη. Πέραν του συντελεστή θερμοπερατότητας και της επιφάνειας του εναλλάκτη, στον ψύκτη είναι γνωστή και η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου, καθώς επίσης και ειδική του θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση [51].

Στην προβολή διαγράμματος εισάγονται οι επιθυμητοί σύνδεσμοι. Σε σύγκριση με τον εναλλάκτη που μοντελοποιήθηκε σε προηγούμενο εδάφιο, απαιτούνται μόνο δυο σύνδεσμοι τύπου «Heat» για τη μοντελοποίηση των ιδιοτήτων του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο και την έξοδο του ψύκτη. Επιπλέον, η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του ψύκτη ορίζεται να είναι κατά πέντε βαθμούς μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος. Επομένως, είναι αναγκαία η εισαγωγή και ενός συνδέσμου τύπου «Temp_input». Επειδή πέραν των παροχών μάζας και των θερμοκρασιών εισόδου των ρευστών είναι γνωστή και η θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου, θα πρέπει να αφαιρεθεί μια εξίσωση σε σχέση με τη μοντελοποίηση που ακολουθήθηκε για τον κανονικό εναλλάκτη. Αυτή επιλέγεται να είναι η **Εξίσωση (54)**. Στην **Εικόνα 174** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου του ψύκτη. Στην **Εικόνα 175** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 176** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].

```

model Cooler "Cooling before compression"
  // Constants and parameters
  parameter Real Cp=1000 "Cp of cold stream";
  parameter Real A=100 "Area of heat exchanger";
  parameter Real h=0.1 "Height of heat exchanger";
  parameter Real rho=1.2 "Density of air";
  parameter Real m_dot=10 "Mass flow rate of cooling air";

  // Variables to be calculated
  Real Qin;
  Real Qout;
  Real T1;
  Real T2;
  Real T3;
  Real T4;
  Real Cp_cool;
  Real rho_cool;

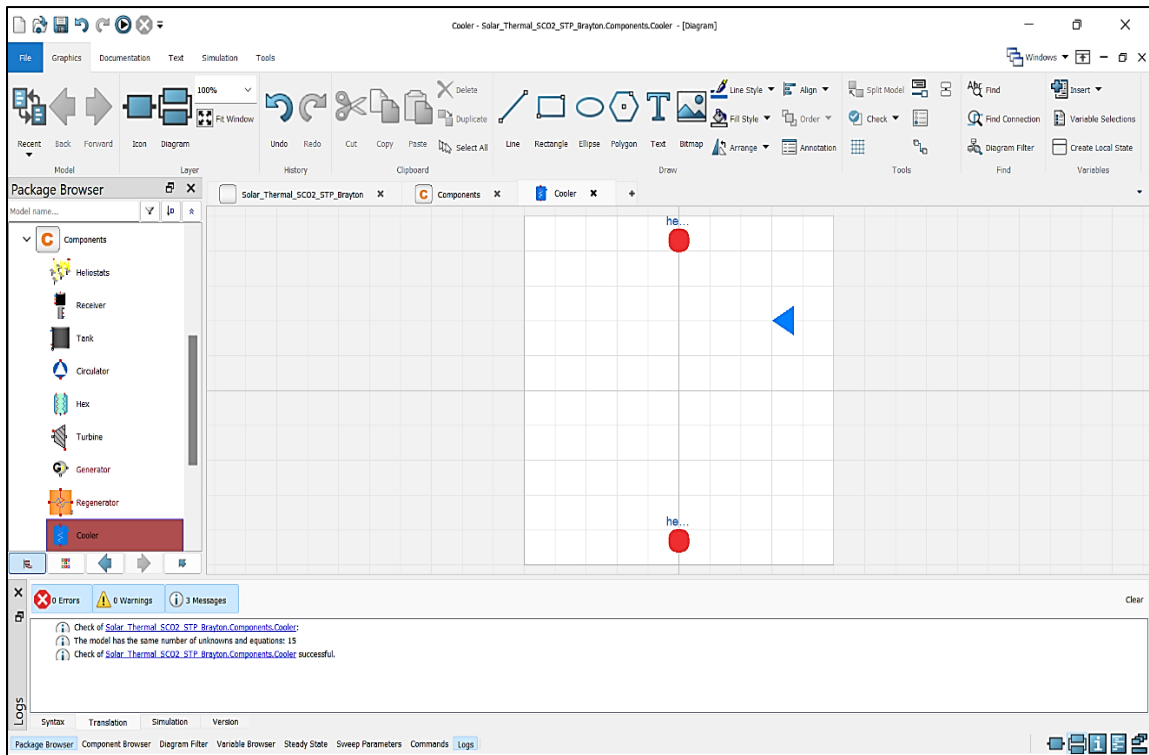
  // Connections
  Heat_Exchange_1 heat_in;
  Heat_Exchange_2 heat_out;
  Temp_Input temp_in;

  // Equations
  Qin = Cp * m_dot * (T1 - T2);
  Qout = Cp * m_dot * (T3 - T4);
  Qin = Qout;
  T3 = T2 + 5;
  Cp_cool = Cp;
  rho_cool = rho;

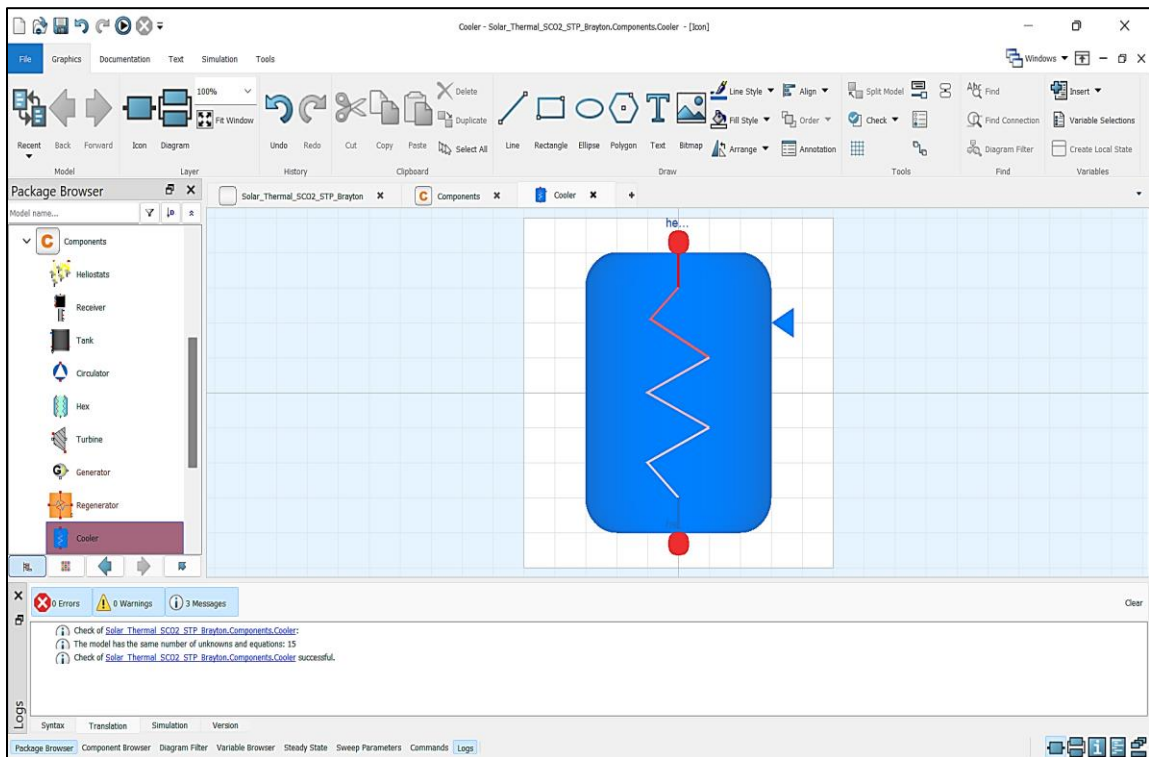
end Cooler;

```

Εικόνα 174: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Cooler» στο λογισμικό Dymola [72]



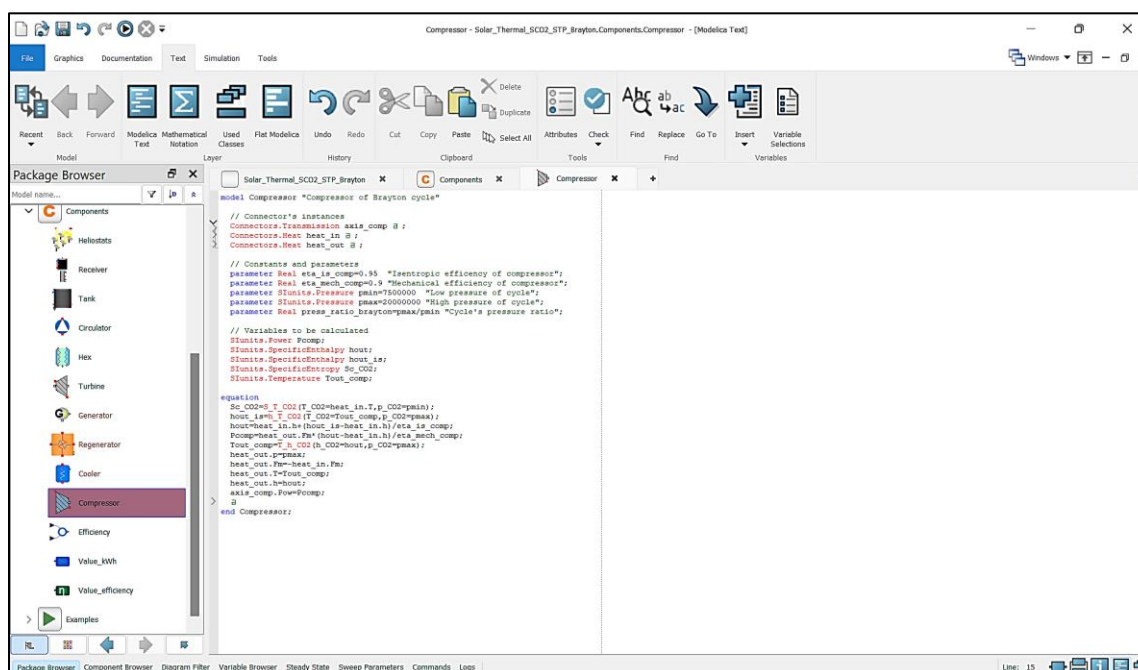
Εικόνα 175: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Cooler» στο λογισμικό Dymola [72]



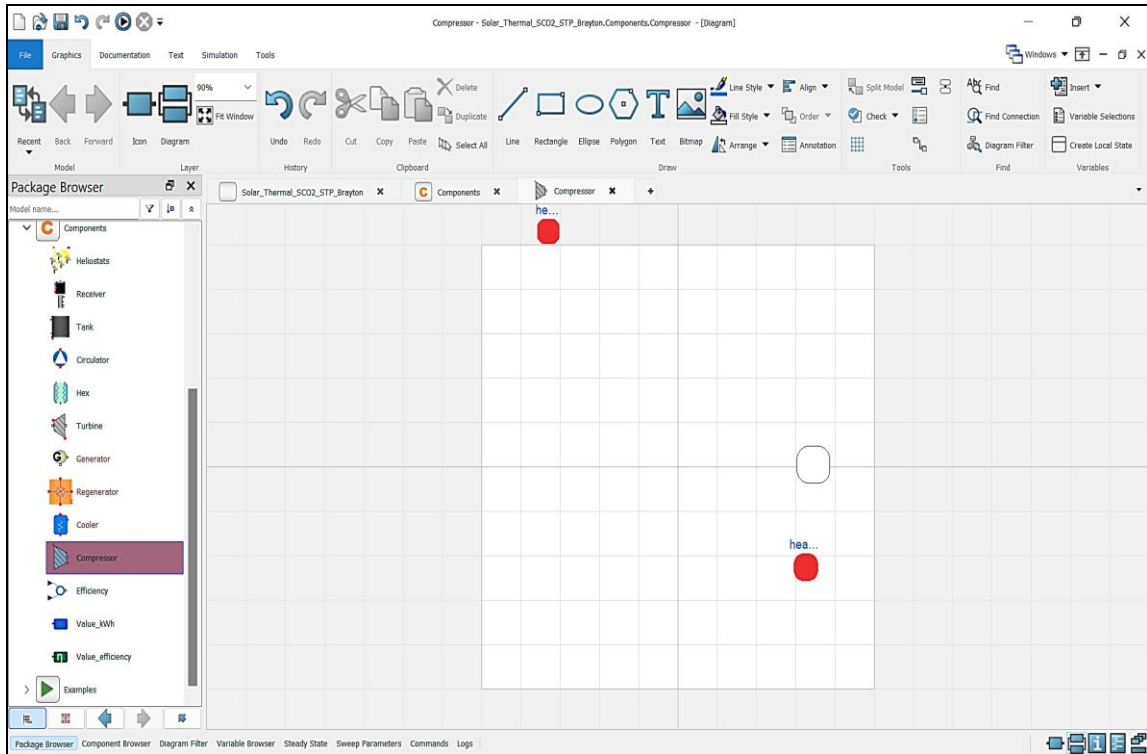
Εικόνα 176: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Cooler» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.10. Μοντελοποίηση συμπιεστή (Compressor model)

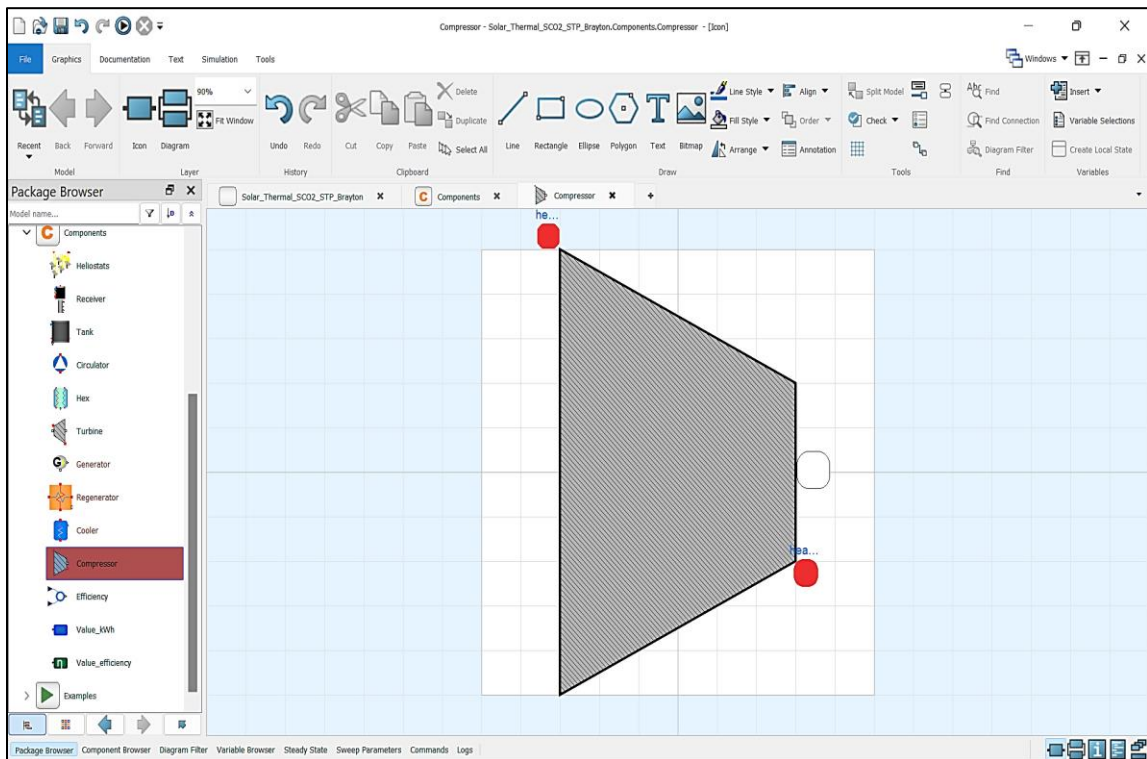
Ο συμπιεστής μοντελοποιείται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που μοντελοποιήθηκε και ο αεριοστρόβιλος σε προηγούμενο εδάφιο του παρόντος κεφαλαίου. Αρχικά, χρησιμοποιείται ένας σύνδεσμος τύπου «Transmission» με σκοπό να διαβιβάζει την πληροφορία του καταναλισκόμενου έργου προς τον αεριοστρόβιλο, έτσι ώστε να υπολογίζεται εντέλει η καθαρά παραγόμενη ισχύς. Με γνωστές τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του εργαζομένου μέσου στην είσοδο του συμπιεστή, υπολογίζεται η εντροπία και στη συνέχεια μέσω του ισηντροπικού βαθμού απόδοσης η πραγματική ενθαλπία στην έξοδο του συμπιεστή. Στην **Εικόνα 177** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του μοντέλου του συμπιεστή. Στην **Εικόνα 178** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 179** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72][76].



Εικόνα 177: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Compressor» στο λογισμικό Dymola [72]



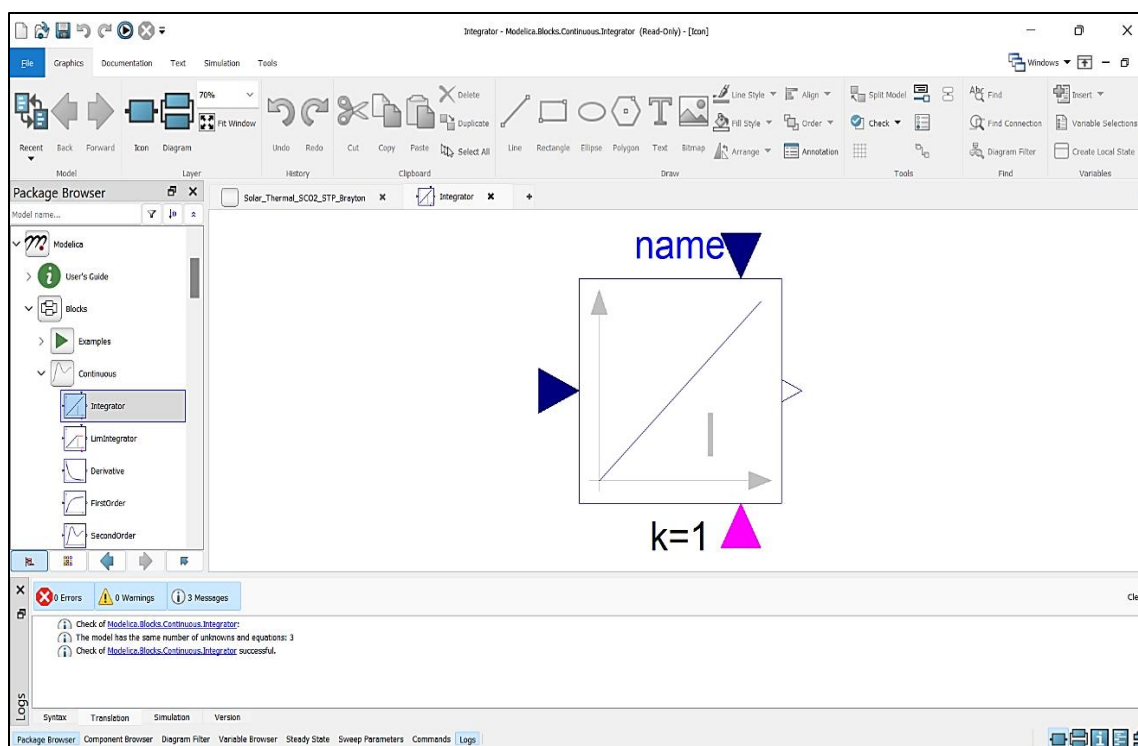
Εικόνα 178: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Compressor» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 179: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Compressor» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.11. Μοντελοποίηση ολοκληρωτή (Integrator model)

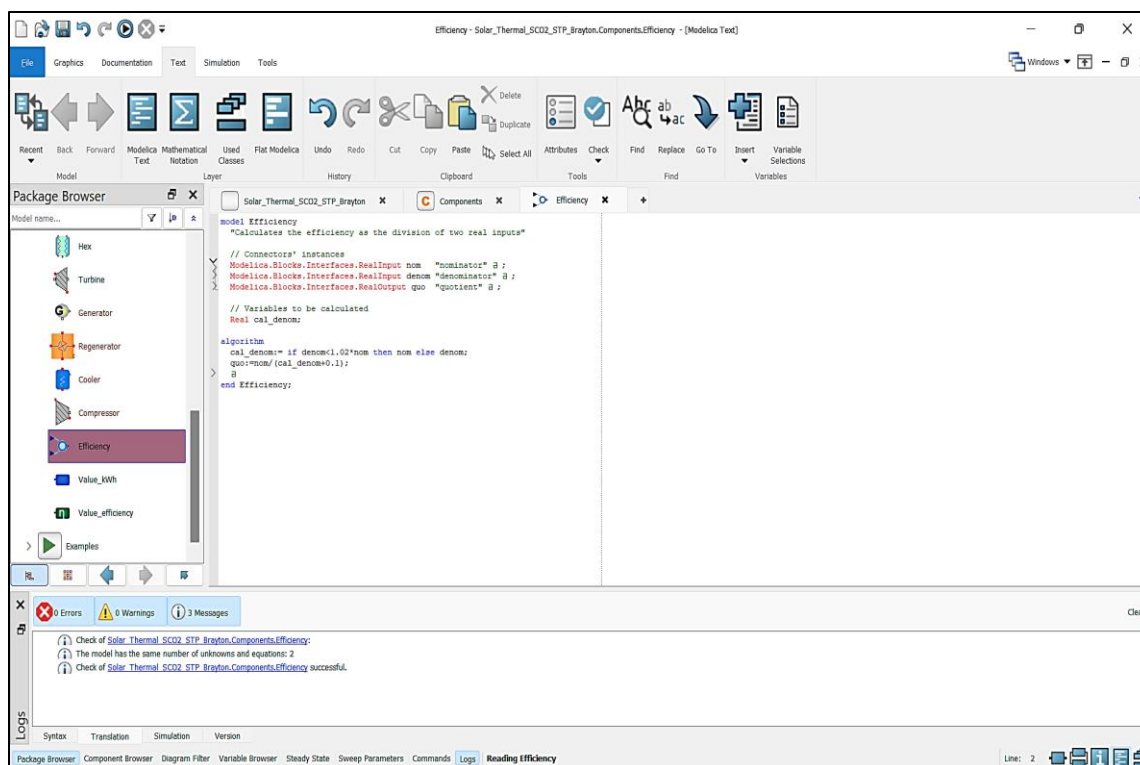
Ο ολοκληρωτής είναι ένα έτοιμο μοντέλο της βασικής βιβλιοθήκης «Modelica Standard Library». Σκοπός της χρήσης αυτού του μοντέλου είναι η ολοκλήρωση της ισχύος για τον υπολογισμό της συνολικά παραγομένης ενέργειας. Στην είσοδο του δέχεται μια μεταβλητή εισόδου η οποία θα πρέπει να είναι πραγματικός αριθμός. Στην **Εικόνα 180** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του ολοκληρωτή [72].



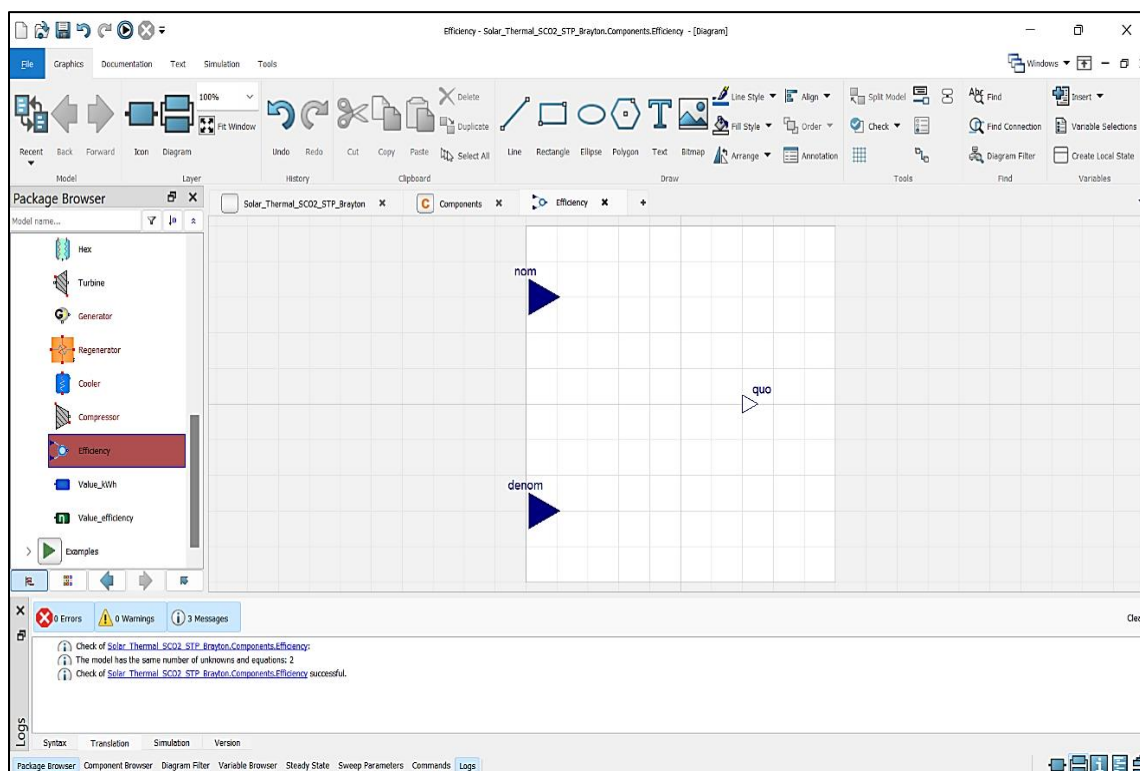
Εικόνα 180: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Integrator» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.12. Μοντελοποίηση υπολογισμού αποδοτικότητας (Efficiency model)

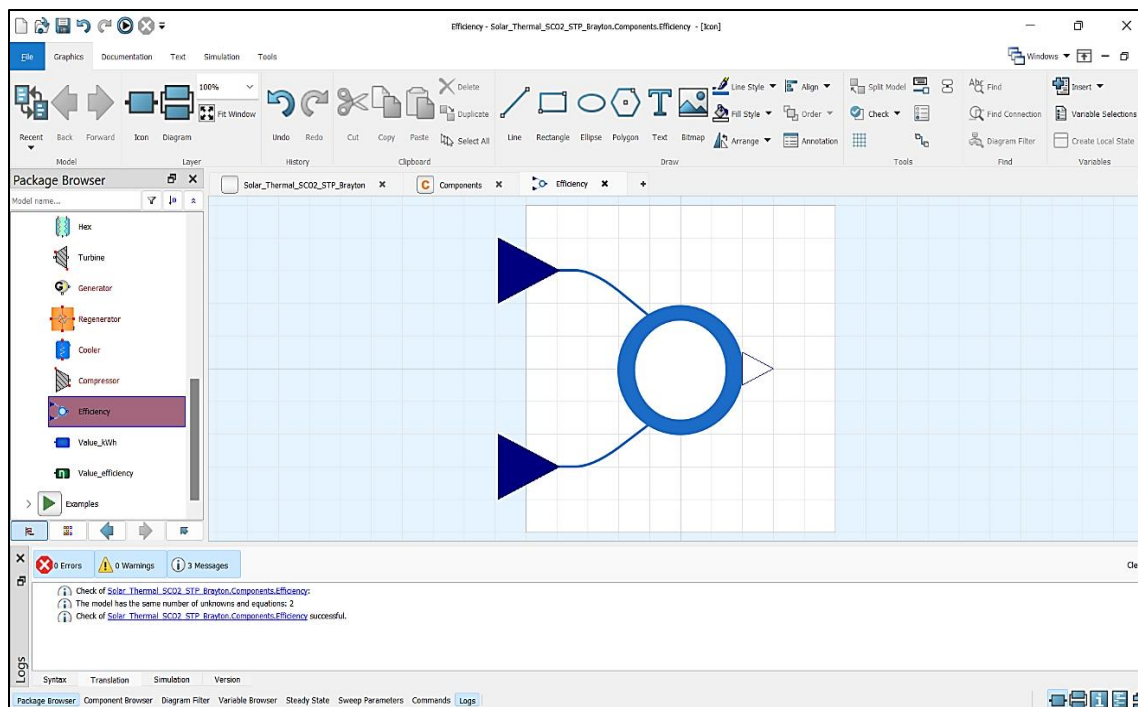
Οι βαθμοί απόδοσης του συστήματος υπολογίζονται ως το πηλίκο του ωφέλιμου προς το προδιδόμενο έργο. Όμως, ο διαθέσιμος διαιρέτης της βασικής βιβλιοθήκης «Modelica Standard Library» παρουσιάζει αδυναμία στον υπολογισμό κάποιων βαθμών απόδοσης οι οποίοι έχουν στον παρονομαστή την διαθέσιμη ηλιακή ισχύ. Αυτό συμβαίνει διότι όταν είναι βράδυ και η ηλιακή ακτινοβολία είναι μηδενική, επειδή ο εργοπαραγωγός κύκλος εξακολουθεί να λειτουργεί υποστηριζόμενος από τις θερμικές δεξαμενές, οι βαθμοί απόδοσης τείνουν να γίνουν άπειροι το οποίο είναι αδύνατο. Έτσι, δημιουργείται ένα μοντέλο το οποίο αποτελεί μια τροποποιημένη μορφή του διαιρέτη. Στην προβολή διαγράμματος εισάγονται δυο σύνδεσμοι τύπου «RealInput» και ένας τύπου «RealOutput». Στην **Εικόνα 181** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου υπολογισμού του βαθμού απόδοσης. Στην **Εικόνα 182** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 183** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



Εικόνα 181: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Efficiency» στο λογισμικό Dymola [72]



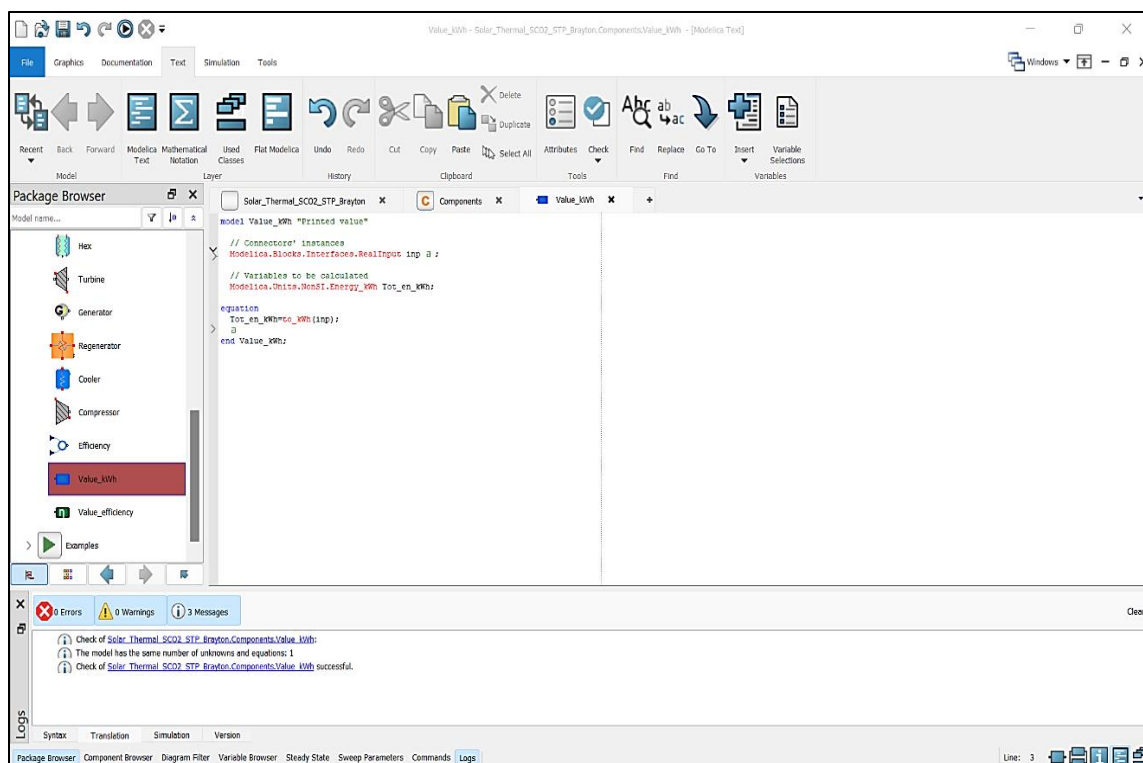
Εικόνα 182: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Efficiency» στο λογισμικό Dymola [72]



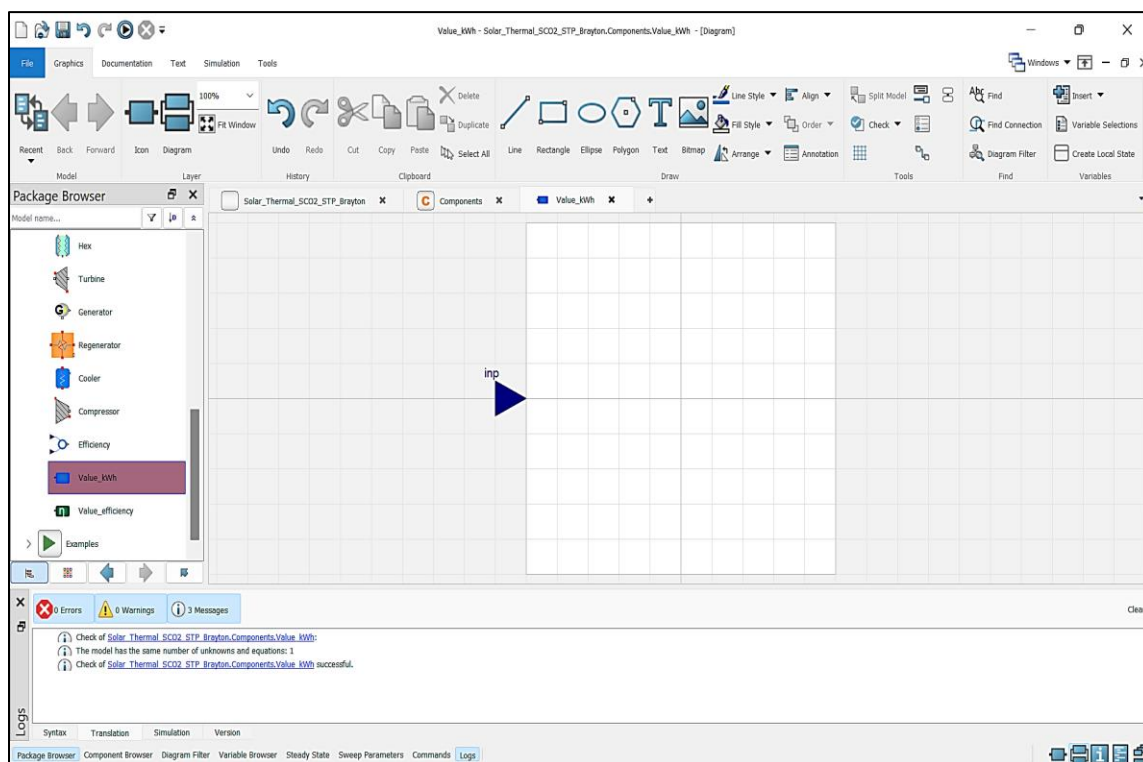
Εικόνα 183: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Efficiency» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.13. Μοντελοποίηση παραγόμενης ενέργειας (Value-kWh model)

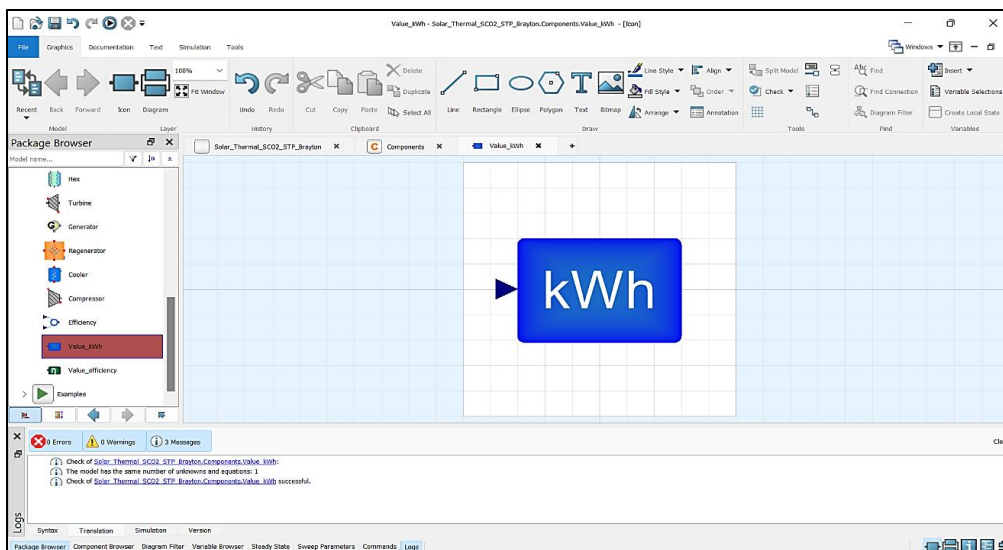
Για σκοπούς καλύτερης παρουσίασης των αποτελεσμάτων, δημιουργείται ένα μοντέλο το οποίο θα παρουσιάζει τη συνολικά παραγόμενη ενέργεια. Οι συνηθισμένες μονάδες μέτρησης που παρουσιάζεται η ενέργεια είναι σε κιλοβατώρες (kWh). Γι' αυτό, γίνεται χρήση της έτοιμης συνάρτησης «to_kWh» για μετατροπή των Joules σε kWh. Η συνάρτηση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν αφού η βιβλιοθήκη «Conversions» έχει εισαχθεί στην κεντρική βιβλιοθήκη «Solar_Thermal_SCO2_STP_Brayton» η οποία είναι ανώτερη ιεραρχικά από τη βιβλιοθήκη «Components». Επειδή η μονάδα μέτρησης των κιλοβατώραν δεν ανήκει στο διεθνές σύστημα μονάδων «SI», για τη μεταβλητή εξόδου αναγράφεται ολόκληρο η διαδρομή θέσης της. Στην προβολή διαγράμματος εισάγεται ο μοναδικός απαραίτητος σύνδεσμος ο οποίος είναι τύπου «RealInput». Στην **Εικόνα 184** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου καταγραφής της παραγόμενης ενέργειας. Στην **Εικόνα 185** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 186** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



Εικόνα 184: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Value_kWh» στο λογισμικό Dymola [72]



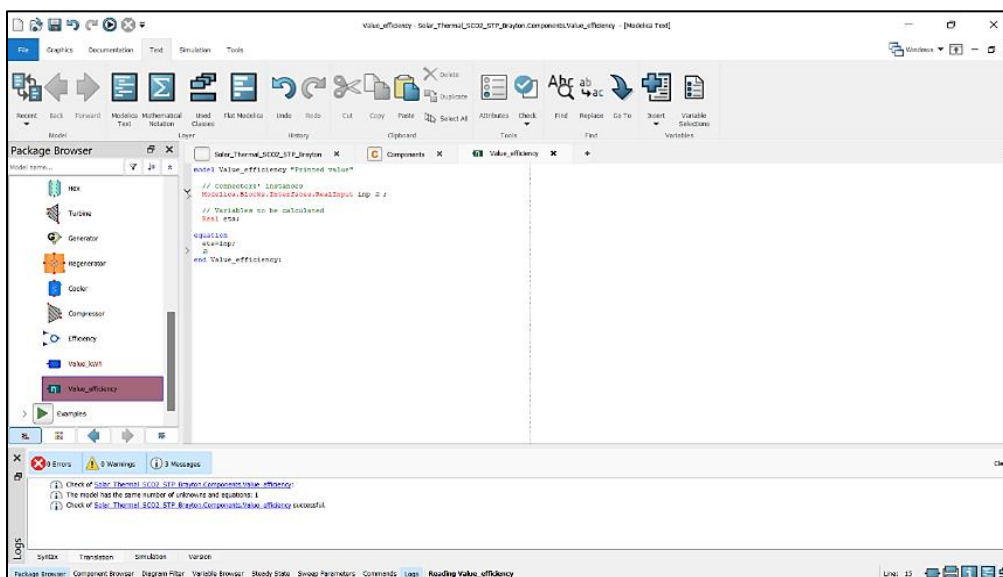
Εικόνα 185: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Value_kWh» στο λογισμικό Dymola [72]



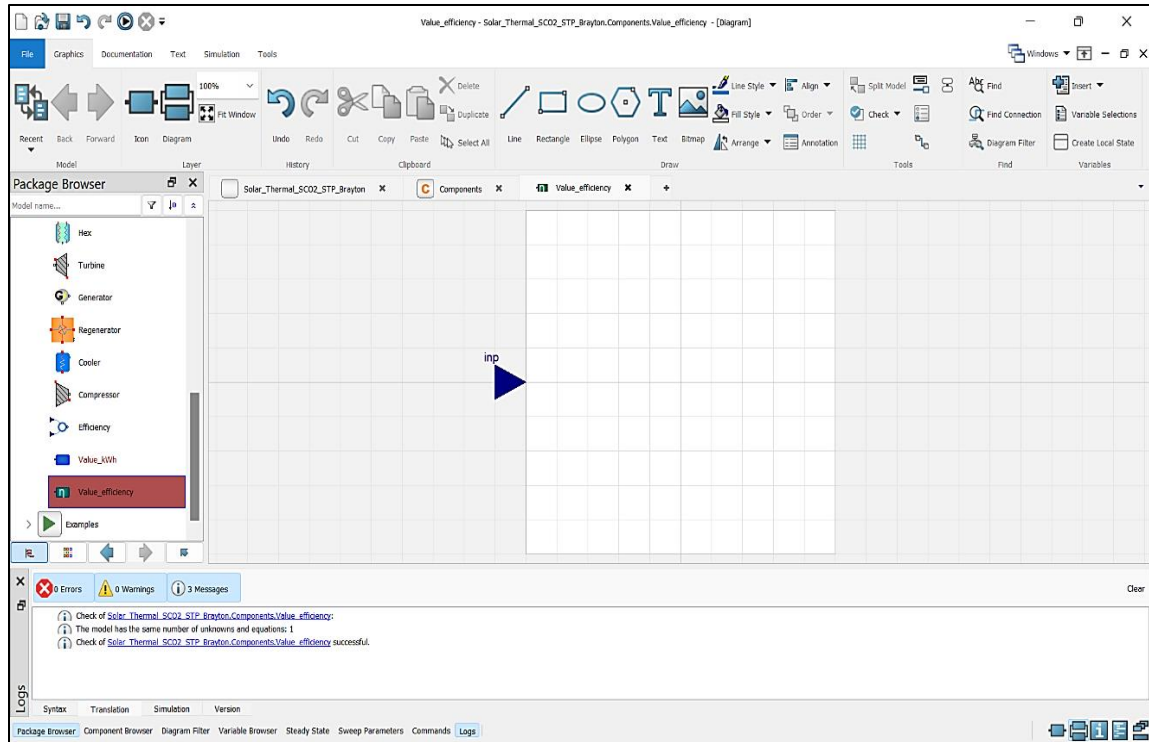
Εικόνα 186: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Value_kWh» στο λογισμικό Dymola [72]

8.4.14. Μοντελοποίηση βαθμού απόδοσης (Value-efficiency model)

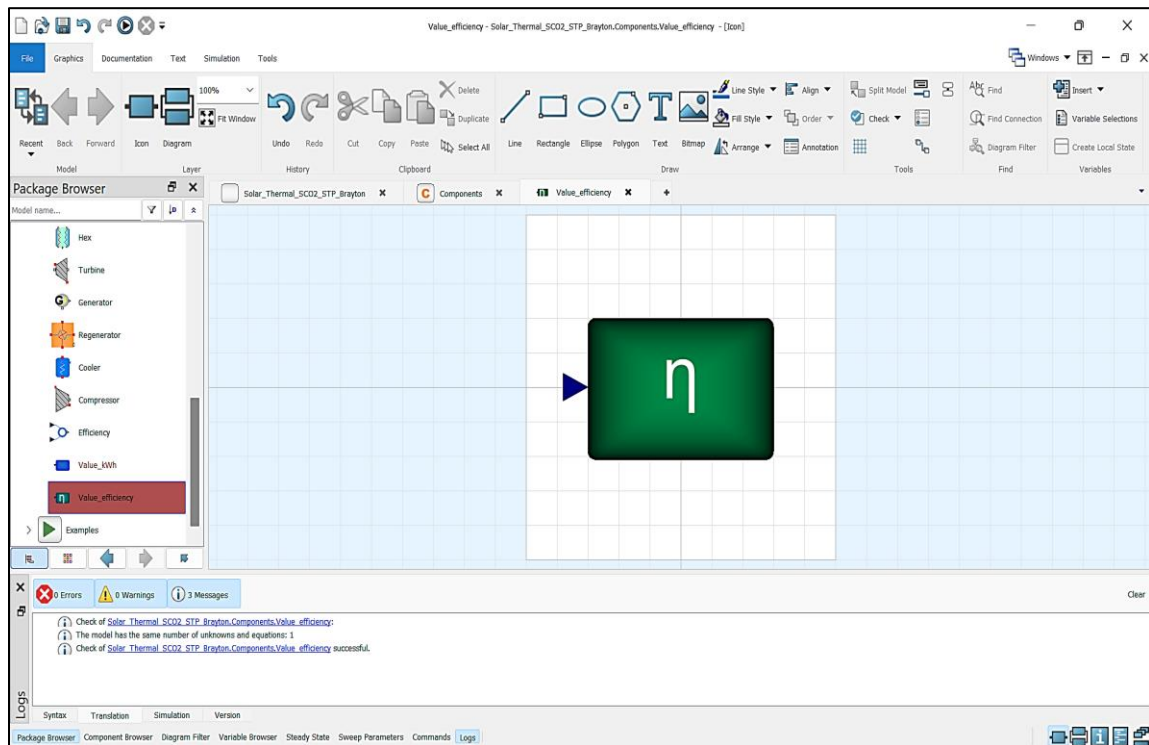
Για σκοπούς καλύτερης προβολής και οργάνωσης των τελικών αποτελεσμάτων που αφορούν τους χαρακτηριστικούς βαθμούς απόδοσης του συστήματος, δημιουργείται ένα μοντέλο στο οποίο θα αποθηκεύεται η πληροφορία που αφορά τον τελικό υπολογισμό τους. Στην προβολή διαγράμματος εισάγεται ο μοναδικός απαραίτητος σύνδεσμος ο οποίος είναι τύπου «RealInprt». Στην **Εικόνα 187** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου καταγραφής του βαθμού απόδοσης. Στην **Εικόνα 188** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 189** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



Εικόνα 187: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Value_efficiency» στο λογισμικό Dymola [72]



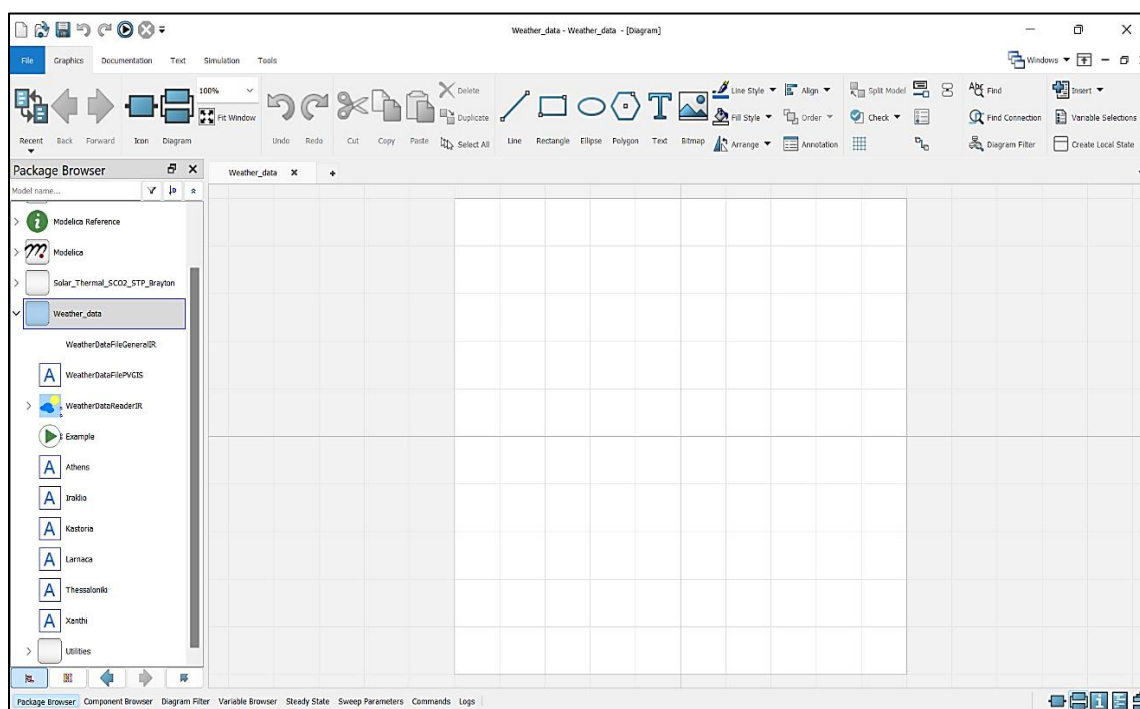
Εικόνα 188: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Value_efficiency» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 189: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Value_efficiency» στο λογισμικό Dymola [72]

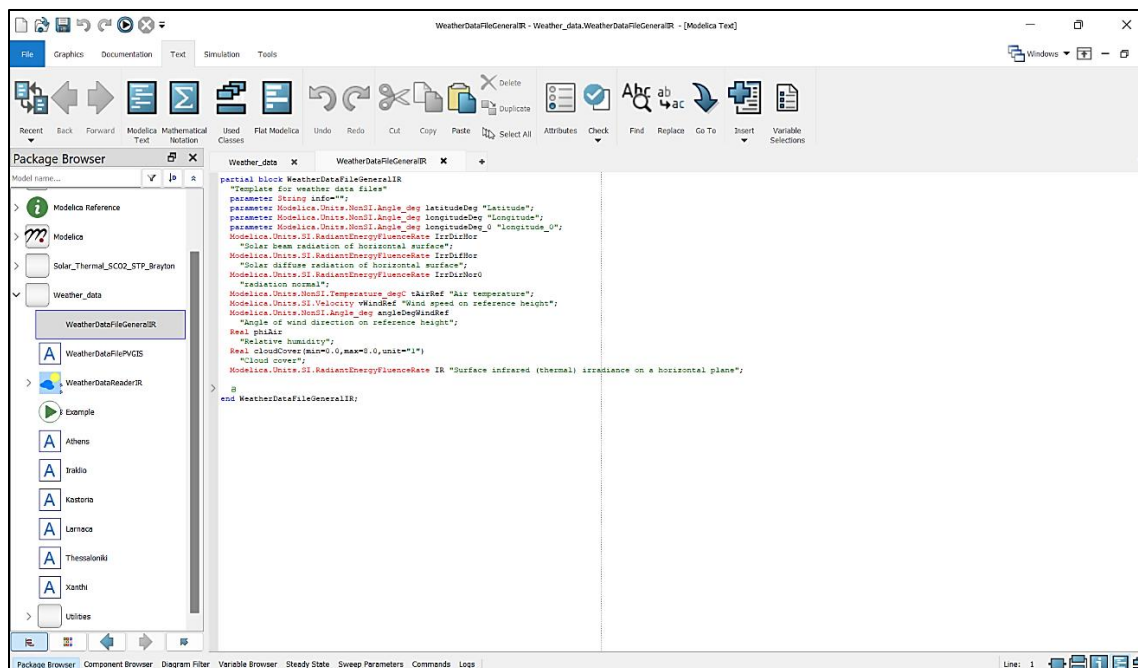
8.5. Μοντελοποίηση μετεωρολογικών συνθήκων (Weather data package)

Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισάγονται στο περιβάλλον του Dymola μέσω μιας ξεχωριστής βιβλιοθήκης, της «Weather_data». Η ιεραρχική δομή, καθώς επίσης και τα μοντέλα αλλά και οι εσωτερικές βιβλιοθήκες που αποτελούν τη βιβλιοθήκη αυτή παρουσιάζονται στην **Εικόνα 190** [72].



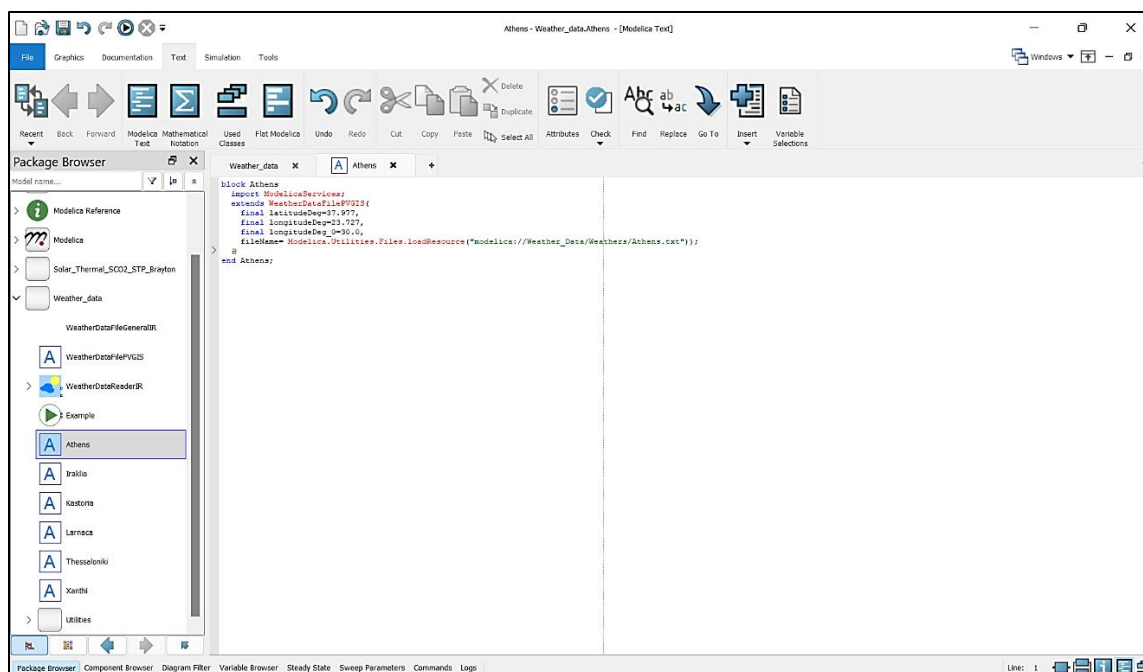
Εικόνα 190: Δομή της βιβλιοθήκης «Weather_data» των μετεωρολογικών δεδομένων στο λογισμικό Dymola [72]

Το πρώτο μοντέλο είναι το «WeatherDataFileGenerallR». Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο αυτό είναι τύπου ‘*partial block*’. Η λέξη-κλειδί ‘*partial*’ δηλώνει ότι το μοντέλο αυτό δεν είναι πλήρως συμπληρωμένο και ως εκ τούτου δεν μπορεί να προσομοιωθεί απευθείας. Τα επιπλέον δεδομένα και τιμές παραμέτρων που απαιτούνται για τη συμπλήρωση του μοντέλου αυτού δηλώνονται σε επόμενα μοντέλα της βιβλιοθήκης, αφού πρώτα γίνει επέκταση του συγκεκριμένου μοντέλου με τη χρήση της λέξης-κλειδί ‘*extends*’. Οι παράμετροι αυτοί είναι κάποιες πληροφορίες που αφορούν το αρχείο δεδομένων καθώς επίσης και παράμετροι που αφορούν το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος της θέσης μέτρησης και καταγραφής των μετεωρολογικών δεδομένων. Με βάση τα δεδομένα αυτά, το τελικό μοντέλο θα επιλέγει τις μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος και η άμεση ακτινοβολία, οι οποίες θα αφορούν την επιλεγόμενη τοποθεσία. Στην **Εικόνα 191** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου αυτού [72].



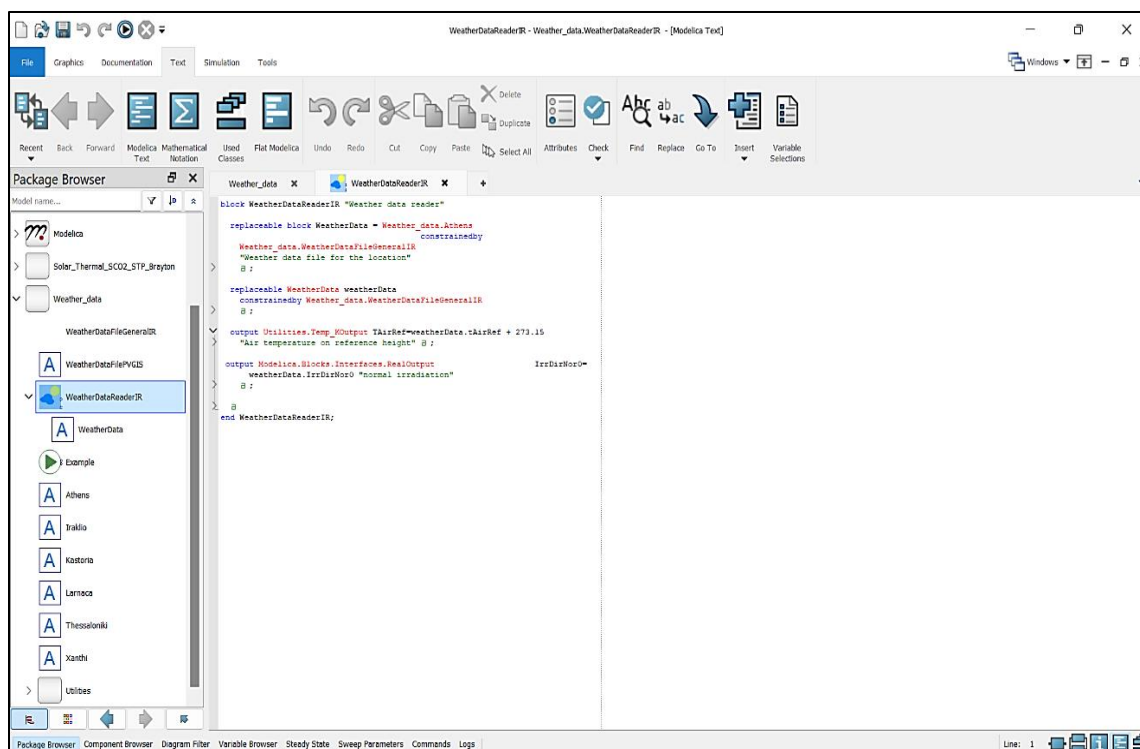
Εικόνα 191: Προβολή κειμένου του μοντέλου «WeatherDataFileGeneralIR» στο λογισμικό Dymola [72]

Το δεύτερο μοντέλο είναι το «WeatherDataFilePVGIS». Όπως και το προηγούμενο μοντέλο, έτσι και αυτό είναι τύπου ‘*partial block*’. Στο μοντέλο αυτό, αφού οριστούν τα απαραίτητα γεωγραφικά δεδομένα, υπολογίζονται οι τιμές των επιθυμητών μεταβλητών που δηλωθήκαν στο προηγούμενο μοντέλο. Ουσιαστικά, διαβάζει τα δεδομένα από το αρχείο κειμένου της επιθυμητής τοποθεσίας. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από τη βάση δεδομένων του «PVGIS», ένα διαδικτυακό εργαλείο για τον υπολογισμό μεγεθών που αφορούν την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία, στηριζόμενο σε μετεωρολογικά δεδομένα όπως είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Επειδή τα δεδομένα που υπάρχουν δεν είναι ανά δευτερόλεπτο, ακολουθείται κάποια προσεγγιστική μέθοδος παρεμβολής, έτσι ώστε τα μετεωρολογικά δεδομένα να συνάδουν με τους υπόλοιπους υπολογισμούς της προσομοίωσης που θα εκτελεστούν στο λογισμικό Dymola. Στην **Εικόνα 192** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου μιας πόλης, της Αθήνας, στην οποία φαίνεται η τελική δήλωση των γεωγραφικών στοιχείων της πόλης καθώς επίσης και η φόρτωση (load resource) του αρχείου κειμένου που περιέχει τις αντίστοιχες πληροφορίες από το «PVGIS» [72][81].

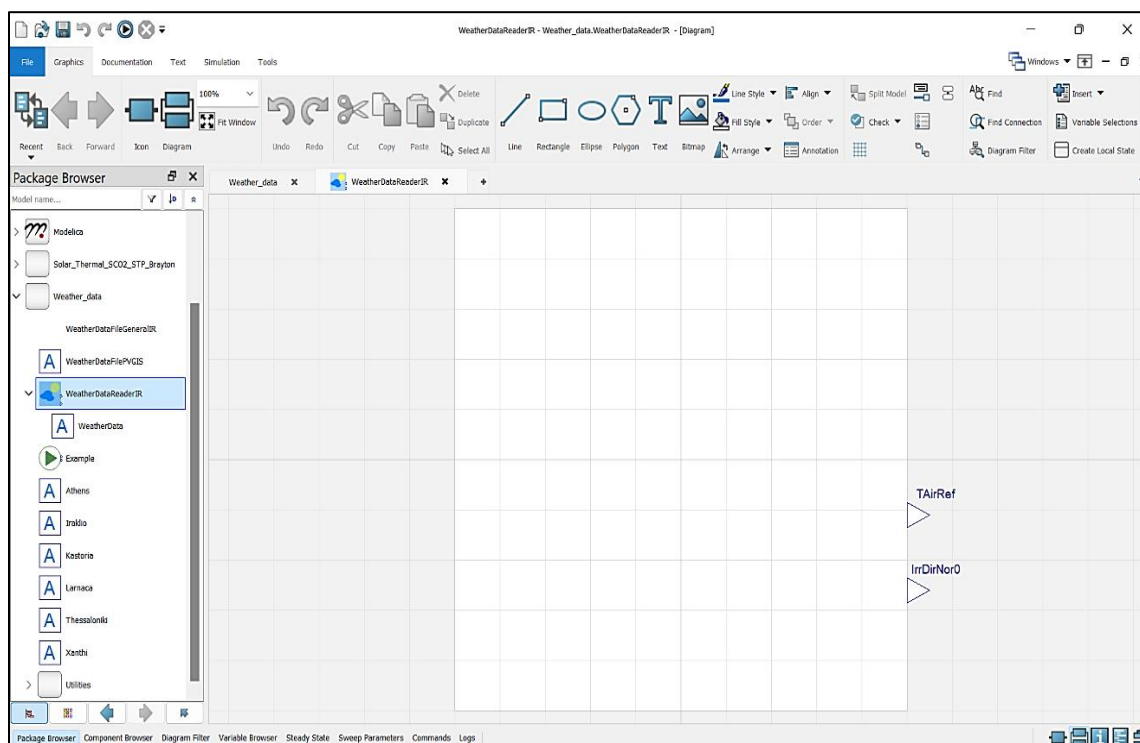


Εικόνα 192: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Athens» στο λογισμικό Dymola [72]

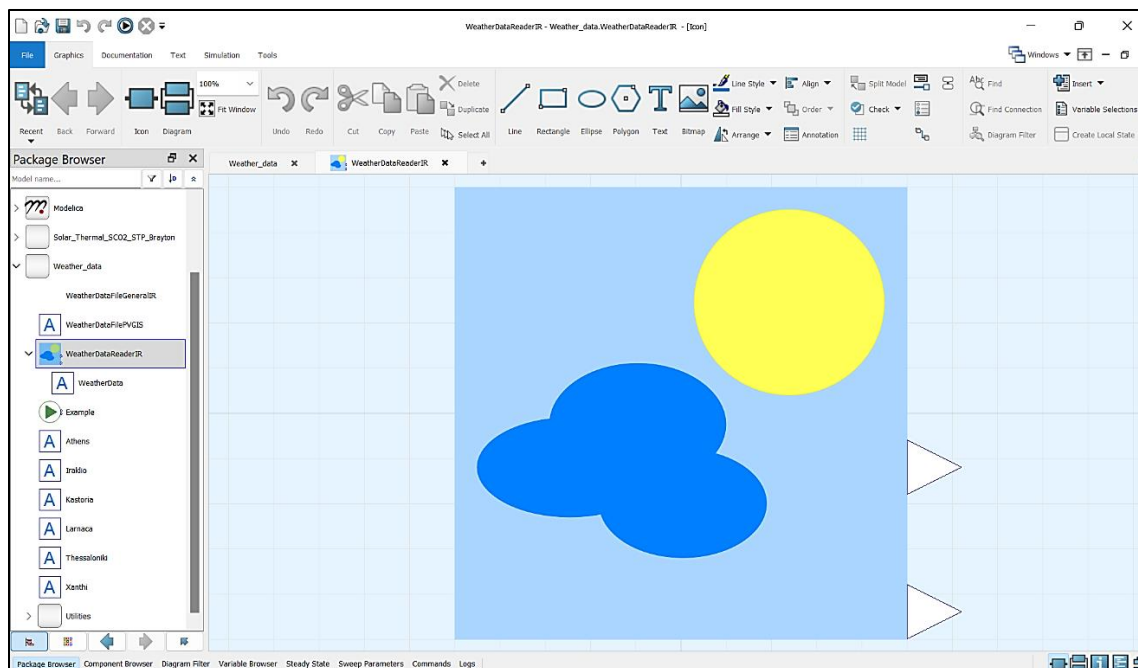
Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος είναι το «WeatherDataReaderIR». Στο μοντέλο αυτό εισάγεται η πληροφορία της πόλης που είναι επιθυμητή η χρήση των μετεωρολογικών της δεδομένων. Αυτό γίνεται με τη χρήση της λέξης-κλειδί *'replaceable block'*, το οποίο δίνει τη δυνατότητα επιλογής του μοντέλου τύπου *'block'* της πόλης που θα γίνει χρήση των μετεωρολογικών της δεδομένων. Τα δεδομένα εξόδου που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία εστιάζουν στη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος (TAirRef) και στην κάθετη άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης (IrrDirNor0). Στην **Εικόνα 193** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου των καιρικών συνθηκών. Στην **Εικόνα 194** παρουσιάζεται η προβολή διαγράμματος του μοντέλου αυτού, ενώ στην **Εικόνα 195** παρουσιάζεται η προβολή εικόνας του [72].



Εικόνα 193: Προβολή κειμένου του μοντέλου «WeatherDataReaderIR» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 194: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «WeatherDataReaderIR» στο λογισμικό Dymola [72]

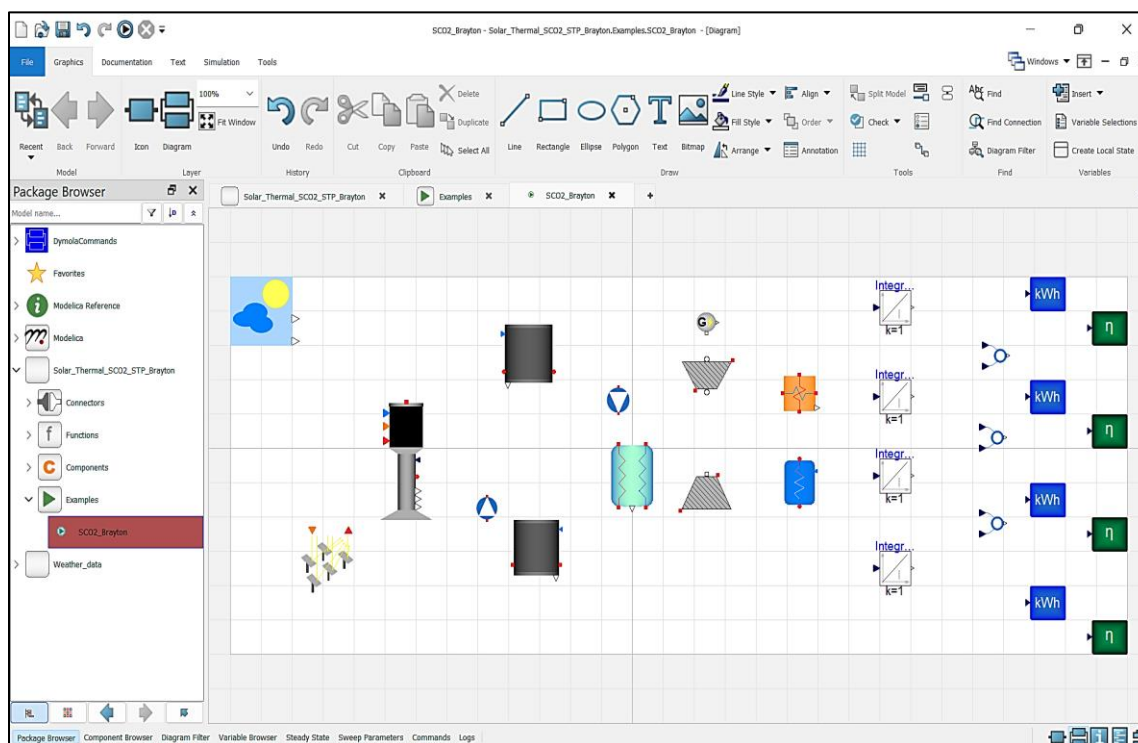


Εικόνα 195: Προβολή εικόνας του μοντέλου «WeatherDataReaderIR» στο λογισμικό Dymola [72]

8.6. Μοντελοποίηση συστήματος STP με SCO2 Brayton (SCO2-Brayton model)

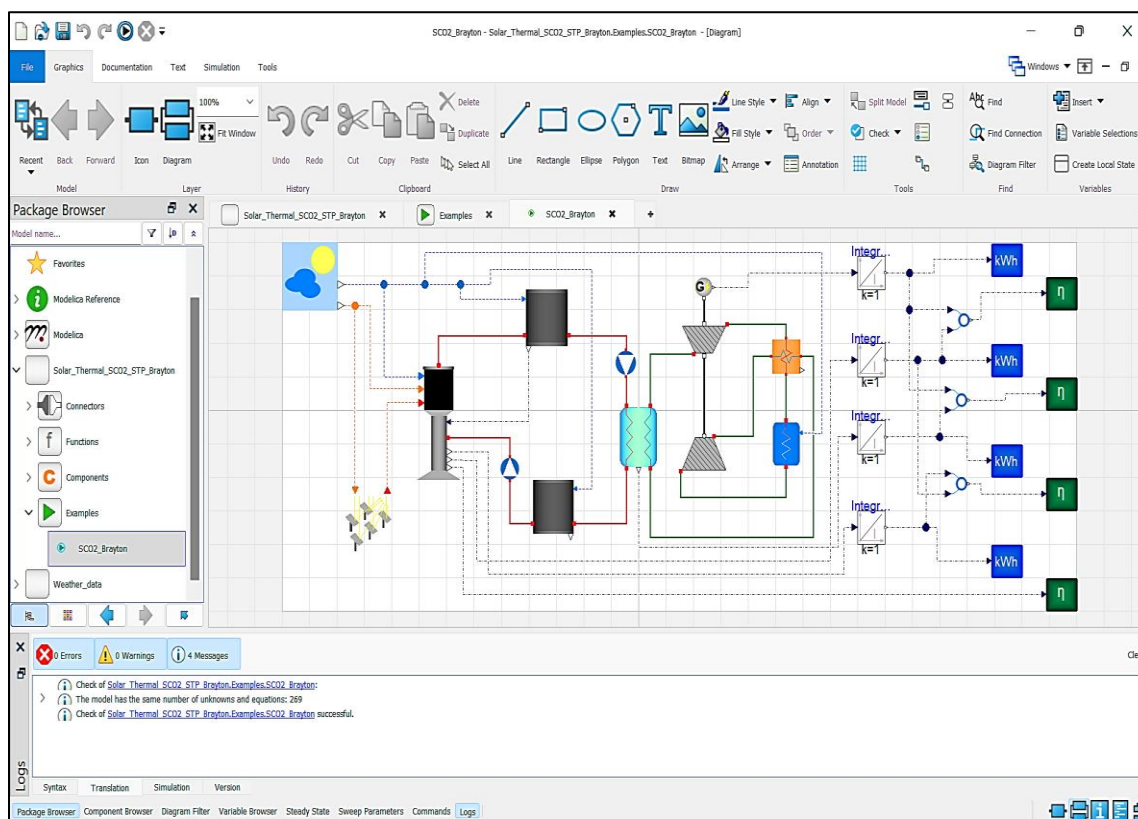
Το μοντέλο του ολικού συστήματος μπορεί να συσταθεί αξιοποιώντας τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν και επεξηγήθηκαν στα προηγούμενα εδάφια του παρόντος κεφαλαίου. Αρχικά, δημιουργείται ένα νέο μοντέλο με την ονομασία «SCO2_Brayton» και εισάγεται στην προϋπάρχουσα βιβλιοθήκη «Examples». Στο μοντέλο αυτό θα πρέπει να γίνει εισαγωγή των επιπλέον βιβλιοθηκών που απαιτούνται πέραν αυτών που εισήχθησαν στην κεντρική βιβλιοθήκη «Solar_Thermal_SCO2_STP_Brayton». Οι βιβλιοθήκες αυτές είναι οι «Components» και «Functions» που έχουν παρουσιαστεί στα προηγούμενα εδάφια, οι οποίες περιέχουν τα απαραίτητα μοντέλα που δημιουργήθηκαν. Επιπλέον, εισάγεται το μοντέλο του «WeatherDataReaderIR», το οποίο παρουσιάστηκε στο προηγούμενο εδάφιο και αφορά τα μετεωρολογικά δεδομένα. Στην προβολή διαγράμματος της καρτέλας γραφικών, εισάγονται τα μοντέλα που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση. Για την περίπτωση ενός υπερκρίσιμου κύκλου Brayton με διοξείδιο του άνθρακα ως εργαζόμενο μέσο και πηγή ενέργειας ένα συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα κεντρικού δέκτη, εισάγονται με τη μέθοδο 'drag and drop' τα απαραίτητα μοντέλα από τις βιβλιοθήκες «Components» και «Weather_data» οι οποίες παρουσιάστηκαν σε προηγούμενα εδάφια του παρόντος κεφαλαίου. Αρχικά, εισάγεται ένα μοντέλο «WeatherDataReaderIR», το οποίο θα εισάγει στο σύστημα τα μετεωρολογικά δεδομένα της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος και της κάθετης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του εδάφους. Έπειτα, εισάγονται κατά σειρά ένα μοντέλο «Heliostats» το οποίο θα περιγράφει το γήπεδο με τους ηλιοστάτες ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας, ένα μοντέλο

«Receiver» το οποίο θα αντιπροσωπεύει τον ηλιακό πύργο, δυο μοντέλα «Tank» τα οποία θα περιγράφουν τη θερμική αποθήκευση του τηγμένου άλατος στη θερμή και την κρύα δεξαμενή και τέλος, δυο μοντέλα «Circulator» για τη σωστή κυκλοφορία του τηγμένου άλατος. Στη συνέχεια, εισάγεται ένα μοντέλο «Hex» το οποίο αντιπροσωπεύει τον εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος και του θερμοδυναμικού κύκλου Brayton. Ακολούθως, εισάγονται τα μοντέλα των «Compressor», «Turbine» και «Generator» τα οποία οδηγούν στον υπολογισμό της καθαρά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Επιπλέον, εισάγεται ένα μοντέλο «Regenerator» για σκοπούς αναγέννησης θερμότητας και βελτίωσης του βαθμού απόδοσης, καθώς επίσης και ένα μοντέλο «Cooler» που μοντελοποιεί τη ψύξη του εργαζόμενου μέσου στο θερμοδυναμικό κύκλο. Τέλος, εισάγονται τέσσερα μοντέλα «Integrator» για τον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας, τρία μοντέλα «Efficiency» για τον υπολογισμό των βαθμών απόδοσης του θερμικού συστήματος, του θερμοδυναμικού κύκλου και του συνολικού συστήματος αντίστοιχα, καθώς επίσης και τέσσερα μοντέλα «Value_kWh», αλλά και τρία μοντέλα «Value_efficiency» για την καλύτερη οργάνωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης που θα ακολουθήσει. Οι διαστάσεις του λευκού καμβά της προβολής διαγράμματος μπορούν να τροποποιηθούν με τη χρήση του εργαλείου 'Attributes' το οποίο βρίσκεται στην καρτέλα γραφικών. Στην **Εικόνα 196** παρουσιάζεται η προσωρινή προβολή διαγράμματος του τελικού συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει τα μοντέλα που έχουν επιλεγεί για τη μοντελοποίηση του, χωρίς όμως τις απαραίτητες συνδέσεις οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια [72].



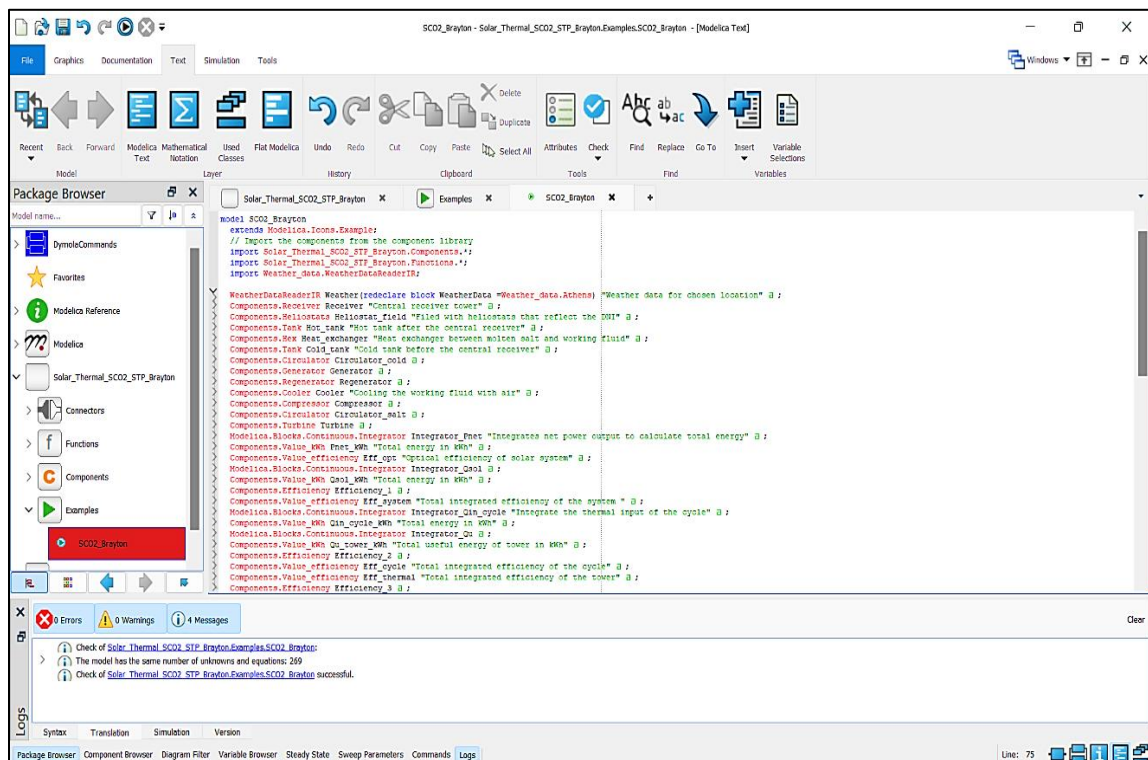
Εικόνα 196: Προσωρινή προβολή διαγράμματος του μοντέλου «SCO2_Brayton» χωρίς την τελική συνδεσμολογία στο λογισμικό Dymola [72]

Στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνει η συνδεσμολογία μεταξύ των μοντέλων. Για να συνδεθούν δυο μοντέλα, θα πρέπει το ποντίκι να τοποθετηθεί στον επιθυμητό σύνδεσμο και αφού πατηθεί το αριστερό κλικ παρατεταμένα, κρατώντας το πατημένο να οδηγηθεί στον αντίστοιχο σύνδεσμο που θα συνδεθεί και το αριστερό κλικ να αφηθεί. Είναι πολύ σημαντικό να διευκρινιστεί ότι η σχεδίαση γραμμής με το εργαλείο 'Line' της καρτέλας γραφικών δεν οδηγεί στη δημιουργία σύνδεσης μεταξύ δυο μοντέλων. Στην **Εικόνα 197** παρουσιάζεται η συνδεσμολογία της μοντελοποίησης του τελικού συστήματος. Οι γραμμές σύνδεσης μπορούν να μορφοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο που μορφοποιούνται και οι γραμμές σχεδίασης, δηλαδή κάνοντας χρήση του εργαλείου 'Line Style' της καρτέλας γραφικών. Η μπλε διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, ενώ η πορτοκαλί διακεκομμένη γραμμή στην κάθετη άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του εδάφους. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την διαθέσιμη ηλιακή ισχύ του συστήματος, ενώ η κόκκινη συνεχής γραμμή το κύκλωμα του τηγμένου άλατος. Η πράσινη συνεχής γραμμή αντιπροσωπεύει το κύκλωμα του διοξειδίου του άνθρακα, ενώ η μαύρη συνεχής γραμμή την κοινή περιστρεφόμενη άτραχτο του θερμοδυναμικού συστήματος. Τέλος, η μαύρη γραμμή με τη μορφή τέλειαις και παύλας (dash-dot) αντιπροσωπεύει τη μεταφορά δεδομένων με τη μορφή πραγματικών αριθμών. Με τη χρήση του εργαλείου 'Check' της καρτέλας γραφικών πραγματοποιείται ο τελικός έλεγχος του μοντελοποιημένου συστήματος [72].

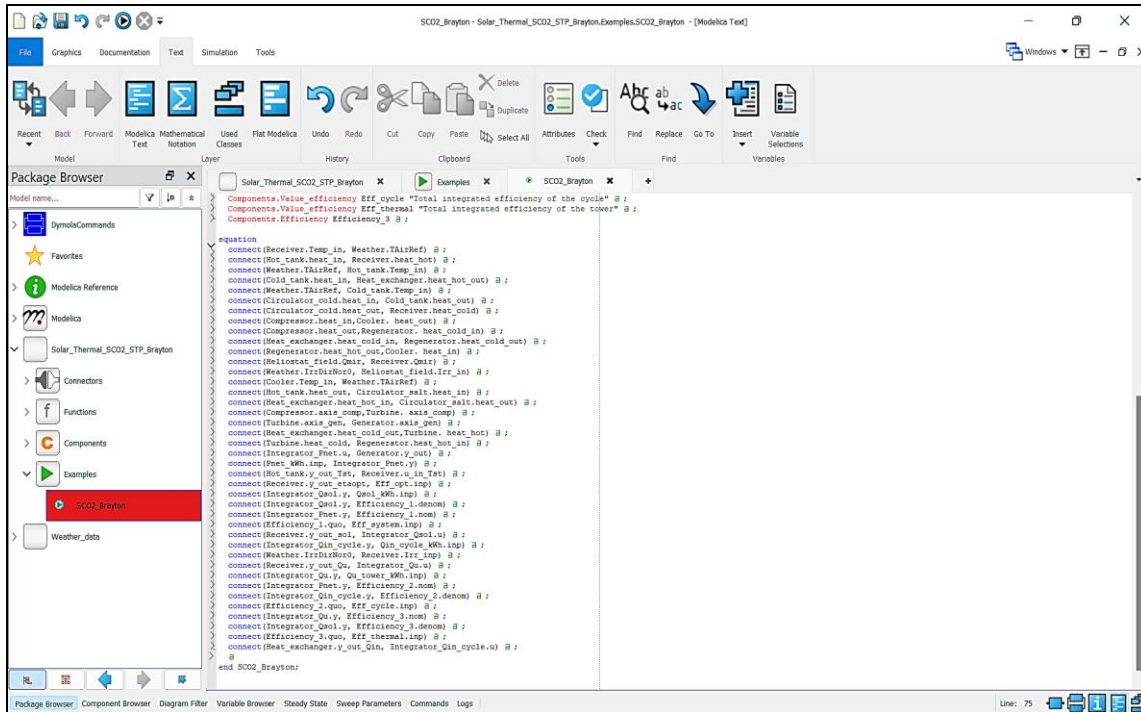


Εικόνα 197: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «SCO2_Brayton» στο λογισμικό Dymola [72]

Στην **Εικόνα 198** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου του μοντέλου του τελικού συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει τα μοντέλα του συστήματος. Αυτά τα μοντέλα είναι αντίγραφα των μοντέλων της βιβλιοθήκης «Components» (instances) και δημιουργούνται αυτόματα όταν το εκάστοτε μοντέλο εισάγεται στην προβολή διαγράμματος του μοντέλου «SCO2_Brayton». Στην **Εικόνα 199** παρουσιάζεται η συνέχεια της προβολής κειμένου του μοντέλου του τελικού συστήματος, στην οποία φαίνονται οι εξισώσεις συνδεσμολογίας (connect equations). Οι εξισώσεις αυτές δημιουργούνται αυτόματα κατά τον ορισμό των συνδεσμολογιών στην προβολή διαγράμματος του μοντέλου, διαδικασία η οποία περιγράφηκε πιο πάνω. Επομένως, πέραν της εισαγωγής των απαιτούμενων βιβλιοθηκών, το υπόλοιπο μέρος του κώδικα σε γλώσσα Modelica που αφορά το τελικό μοντέλο δημιουργείται αυτόματα από το λογισμικό Dymola με βάση τις ενέργειες του χρήστη στην προβολή διαγράμματος του μοντέλου [72].

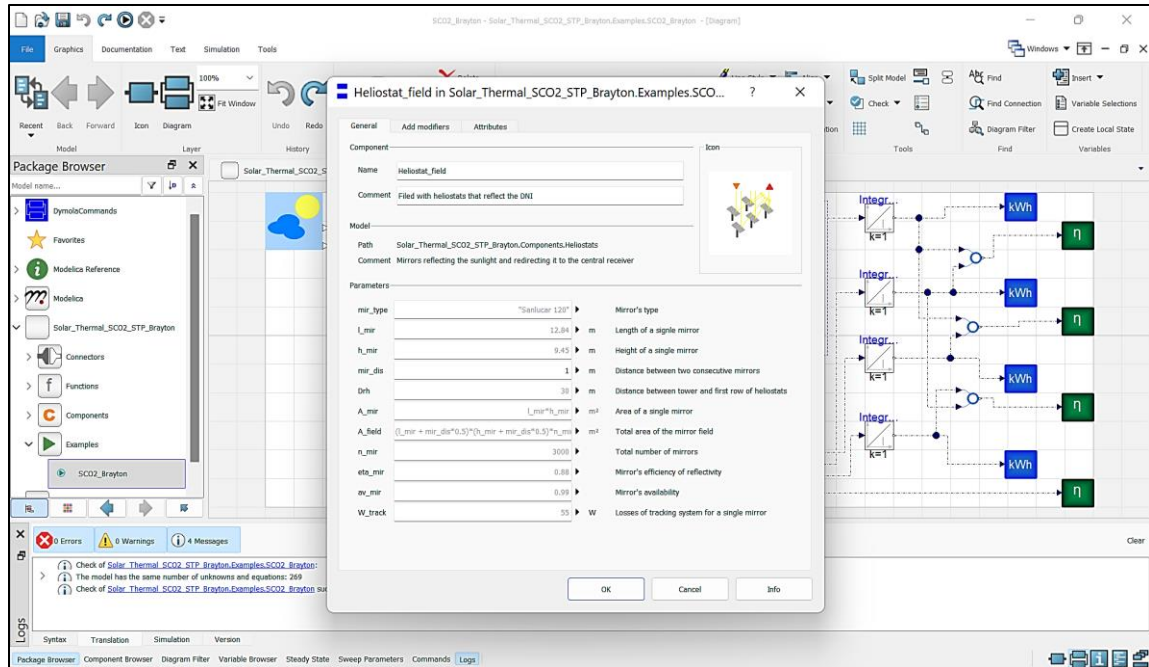


Εικόνα 198: Προβολή κειμένου του τμήματος των μοντέλων που αποτελούν το τελικό μοντέλο «SCO2_Brayton» στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 199: Προβολή κειμένου των εξισώσεων συνδεσμολογίας (*connect equations*) του μοντέλου «SCO2_Brayton» στο λογισμικό Dymola [72]

Ο ορισμός των παραμέτρων για την εκάστοτε προσομοίωση μπορεί να οριστεί με τρεις τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι αλλάζοντας τις αριθμητικές τιμές των παραμέτρων από την προβολή κειμένου του κάθε μοντέλου. Αυτός ο τρόπος δεν συνίσταται, διότι στην περίπτωση που κάποιο μοντέλο χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση πολλών διαφορετικών συστημάτων η τιμή αυτή θα ορίζεται για όλα τα συστήματα. Ο δεύτερος τρόπος γίνεται μέσω της καρτέλας προβολής διαγράμματος. Αφού έχει εισαχθεί το επιθυμητό μοντέλο, κάνοντας διπλό κλικ σε αυτό εμφανίζεται ένα παράθυρο το οποίο περιέχει όλες τις πληροφορίες που αφορούν το μοντέλο. Στην **Εικόνα 200** παρουσιάζεται η περίπτωση του μοντέλου «Heliostats». Στο τμήμα *Component* της καρτέλας *General* μπορεί να τροποποιηθεί το όνομα του μοντέλου σε σχέση με το προεπιλεγμένο που επιλέγει αυτόματα από το λογισμικό κατά την εισαγωγή του μοντέλου στην προβολή διαγράμματος. Στο τμήμα *Model* δίνονται πληροφορίες που αφορούν τη διαδρομή θέσης του μοντέλου. Στο τμήμα *Parameters* φαίνονται όλες οι παραμέτροι που αφορούν το μοντέλο, όπως αυτές δηλώνονται σε γλώσσα Modelica στην προβολή κειμένου. Στα πεδία στα οποία η τιμή είναι αναγραφμένη με γκριζό χρώμα, η τιμή αντιστοιχεί στην προεπιλεγμένη τιμή που έχει δηλωθεί κατά τη δημιουργία του μοντέλου. Στα πεδία όπου υπάρχει κάποια συνάρτηση σημαίνει ότι αυτή η παράμετρος υπολογίζεται με βάση τις τιμές άλλων παραμέτρων του μοντέλου. Αλλάζοντας μια τιμή, αυτή εμφανίζεται με έντονο μαύρο χρώμα στο αντίστοιχο πεδίο. Αυτή η τιμή πλέον αφορά αποκλειστικά το αντίγραφο του συγκεκριμένου μοντέλου που συμμετέχει στην μοντελοποίηση του συγκεκριμένου συστήματος. Ο τρίτος τρόπος γίνεται μέσω του εργαλείου *Translate* της καρτέλας προσομοίωσης και παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο [72].

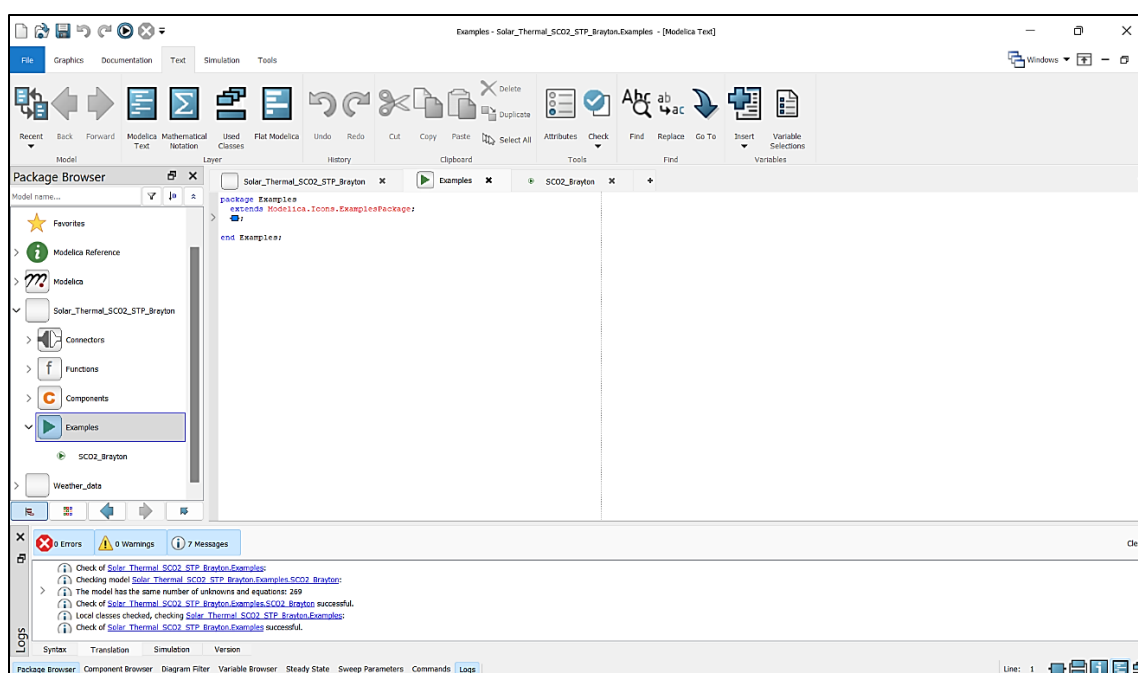


Εικόνα 200: Τροποποίηση παραμέτρων ενός μοντέλου στην προβολή διαγράμματος στο λογισμικό Dymola [72]

9. Προσομοίωση STP με Dymola

9.1. Εκτέλεση προσομοίωσης στο λογισμικό Dymola

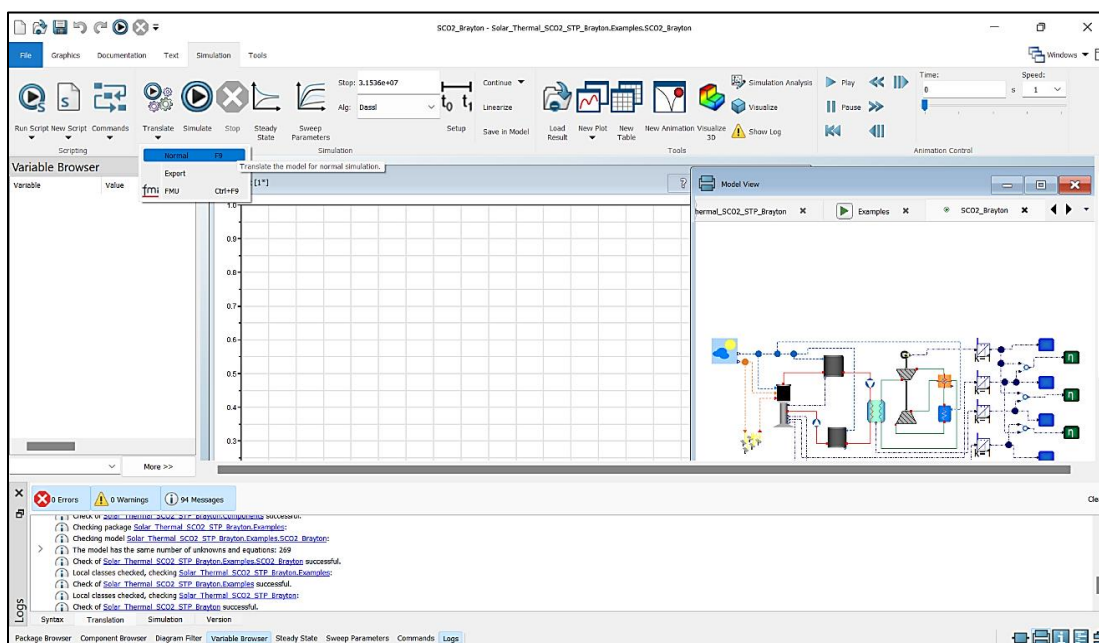
Το περιβάλλον Dymola επιτρέπει την προσομοίωση μοντέλων τα οποία στηρίζονται στη γλώσσα Modelica. Αρχικά, γίνεται έλεγχος του τελικού μοντέλου έτσι ώστε να διαπιστωθεί ότι δεν παραβιάζει τις αρχές της Modelica. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με τη χρήση του εργαλείου ελέγχου 'Check' το οποίο βρίσκεται στη γραμμή εργαλείων των καρτελών γραφικών και κειμένου. Ο επιτυχής έλεγχος του μοντέλου «SCO2_Brayton» παρουσιάζεται στην **Εικόνα 197**. Στην **Εικόνα 201** παρουσιάζεται η προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Examples», ενώ διακρίνεται και ο επιτυχής έλεγχος της [72].



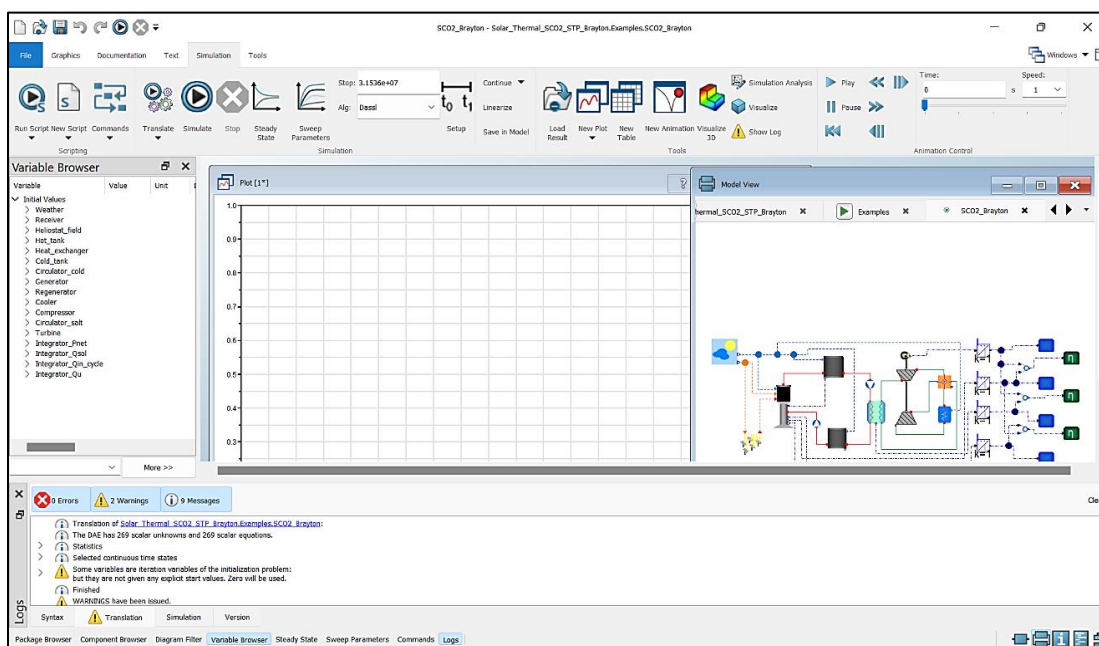
Εικόνα 201: Τελική προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Examples» στο λογισμικό Dymola [72]

Αφού ο έλεγχος του μοντέλου «SCO2_Brayton» έχει ολοκληρωθεί με επιτυχία, πλέον είναι δυνατή η προσομοίωση του. Για να προσομοιωθεί ένα μοντέλο, θα πρέπει προηγουμένως να έχει επιλεγεί στην καρτέλα γραφικών ή στην καρτέλα προβολής κειμένου. Η προσομοίωση εκτελείται στην καρτέλα «Simulation» του λογισμικού. Πρώτα, επιλέγεται από τη γραμμή εργαλείων της καρτέλας η εντολή μετάφρασης του μοντέλου, δηλαδή η εντολή 'Translate', εντολή η οποία παρουσιάζεται στην **Εικόνα 202**. Αφού η εντολή εκτελεστεί με επιτυχία, στο παράθυρο της αναζήτησης μεταβλητών (Variable Browser) εμφανίζονται όλες οι μεταβλητές οι οποίες δηλώθηκαν ως παράμετροι ή σταθερές στα μοντέλα που αποτελούν το τελικό σύστημα. Σε αυτό το σημείο, είναι δυνατή η τροποποίηση των τιμών των παραμέτρων οι οποίες παραμένουν σταθερές κατά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης. Στην **Εικόνα 203** παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της μετάφρασης του

μοντέλου «SCO2_Brayton». Στο αρχείο καταγραφής του λογισμικού εμφανίζεται μια προειδοποίηση στην οποία επισημαίνεται ότι οι μεταβλητές που συμμετέχουν στο πρόβλημα της αρχικοποίησης και δεν έχουν τύχει αρχικοποίησης, αποκτούν αυτόματα μη-δενική αρχική τιμή εκτίμησης. Το λογισμικό, λύνοντας το πρόβλημα της αρχικοποίησης υπολογίζει την ακριβή αρχική τιμή των μεταβλητών αυτών. Σε περίπτωση όμως που η αρχική τους τιμή είναι γνωστή, προτείνεται να ορίζεται απευθείας από τον χρήστη έτσι ώστε να υποβοηθηθεί η διαδικασία της επίλυσης των εξισώσεων [72].

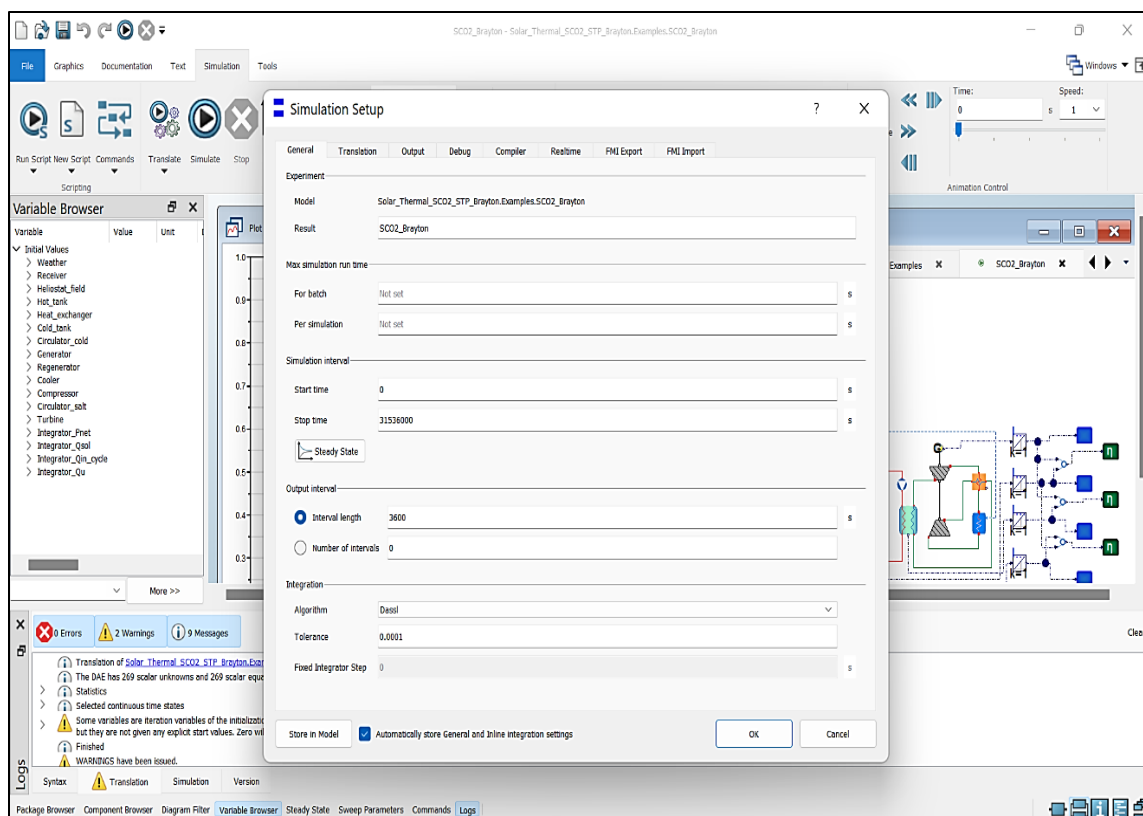


Εικόνα 202: Εντολή μετάφρασης μοντέλου ‘Translate’ στο λογισμικό Dymola [72]

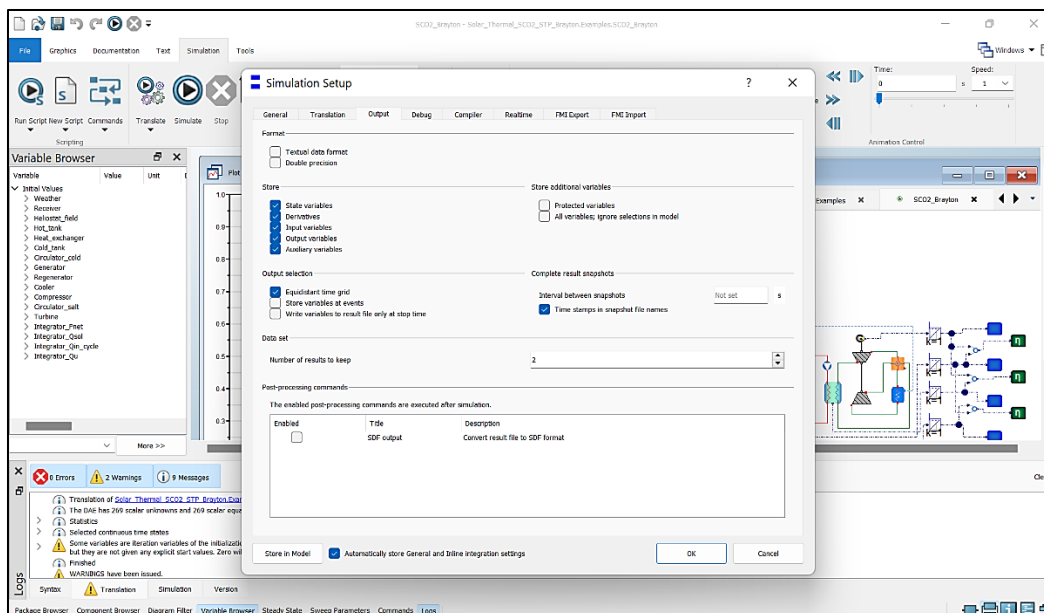


Εικόνα 203: Επιτυχής μετάφραση μοντέλου «SCO2_Brayton» στο λογισμικό Dymola [72]

Αφού εκτελεστεί με επιτυχία η μετάφραση του μοντέλου, το επόμενο στάδιο είναι ο ορισμός των στοιχείων που αφορούν την προσομοίωση. Αυτό γίνεται με τη χρήση του εργαλείου των ρυθμίσεων προσομοίωσης ‘*Simulation Setup*’ της γραμμής εργαλείων της καρτέλας προσομοίωσης. Στο τμήμα ‘*Simulation interval*’ της γενικής καρτέλας ‘*General*’, είναι δυνατός ο ορισμός της αρχικής και τελικής χρονικής στιγμής για τις οποίες θα εκτελεστεί η προσομοίωση. Η αρχική χρονική στιγμή ορίζεται να είναι η μηδενική, ενώ η τελική χρονική στιγμή ορίζεται ως η διάρκεια ενός έτους σε δευτερόλεπτα. Αυτή η επιλογή αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από 1^η Ιανουαρίου μέχρι 31^η Δεκεμβρίου. Στην ίδια καρτέλα ορίζεται το χρονικό βήμα επίλυσης (interval length) για το οποίο μια συνήθης τιμή για ετήσιες προσομοιώσεις είναι τα δευτερόλεπτα που διαρκεί μια ώρα της μέρας. Επιπλέον, ορίζεται η μέθοδος επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων. Η προεπιλεγμένη μέθοδος είναι η μέθοδος ‘*Dassl*’. Στην καρτέλα των τιμών εξόδου ‘*Output*’ επιλέγονται οι μεταβλητές που θα καταγράφονται στα αποτελέσματα. Στην **Εικόνα 204** παρουσιάζεται η γενική καρτέλα (General) του εργαλείου των ρυθμίσεων προσομοίωσης, ενώ στην **Εικόνα 205** η καρτέλα των μεταβλητών εξόδου (Output) [72].

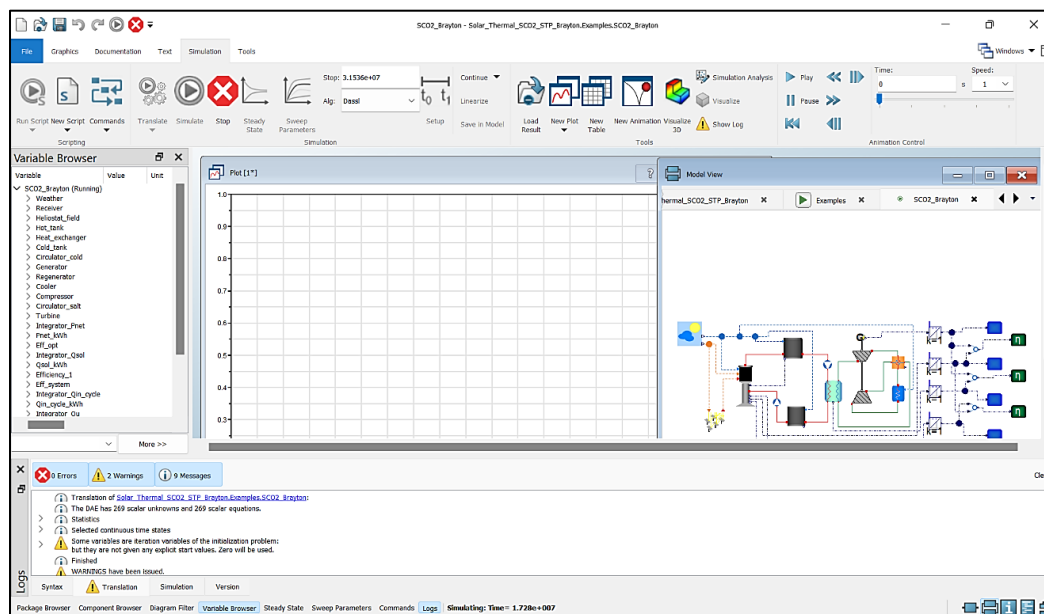


Εικόνα 204: Γενική καρτέλα ‘*General*’ των ρυθμίσεων προσομοίωσης (*Simulation Setup*) στο λογισμικό *Dymola* [72]

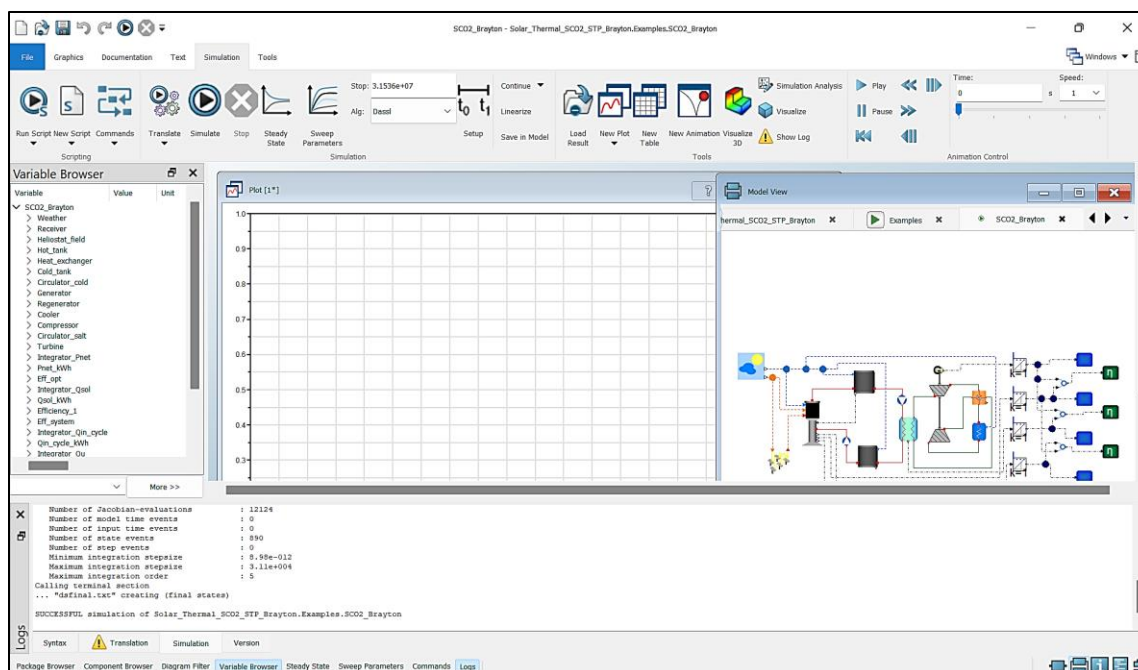


Εικόνα 205: Καρτέλα μεταβλητών εξόδου 'Output' των ρυθμίσεων προσομοίωσης (Simulation Setup) στο λογισμικό Dymola [72]

Έχοντας ορίσει τις απαραίτητες ρυθμίσεις που αφορούν την προσομοίωση, το επόμενο βήμα είναι η εκτέλεση της. Επιλέγοντας το εργαλείο της προσομοίωσης 'Simulate' στην ομώνυμη καρτέλα, η προσομοίωση εκτελείται. Στην **Εικόνα 206** παρουσιάζεται η διαδικασία εκτέλεσης της προσομοίωσης. Με το εργαλείο τερματισμού 'Stop' επιτρέπεται ο άμεσος τερματισμός της διαδικασίας. Στην **Εικόνα 207** παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Στο αρχείο καταγραφής του λογισμικού αναφέρεται ότι η διαδικασία ήταν επιτυχής (SUCCESSFUL simulation) [72].



Εικόνα 206: Εκτέλεση προσομοίωσης στο λογισμικό Dymola [72]



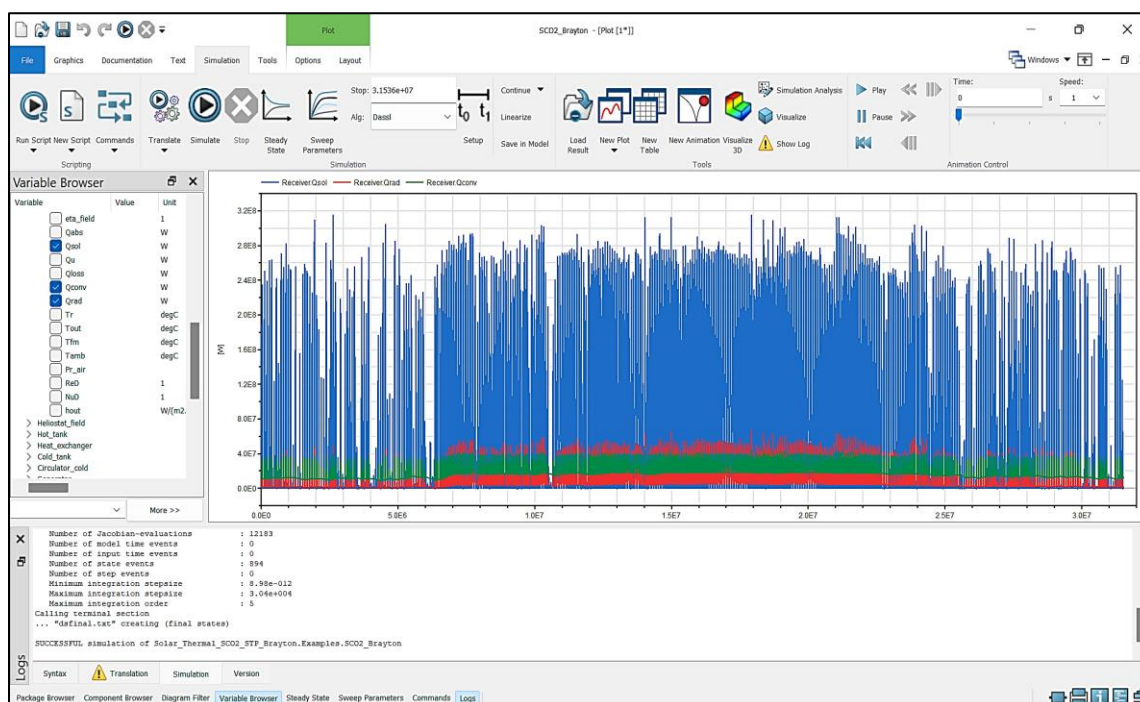
Εικόνα 207: Επιτυχής εκτέλεση προσομοίωσης στο λογισμικό Dymola [72]

9.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης στο λογισμικό Dymola

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι διαθέσιμα στο παράθυρο της αναζήτησης μεταβλητών (Variable Browser). Επιλέγοντας το βέλος που βρίσκεται δίπλα από κάθε μοντέλο, εμφανίζονται όλες οι παραμέτροι αλλά και οι μεταβλητές που υπολογίστηκαν από την προσομοίωση όπως αυτές είχαν οριστεί σε γλώσσα Modelica κατά τη μοντελοποίηση του εκάστοτε μοντέλου. Επιλέγοντας το λευκό κουτί δίπλα από κάθε τέτοια μεταβλητή, η χρονική μεταβολή της παρουσιάζεται στο παράθυρο διαγράμματος (Plot). Σε αυτό το παράθυρο είναι δυνατή η παρουσίαση πολλών μεταβλητών το οποίο επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ τους. Στην **Εικόνα 208** παρουσιάζεται η μεταβολή της ωφέλιμης ισχύος του κεντρικού δέκτη, συγκρινόμενη με την διαθέσιμη ηλιακή ισχύ αλλά και την απορροφούμενη ισχύ που προκύπτει εντέλει λόγω του οπτικού βαθμού απόδοσης του ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος. Στην **Εικόνα 209** παρουσιάζεται η μεταβολή των θερμικών απωλειών του κεντρικού δέκτη. Όπως φαίνεται, οι θερμικές απώλειες συνεχίζουν να υφίστανται και κατά τη διάρκεια της νύχτας παρόλο που η ωφέλιμη ισχύς μηδενίζεται εξ' αιτίας του ελέγχου που εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό ισχύει λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην συλλεκτική επιφάνεια του κεντρικού δέκτη [44][72].

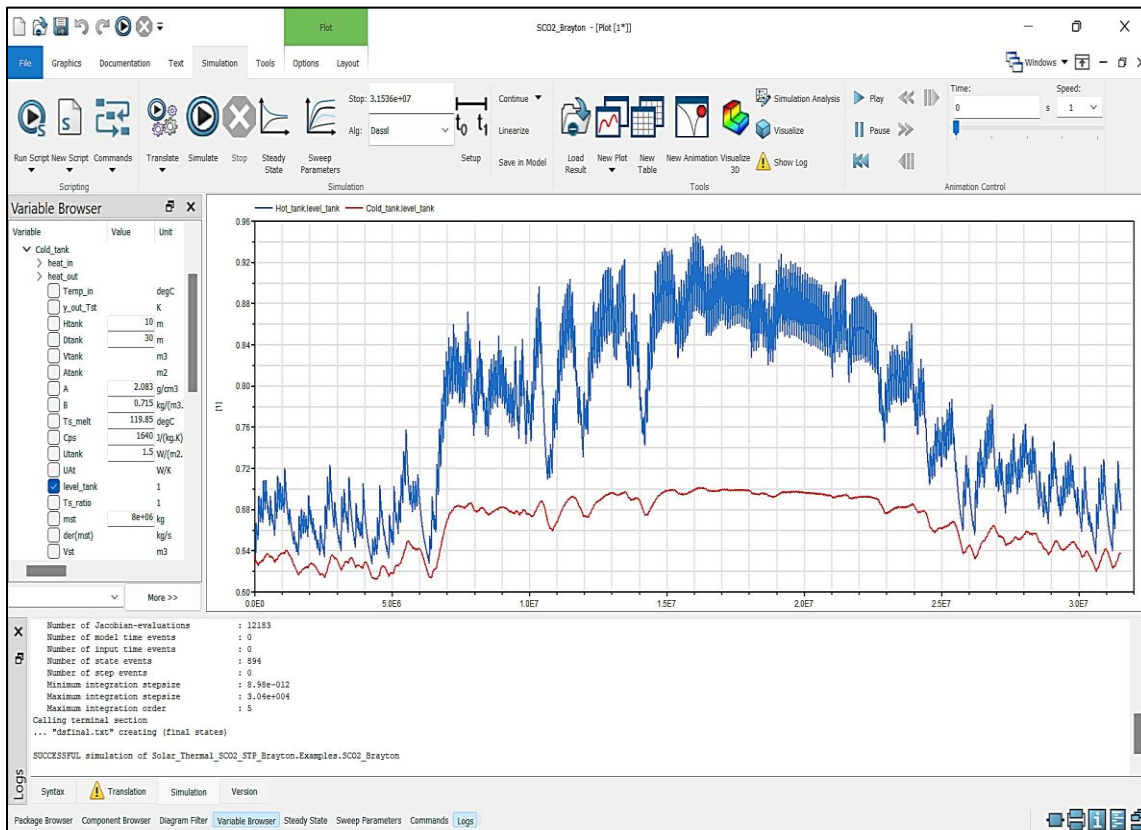


Εικόνα 208: Χρονική μεταβολή ωφέλιμης ισχύος (Receiver.Qu) σε σύγκριση με τη διαθέσιμη ηλιακή (Receiver.Qsol) και την απορροφούμενη ισχύ από τον κεντρικό δέκτη (Receiver.Qabs) στο λογισμικό Dymola [72]

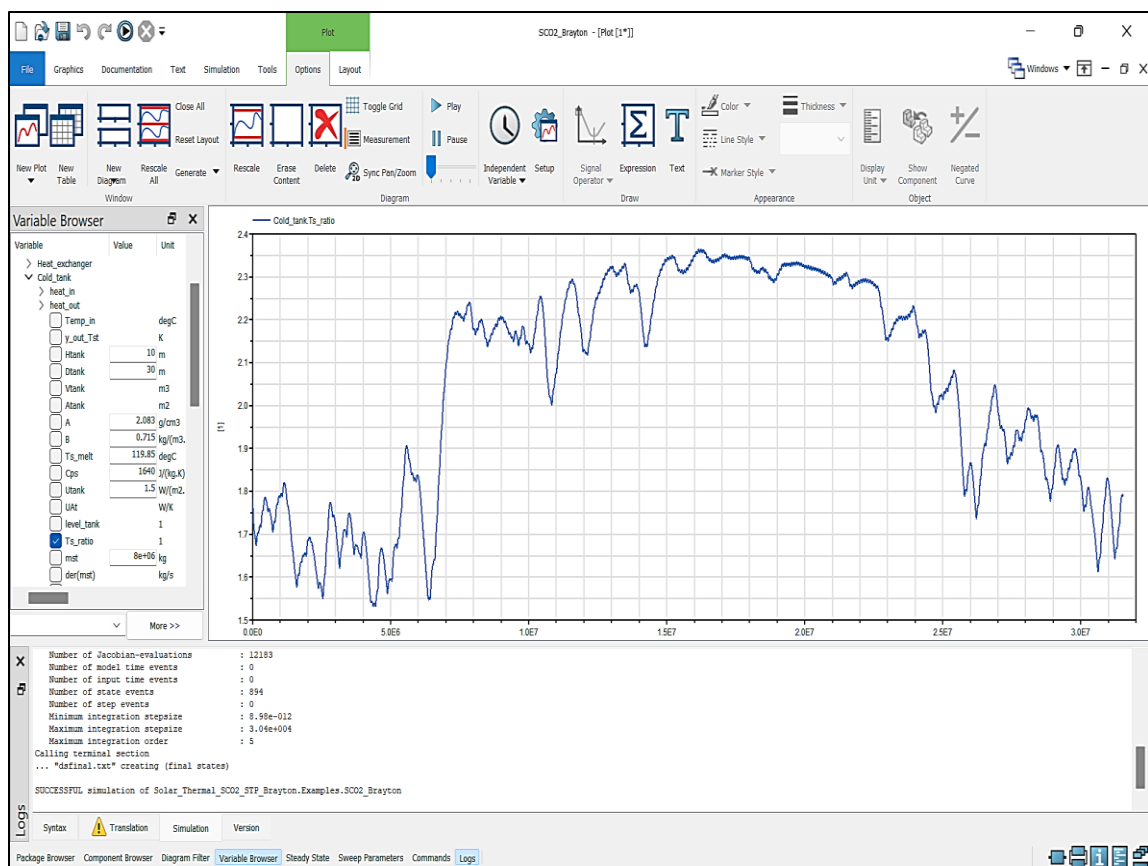


Εικόνα 209: Χρονική μεταβολή θερμικών απωλειών ακτινοβολίας (Receiver.Qrad) και συναγωγής (Receiver.Qconv) σε σύγκριση με τη διαθέσιμη ηλιακή ισχύ (Receiver.Qsol) στο λογισμικό Dymola [72]

Στα δοχεία αποθήκευσης θα πρέπει να γίνει ο απαραίτητος έλεγχος ότι ο όγκος του τηγμένου άλατος δεν θα ξεπεράσει το μέγεθος του δοχείου. Επιπλέον, στο κρύο δοχείο που βρίσκεται μετά τον εναλλάκτη θα πρέπει να γίνει έλεγχος ότι ο λόγος της θερμοκρασίας του ρευστού προς το σημείο τήξης αυτού δεν θα είναι μικρότερους της μονάδας, το οποίο θα οδηγούσε σε φραγή του κύκλου διακίνησης του τηγμένου άλατος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η θερμοκρασία του άλατος στο θερμό δοχείο θα είναι ακόμη μεγαλύτερη, ο αντίστοιχος έλεγχος δεν είναι απαραίτητος και για το θερμό δοχείο. Στη **Εικόνα 210** παρουσιάζεται ο έλεγχος της στάθμης των δυο δοχείων, ενώ στην **Εικόνα 211** παρουσιάζεται ο έλεγχος του λόγου θερμοκρασιών για το κρύο δοχείο [50][72].

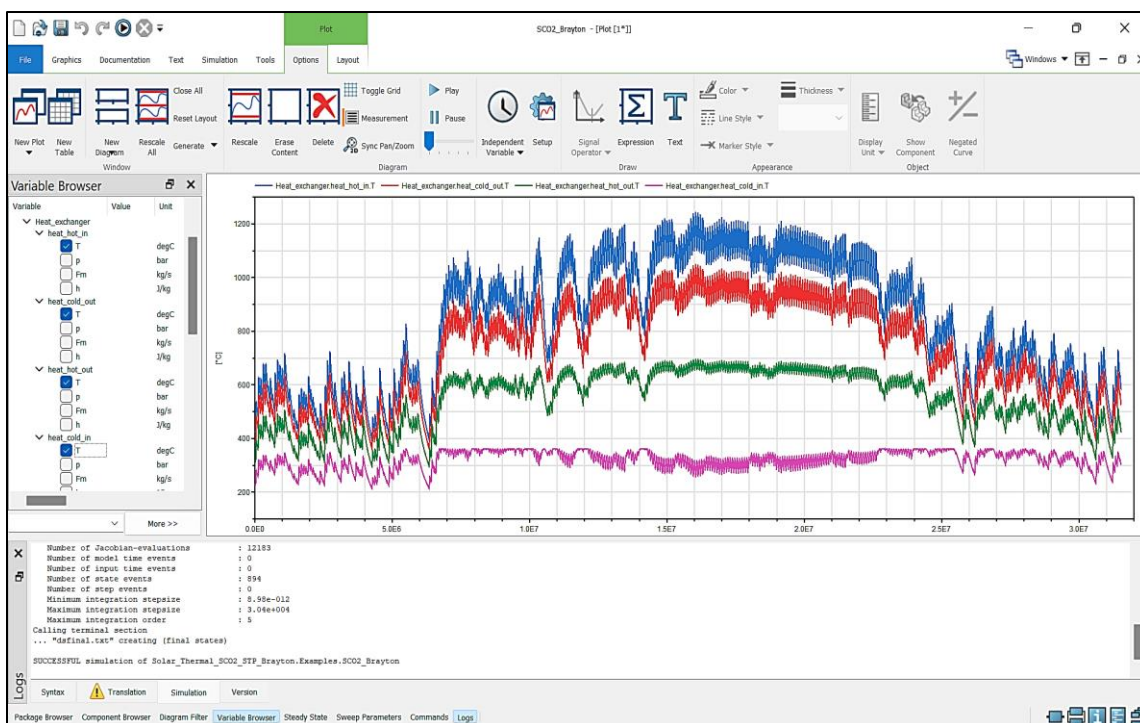


Εικόνα 210: Έλεγχος στάθμης θερμού (Hot_tank.level_tank) και κρύου (Cold_tank.level.tank) δοχείου στο λογισμικό Dymola [72]

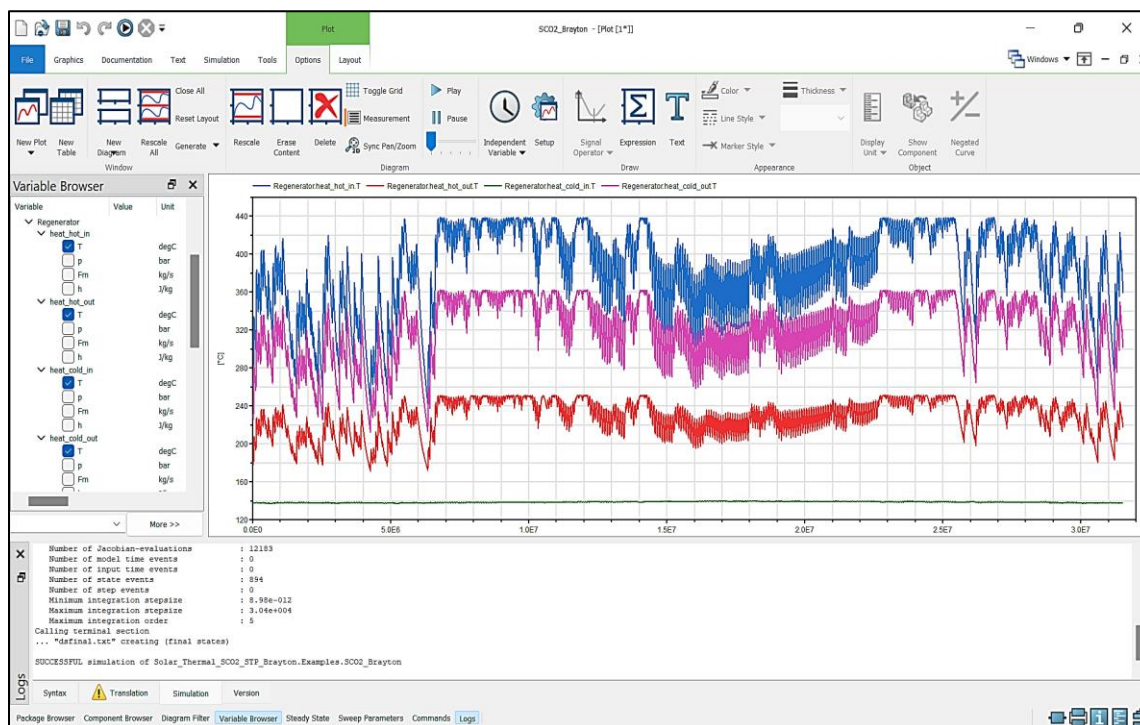


Εικόνα 211: Λόγος θερμοκρασίας προς σημείο τήξης τηγμένου άλατος εντός του κρύου δοχείου (*Cold_tank.Ts_ratio*) στο λογισμικό Dymola [72]

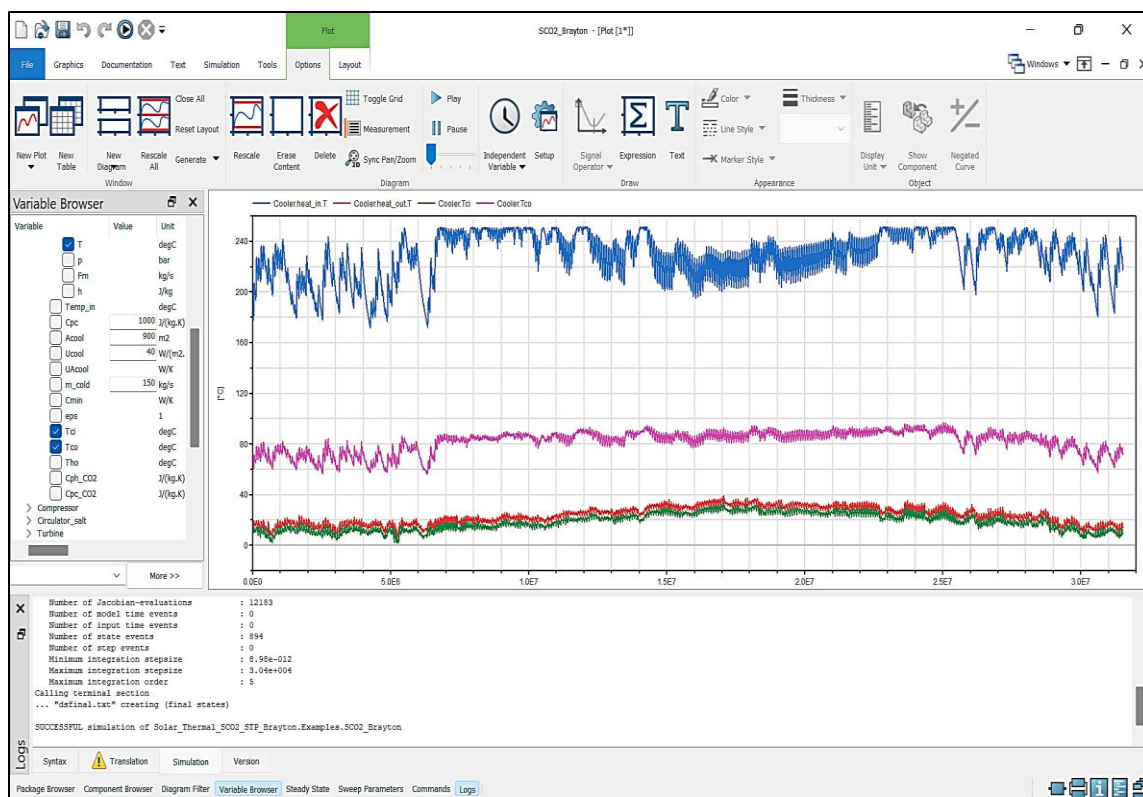
Για τους εναλλάκτες θερμότητας, θα πρέπει να γίνει έλεγχος ότι δεν παραβιάζονται τα θερμοδυναμικά αξιώματα. Η μέγιστη θερμοκρασία θα πρέπει να είναι αυτή της εισόδου του θερμού ρευστού και η ελάχιστη αυτή της εισόδου του κρύου ρευστού. Επειδή οι εναλλάκτες είναι αντιστροφής, η θερμοκρασία εξόδου του κρύου ρευστού δύναται να ξεπεράσει αυτήν της εξόδου του θερμού ρευστού. Στην **Εικόνα 212** παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευστών από τον εναλλάκτη θερμότητας της εγκατάστασης. Στην **Εικόνα 213** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες θερμοκρασίες που αφορούν τον αναγεννητή θερμότητας του κύκλου Brayton, ενώ στην **Εικόνα 214** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες θερμοκρασίες του ψύκτη του κύκλου [72][80].



Εικόνα 212: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου τηγμένου άλατος (hot) και διοξειδίου του άνθρακα (cold) από τον εναλλάκτη θερμότητας στο λογισμικό Dymola [72]

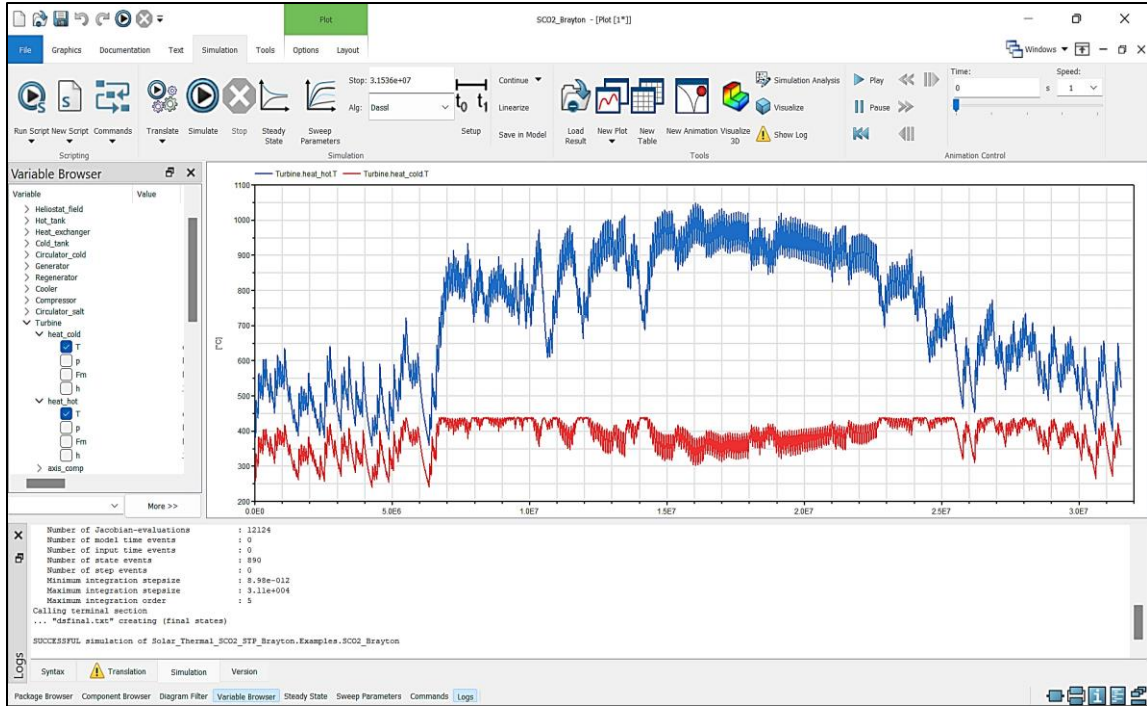


Εικόνα 213: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου διοξειδίου του άνθρακα στον αναγεννητή του κύκλου Brayton στο λογισμικό Dymola [72]

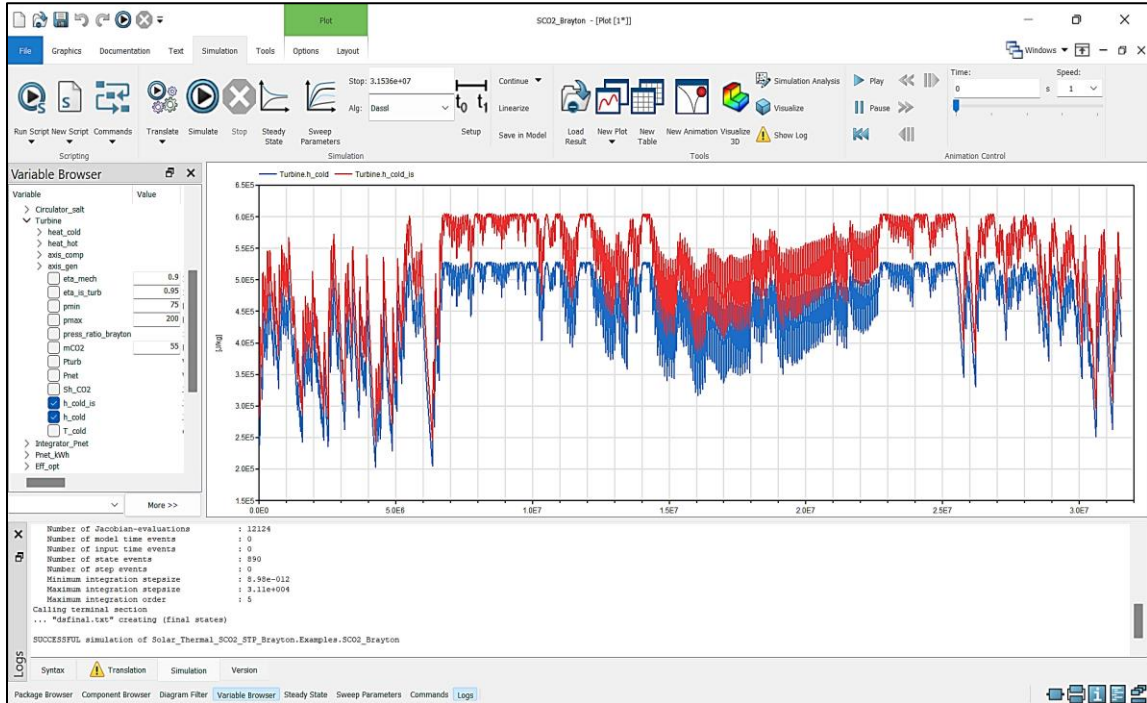


Εικόνα 214: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου διοξειδίου του άνθρακα στον ψύκτη του κύκλου Brayton στο λογισμικό Dymola [72]

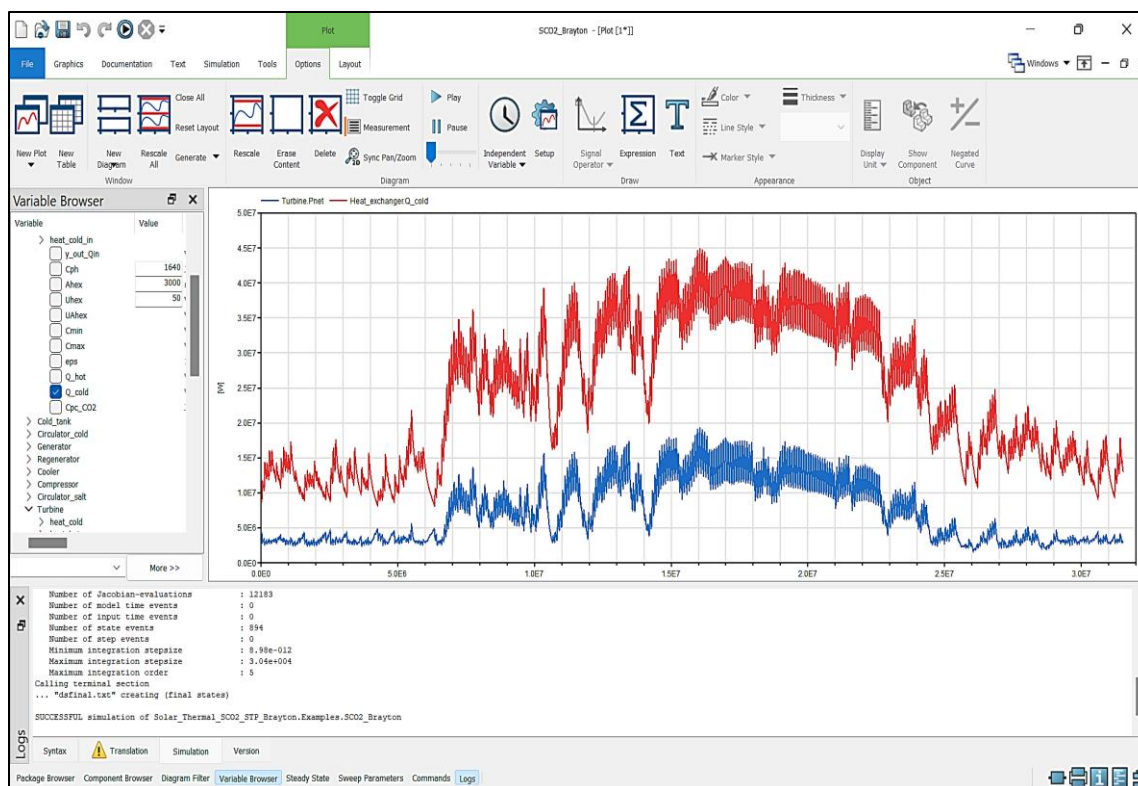
Για τον αεριοστρόβιλο, η θερμοκρασία εξόδου του διοξειδίου του άνθρακα θα πρέπει να είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία εισόδου του. Επιπλέον, η θερμοκρασία εισόδου δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 1500°C, όριο το οποίο καθορίζεται από τη μέγιστη αντοχή των υλικών των πτερυγίων στην είσοδο ενός αεριοστροβίλου. Στην **Εικόνα 215** παρουσιάζονται οι μεταβολές των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου του διοξειδίου του άνθρακα από τον αεριοστρόβιλο. Επιπλέον, ο ορισμός ενός ισεντροπικού βαθμού απόδοσης οδηγεί στο αποτέλεσμα η ενθαλπία εξόδου του αεριοστροβίλου να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ισεντροπική ενθαλπία. Στην **Εικόνα 216** φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την απαίτηση αυτή. Τέλος, η καθαρά παραγόμενη ισχύς του θερμοδυναμικού κύκλου θα πρέπει να είναι μικρότερη από την προσομοιούμενη σε αυτόν μέσω του εναλλάκτη θερμότητας του συστήματος. Στην **Εικόνα 217** παρουσιάζεται η σύγκριση της προσομοιούμενης με την καθαρά παραγόμενη ισχύ του θερμοδυναμικού κύκλου Brayton [59][72].



Εικόνα 215: Χρονική μεταβολή θερμοκρασίας εισόδου (*Turbine.heat_hot.T*) και εξόδου (*Turbine.heat_cold.T*) του διοξειδίου του άνθρακα από τον αεριοστρόβιλο στο λογισμικό *Dymola* [72]

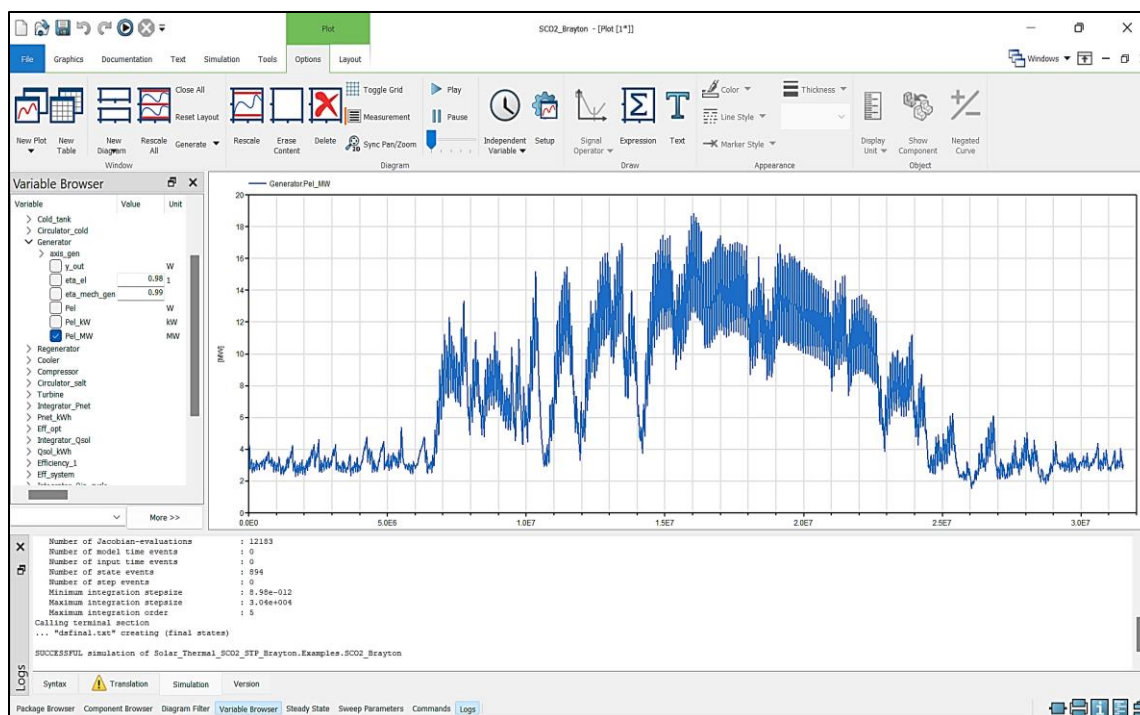


Εικόνα 216: Χρονική μεταβολή πραγματικής (*Turbine.h_cold*) και ισηντροπικής (*Turbine.h_cold_is*) ενθαλπίας αεριοστρόβιλου στο λογισμικό *Dymola* [72]

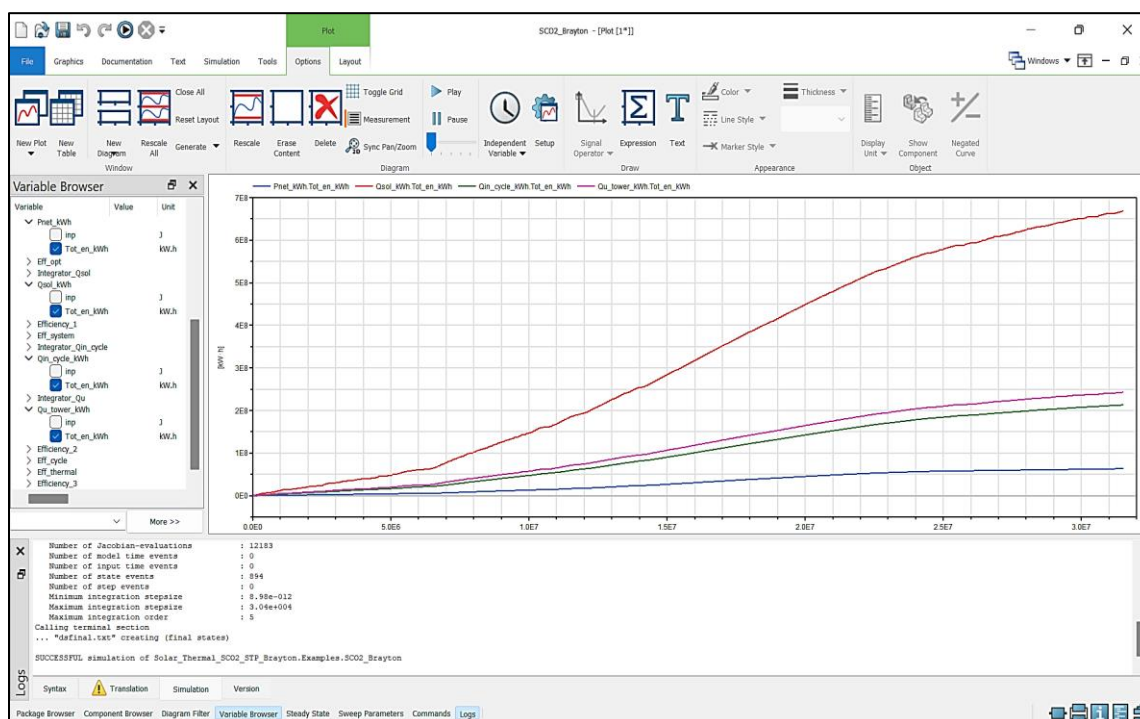


Εικόνα 217: Χρονική μεταβολή καθαρά παραγομένης ισχύος στον αεριοστρόβιλο (*Turbine.Pnet*) σε σύγκριση με την προσδιδόμενη από τον εναλλάκτη (*Heat_exchanger.Q_cold*) θερμότητα στον κύκλο Brayton στο λογισμικό Dymola [72]

Στην **Εικόνα 218** παρουσιάζεται η καθαρά παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του συστήματος, όπως αυτή υπολογίζεται τελικά από το μοντέλο της γεννήτριας. Με βάση αυτή τη χρονική μεταβολή, φαίνεται ότι η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, γεγονός που είναι αναμενόμενο λόγω της αυξημένης διαθέσιμης ηλιακής ισχύος σε αυτό το χρονικό διάστημα του έτους. Στην **Εικόνα 219** παρουσιάζεται η σύγκριση των συνολικών ενεργειών κατά τη διάρκεια του έτους, όπως αυτές προκύπτουν από την ολοκλήρωση των αντίστοιχων καμπυλών ισχύος. Όπως φαίνεται, η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια είναι αρκετά μεγαλύτερη από την τελικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Το πιο αποδοτικό κομμάτι της εγκατάστασης φαίνεται να είναι η μετάδοση της θερμότητας από το ηλιακό θερμικό σύστημα προς τον θερμοδυναμικό κύκλο [72].



Εικόνα 218: Χρονική μεταβολή καθαρά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τη γεννήτρια του συστήματος στο λογισμικό Dymola [72]



Εικόνα 219: Σωρευτικό διάγραμμα χρονικής μεταβολής διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας (Q_{sol}), ωφέλιμης ενέργειας κεντρικού δέκτη (Q_u), προσδιδόμενης στον κύκλο ενέργειας (Q_{in}) και καθαρά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (P_{net}) στο λογισμικό Dymola [72]

9.3. Υπολογισμός βαθμών απόδοσης εγκατάστασης

Τα τελικά αποτελέσματα θα πρέπει να οδηγούν σε λογικές τιμές των βαθμών απόδοσης της εγκατάστασης. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του ηλιακού συστήματος υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (58)**. Ο βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (59)**. Ο τελικός βαθμός απόδοσης του συστήματος υπολογίζεται με βάση την **Εξίσωση (60)**. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος θα πρέπει να είναι μικρότερος από το γινόμενο των βαθμών απόδοσης του θερμικού συστήματος και του θερμοδυναμικού κύκλου [51].

$$\eta_{th} = \frac{W_u}{W_{sol}} \quad (58)$$

$$\eta_{cycle} = \frac{W_{net}}{W_{in}} \quad (59)$$

$$\eta_{sys} = \frac{W_{net}}{W_{sol}} \quad (60)$$

όπου:

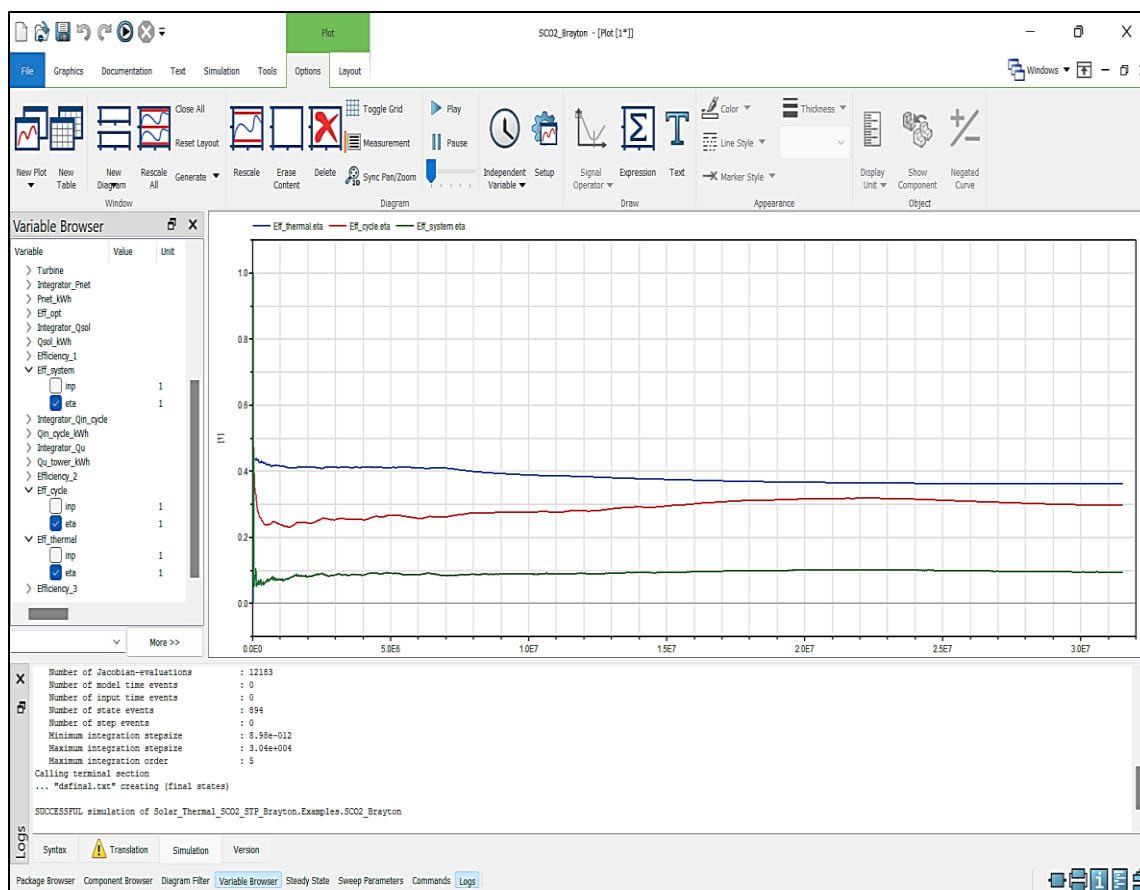
W_u = ωφέλιμη ενέργεια κεντρικού δέκτη [kWh]

W_{sol} = διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια [kWh]

W_{net} = καθαρά παραγόμενη ενέργεια θερμοδυναμικού κύκλου [kWh]

W_{in} = προσδιδόμενη ενέργεια στον θερμοδυναμικό κύκλο [kWh]

Στην **Εικόνα 220** παρουσιάζονται οι βαθμοί απόδοσης της εγκατάστασης οι οποίοι προκύπτουν με χρήση των σωρευτικών διαγραμμάτων ενέργειας τα οποία παρουσιάστηκαν στην **Εικόνα 219**. Όπως φαίνεται, ο θερμικός βαθμός απόδοσης μειώνεται κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών. Αυτό συμβαίνει διότι, παρόλο που η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνεται, η αναπτυσσόμενη στον κεντρικό δέκτη θερμοκρασία αυξάνεται εντονότερα με αποτέλεσμα οι συνολικές απώλειες εντέλει να αυξάνονται. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος κυμαίνεται σε μια μέση τιμή της τάξης του 10%, τιμή η οποία είναι αποδεκτή [44][51].

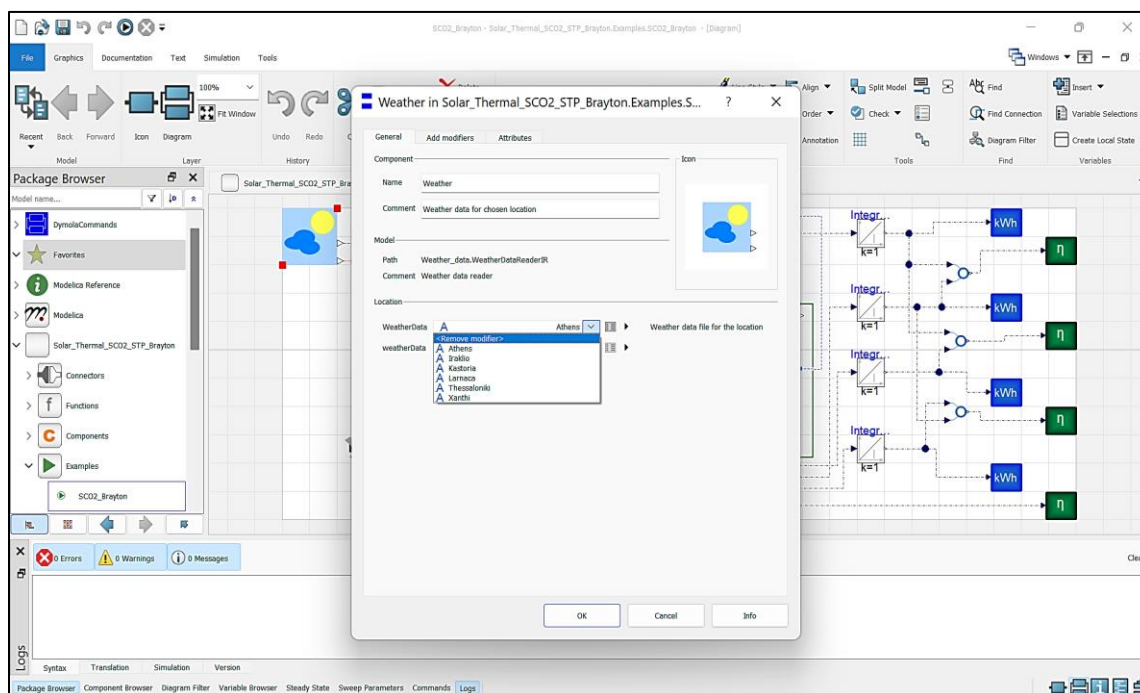


Εικόνα 220: Μέσοι βαθμοί απόδοσης θερμικού συστήματος ($Eff_{thermal}$), θερμοδυναμικού κύκλου (Eff_{cycle}) και συστήματος (Eff_{system}) όπως προκύπτουν με βάση τα σωρευτικά διαγράμματα ενέργειας στο λογισμικό Dymola [72]

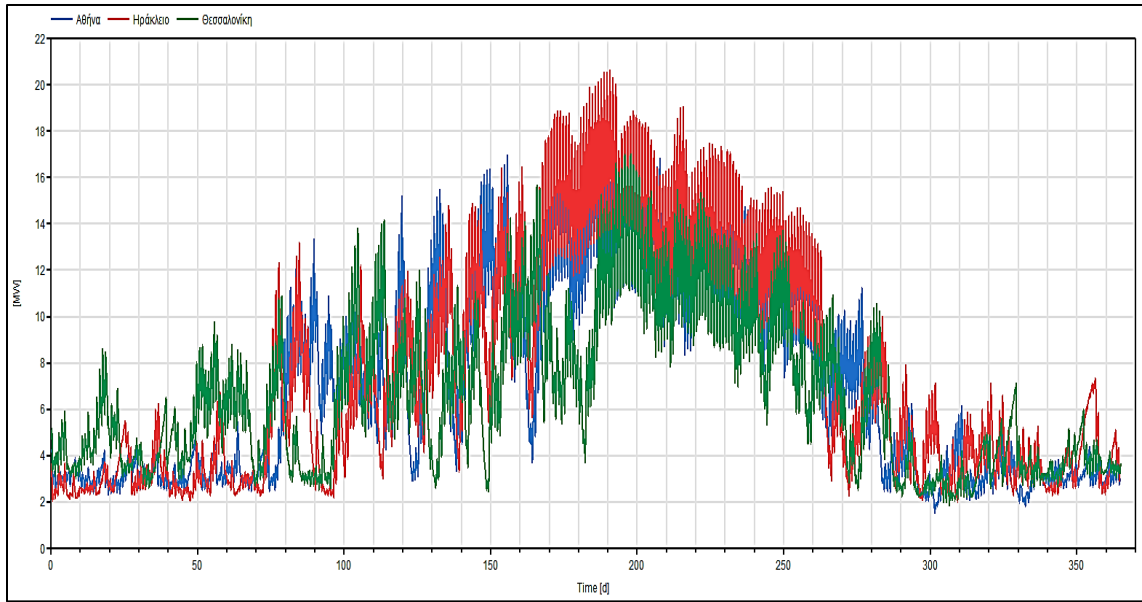
9.4. Παραμετρική μελέτη εγκατάστασης

9.4.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων για τρεις περιοχές της Ελλάδας

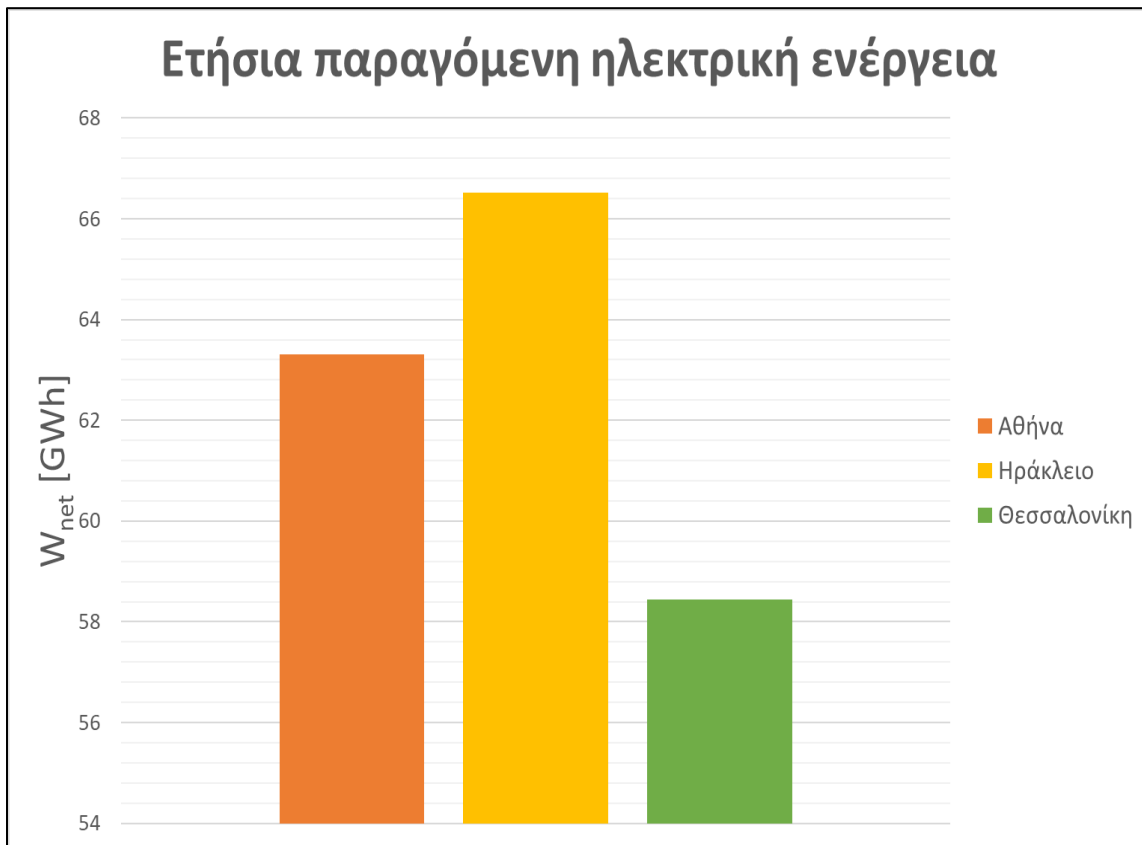
Η μοντελοποίηση του συστήματος επιτρέπει τη διεξαγωγή προσομοιώσεων μεταβάλλοντας διάφορες παραμέτρους του. Μια πρώτη κατηγορία σύγκρισης αφορά τη γεωγραφική θέση της εγκατάστασης. Το μοντέλο των καιρικών συνθηκών περιλαμβάνει δεδομένα για έξι διαφορετικές περιοχές, πέντε στην ελληνική επικράτεια οι οποίες είναι η Αθήνα, το Ηράκλειο, η Καστοριά, η Θεσσαλονίκη και η Ξανθή, αλλά και τη Λάρνακα της Κύπρου. Διατηρώντας τις τιμές των μεγεθών που παρουσιάστηκαν στις προβολές εικόνων των μοντέλων στο όγδοο κεφάλαιο, το μοντέλο του συστήματος προσομοιώνεται για τρεις διαφορετικές πόλεις της Ελλάδας. Οι πόλεις που επιλέχθηκαν είναι η Αθήνα, η Θεσσαλονίκη και το Ηράκλειο καλύπτοντας έτσι μεγάλο γεωγραφικό φάσμα της ελληνικής επικράτειας. Στην **Εικόνα 221** παρουσιάζεται ο τρόπος επιλογής της επιθυμητής από το χρήστη γεωγραφικής περιοχής. Στο **Σχήμα 22** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος για τις τρεις αυτές γεωγραφικές περιοχές. Στο **Σχήμα 23** παρουσιάζεται η σύγκριση της συνολικής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την εγκατάσταση για τις τρεις αυτές περιοχές. Όπως φαίνεται, όσο το γεωγραφικό πλάτος μειώνεται, δηλαδή όσο νοτιότερα βρίσκεται η εγκατάσταση, τόσο αυξάνεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια. Αυτό είναι αναμενόμενο, διότι όσο το γεωγραφικό πλάτος μειώνεται τόσο αυξάνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [32][72].



Εικόνα 221: Επιλογή γεωγραφικής θέσης εγκατάστασης από το μοντέλο «WeatherDataReaderIR» στο λογισμικό Dymola [72]



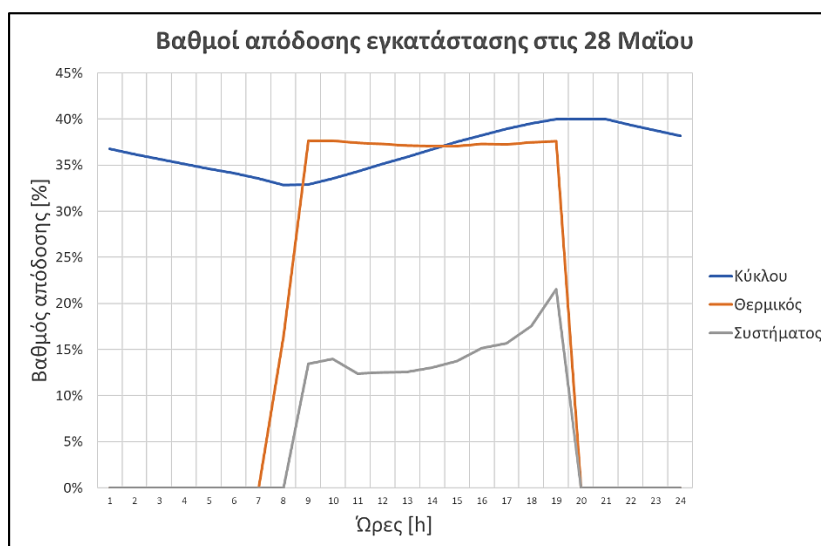
Σχήμα 22: Χρονική μεταβολή παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος για τρεις διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες της Ελλάδας στο λογισμικό Dymola [72]



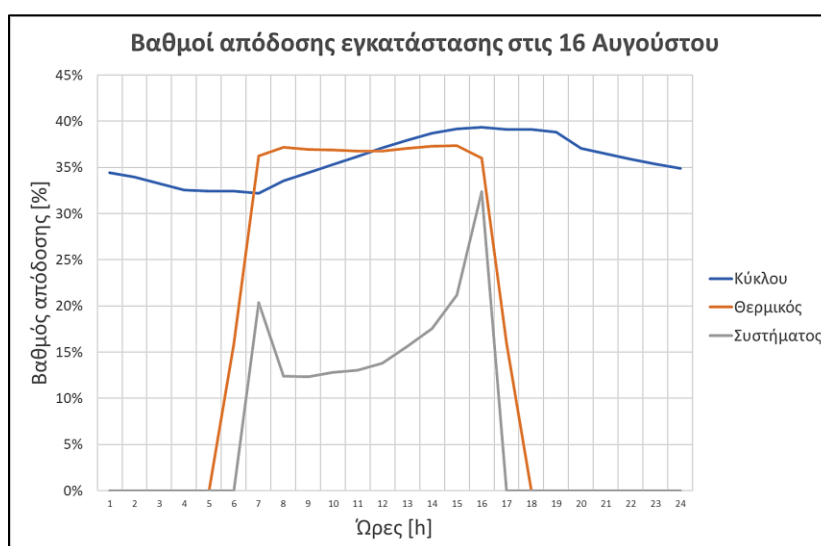
Σχήμα 23: Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του συστήματος για τρεις διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας

9.4.2 Βαθμοί απόδοσης εγκατάστασης

Οι μέσοι βαθμοί απόδοσης της εγκατάστασης υπολογίζονται με βάση τα ολοκληρώματα των καμπυλών ισχύος των εκάστοτε μεγεθών. Στην **Εικόνα 220** παρουσιάζονται οι μέσοι βαθμοί απόδοσης που χαρακτηρίζουν την εγκατάσταση. Πέραν αυτών, ενδιαφέρον υπάρχει και στον υπολογισμό της ωριαίας μεταβολής των χαρακτηριστικών βαθμών απόδοσης της εγκατάστασης. Στο **Σχήμα 24** παρουσιάζεται η μεταβολή των τριών βαθμών απόδοσης (θερμικού, κύκλου και συστήματος) κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του Μαΐου, ενώ στο **Σχήμα 25** παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για μια ημέρα του Αυγούστου [72].



Σχήμα 24: Ωριαία μεταβολή χαρακτηριστικών βαθμών απόδοσης της εγκατάστασης για μια τυπική ημέρα του Μαΐου

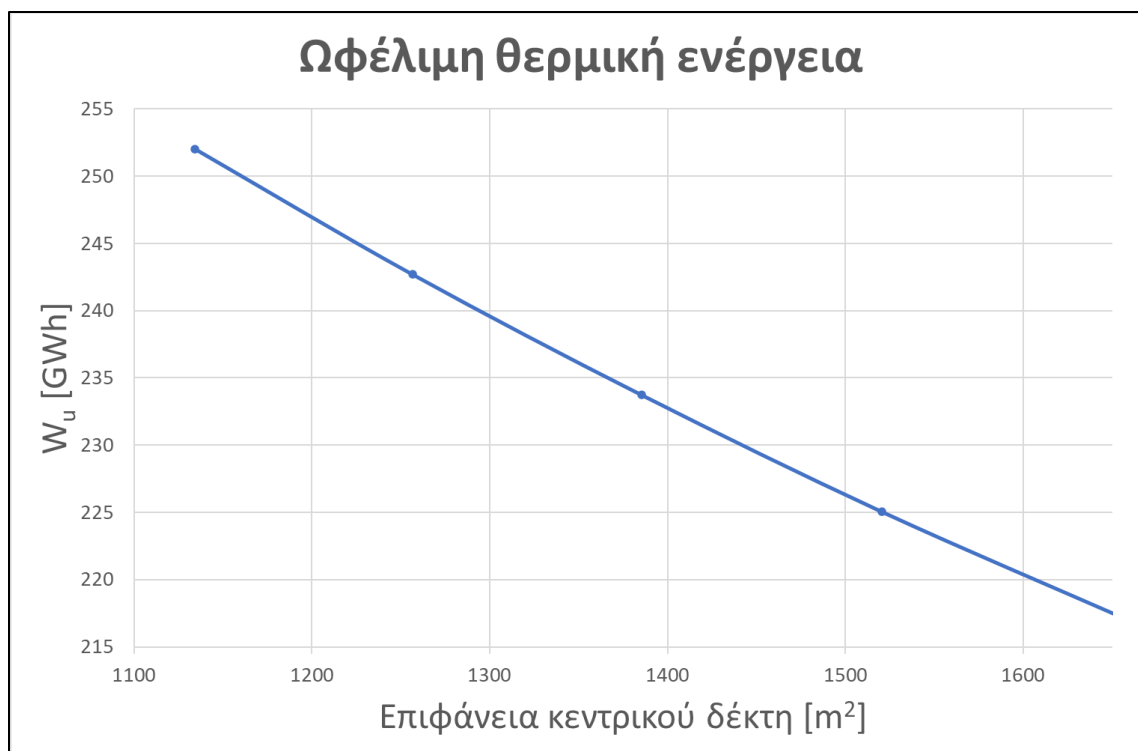


Σχήμα 25: Ωριαία μεταβολή χαρακτηριστικών βαθμών απόδοσης της εγκατάστασης για μια τυπική ημέρα του Αυγούστου

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος θα πρέπει να είναι ελαφρώς μικρότερος από το γινόμενο των βαθμών απόδοσης του θερμικού συστήματος με τον βαθμό απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 24**, αλλά και στο **Σχήμα 25**, η συσχέτιση αυτή δεν ισχύει για τις πρώτες και τις τελευταίες ώρες ηλιοφάνειας της ημέρας. Αντίθετα, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος παρουσιάζεται αυξημένος. Η ιδιαιτερότητα αυτή συμβαίνει εξαιτίας της ύπαρξης των δοχείων θερμικής αποθήκευσης, τα οποία αποθηκεύουν θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας και την αποδίδουν τη στιγμή που δεν υπάρχει υψηλή ηλιοφάνεια. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι μηδενικός αφού, όπως έχει εξηγηθεί κατά τη μοντελοποίηση του κεντρικού δέκτη, η ωφέλιμη ισχύς μηδενίζεται. Τέλος, κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας ο βαθμός απόδοσης του θερμοδυναμικού κύκλου αυξάνεται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του τηγμένου άλατος που οδηγεί στην αυξημένη πρόσδοση θερμότητας στον θερμοδυναμικό κύκλο μέσω του εναλλάκτη [82].

9.4.3 Παραμετρική μελέτη επιφάνειας κεντρικού δέκτη

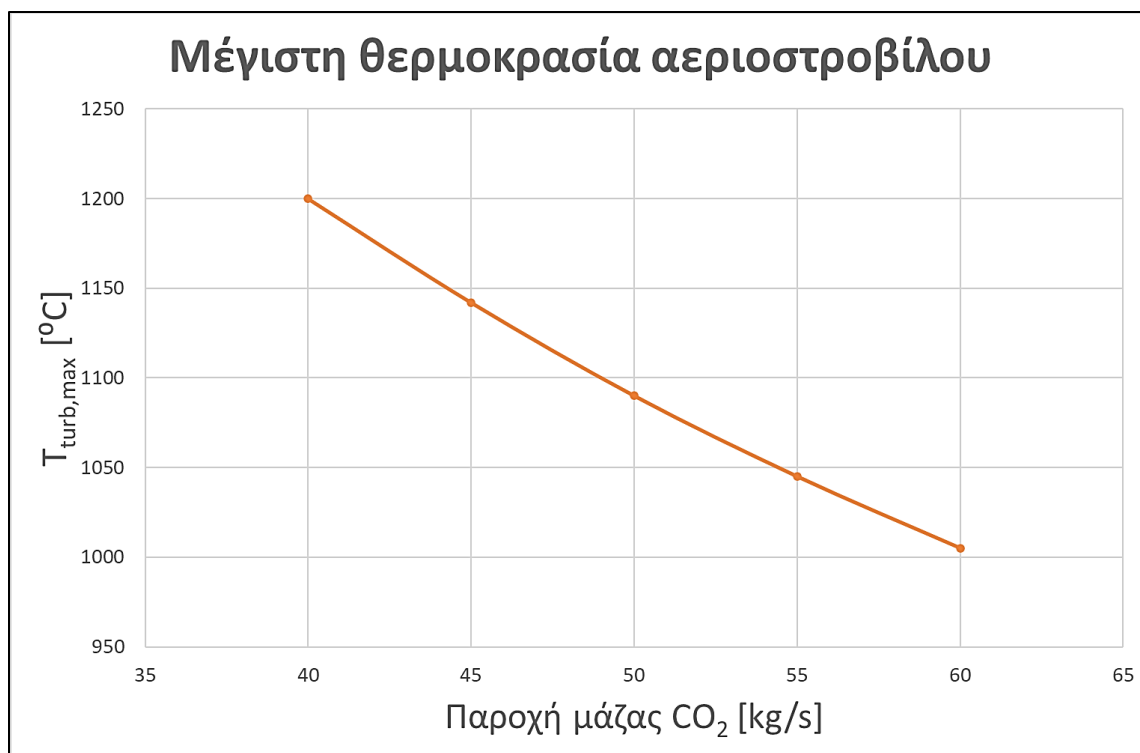
Η επιλογή της τελικής επιφάνειας του κεντρικού δέκτη αποτελεί μια κρίσιμη σχεδιαστική παράμετρο της εγκατάστασης. Η επιφάνεια είναι κυλινδρικού σχήματος, με τη συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον να είναι η παράπλευρη επιφάνεια. Αυξάνοντας την επιφάνεια του κεντρικού δέκτη, όσο και περισσότεροι ηλιοστάτες δύναται να εστιάζουν ταυτόχρονα σε αυτή με αποτέλεσμα η απορροφούμενη ηλιακή ισχύς να αυξάνεται. Όμως, ταυτόχρονα αυξάνονται και οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον αφού, τόσο οι απώλειες λόγω συναγωγής, όσο και οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι ευθέως ανάλογες της συλλεκτικής επιφάνειας. Επιπλέον, όσο η επιφάνεια του κεντρικού δέκτη μειώνεται, τόσο αυξάνεται η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία σε αυτόν με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του διακινούμενου τηγμένου άλατος. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των θερμικών απωλειών, αφού με τις απώλειες λόγω συναγωγής υπάρχει ευθέως ανάλογη συσχέτιση και με τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας η αναλογία είναι με την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας. Έτσι, οι πιο πάνω παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μια βέλτιστη επιφάνεια του κεντρικού δέκτη για κάθε εγκατάσταση. Στο **Σχήμα 26** παρουσιάζεται η μεταβολή της ωφέλιμης ισχύος του θερμικού συστήματος ως συνάρτηση του μεγέθους του κεντρικού δέκτη. Όπως φαίνεται από τη μορφή της καμπύλης, η ωφέλιμη ισχύς μειώνεται καθώς η παράπλευρη κυλινδρική επιφάνεια αυξάνεται. Το μέγεθος του κεντρικού δέκτη δεν μπορεί να γίνει οσοδήποτε μικρό διότι δεν θα εστιάζουν αρκετοί ηλιοστάτες σε αυτόν. Επιπρόσθετα, όσο το μέγεθος του κεντρικού δέκτη συρρικνώνεται και η θερμοκρασία του τηγμένου άλατος αυξάνεται, ταυτόχρονα η πυκνότητα του μειώνεται με αποτέλεσμα να καταλαμβάνει όσο και περισσότερο όγκο στο θερμό δοχείο, του οποίου το μέγεθος διατηρείται σταθερό στην παρούσα συσχέτιση επιφάνειας κεντρικού δέκτη με την ωφέλιμη ισχύ [47][82].



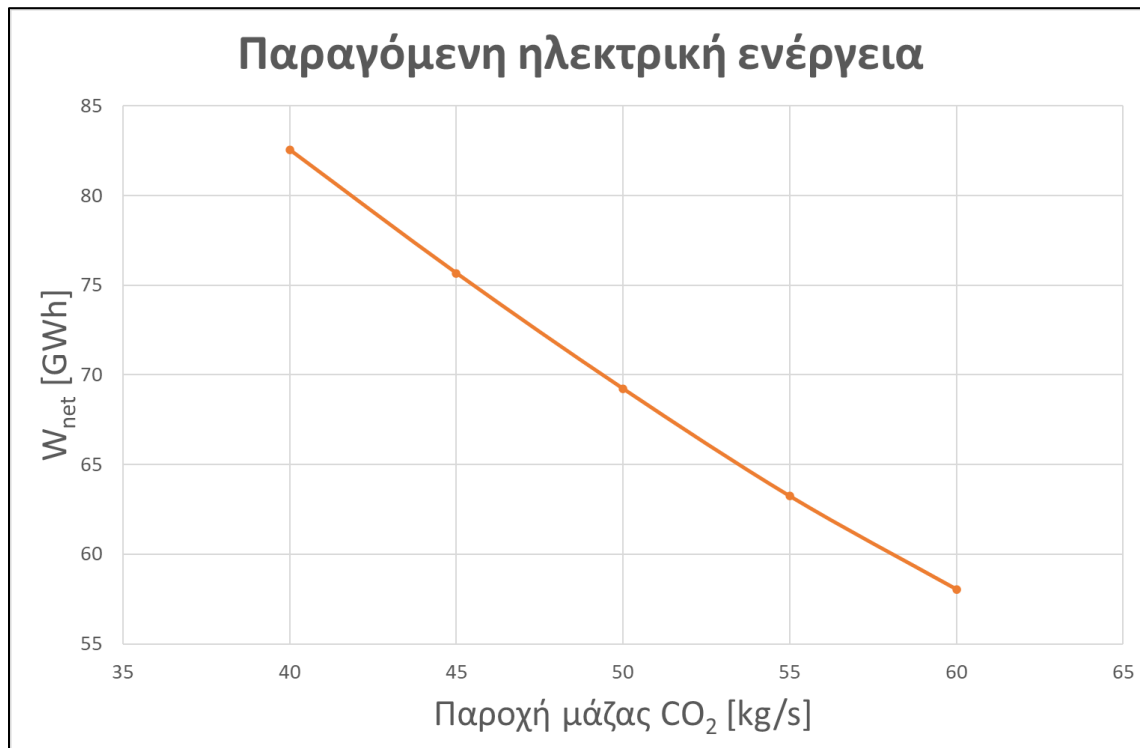
Σχήμα 26: Μεταβολή ωφέλιμης θερμικής ενέργειας του ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος ως συνάρτηση της κυλινδρικής παράπλευρης επιφάνειας του δέκτη

9.4.4. Παραμετρική μελέτη παροχής μάζας εργαζόμενου μέσου

Η παροχή μάζας του διοξειδίου του άνθρακα στον κύκλο Brayton θεωρείται σταθερή στην παρούσα εργασία. Αυτή, είναι μια παραδοχή η οποία θα μπορούσε να αναιρεθεί κάνοντας τον απαραίτητο έλεγχο για τη θερμοκρασία στην είσοδο του αεριοστροβίλου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η καθαρά παραγόμενη ισχύς θα είχε πάντα θετικό πρόσημο. Στην παρούσα εργασία η παροχή μάζας επιλέγεται σταθερή, τόση ώστε να εξασφαλίζεται αυτή η απαίτηση. Αυξάνοντας την παροχή μάζας θα αναμενόταν να αυξάνεται και η καθαρά παραγόμενη ισχύς του συστήματος αφού είναι μια παράμετρος ευθέως ανάλογη της μηχανικής ισχύος. Όμως, αυξάνοντας την παροχή μάζας αυξάνεται ταυτόχρονα και η καταναλισκόμενη ισχύς στο συμπιεστή του κύκλου Brayton, του οποίου επίσης η ισχύς είναι ευθέως ανάλογη της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η παροχή μάζας του κρύου ρευστού εντός του εναλλάκτη θερμότητας, η θερμοκρασία εξόδου του είναι μειωμένη σε σχέση με μικρότερες τιμές παροχής μάζας. Μειωμένη θερμοκρασία στην έξοδο του εναλλάκτη συνεπάγεται μειωμένη θερμοκρασία στην είσοδο του αεριοστροβίλου το οποίο σημαίνει μειωμένη ενθαλπία, μέγεθος το οποίο επίσης είναι ευθέως ανάλογο της μηχανικής ισχύος. Στο **Σχήμα 27** παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου του διοξειδίου του άνθρακα στον αεριοστροβίλο ως συνάρτηση της παροχής μάζας του, ενώ στο **Σχήμα 28** φαίνεται η μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος καθώς αυξάνεται η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου [65].



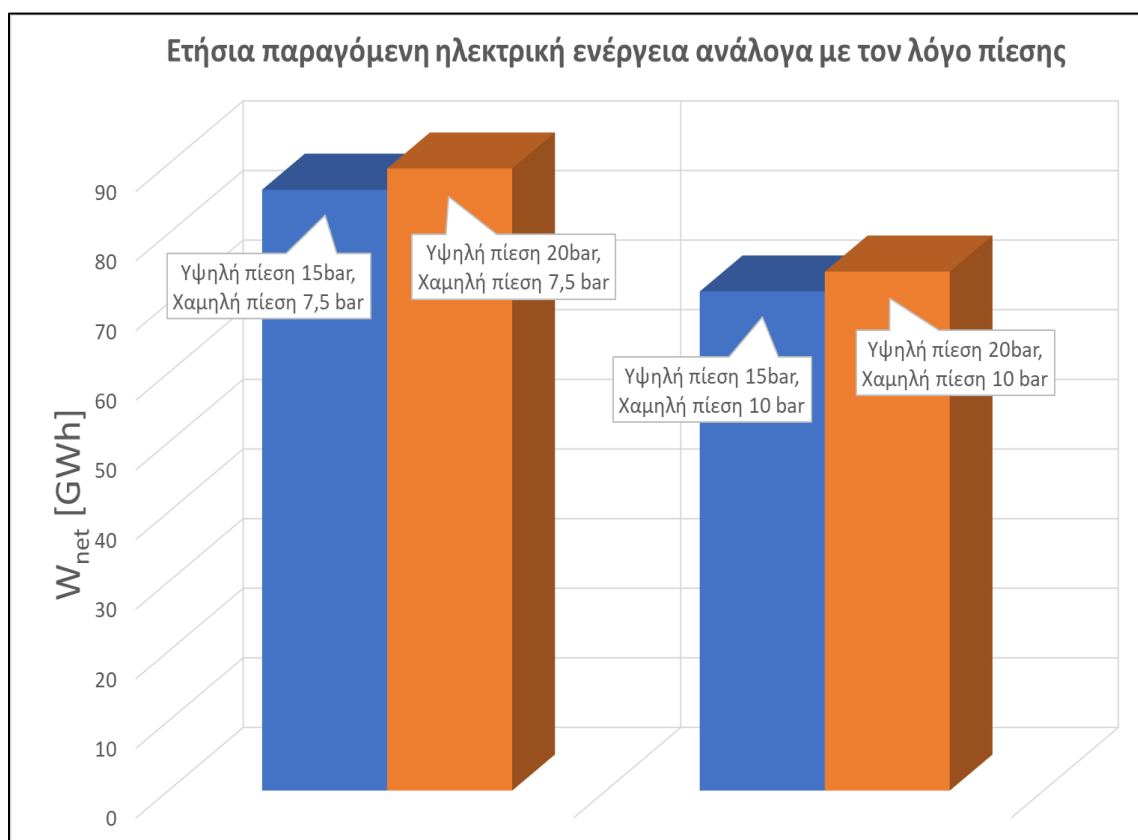
Σχήμα 27: Μεταβολή θερμοκρασίας στην είσοδο του αεριοστροβίλου ως συνάρτηση της παροχής μάζας του διοξειδίου του άνθρακα



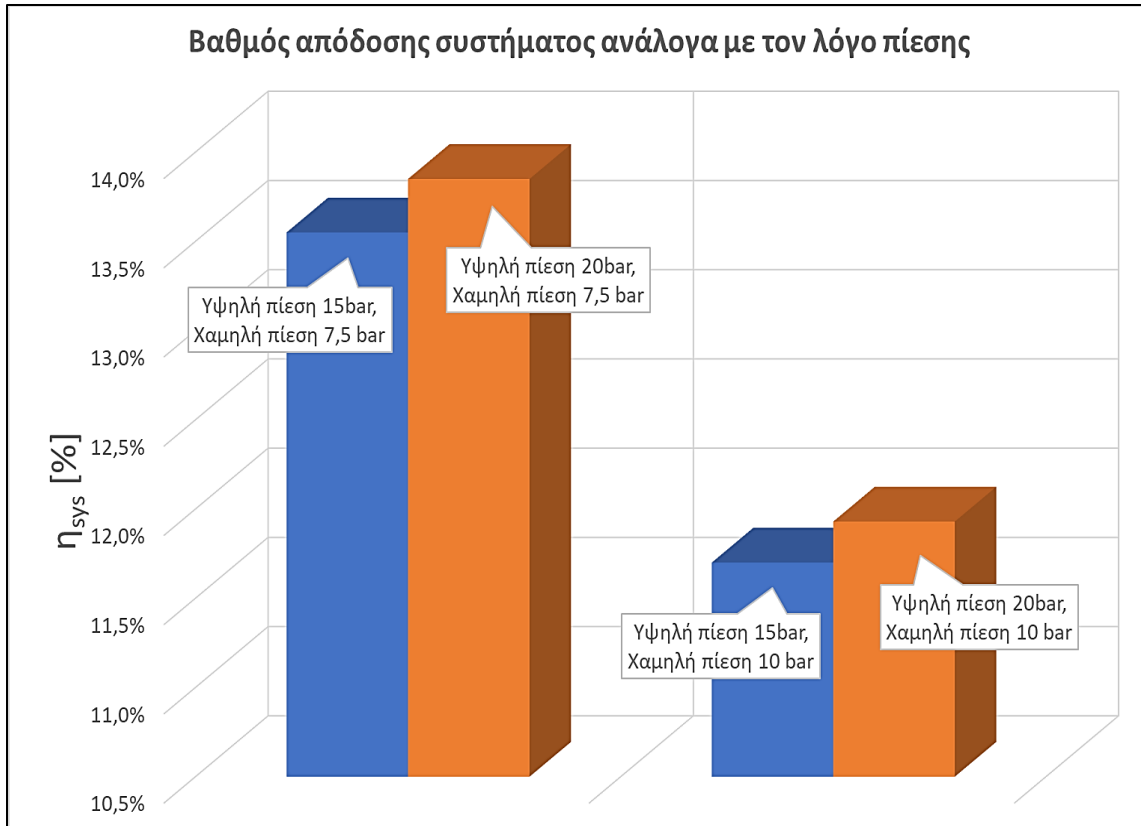
Σχήμα 28: Μεταβολή ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος ως συνάρτηση της παροχής μάζας του διοξειδίου του άνθρακα

9.4.5 Παραμετρική μελέτη λόγου πίεσης θερμοδυναμικού κύκλου

Ο λόγος πίεσης του θερμοδυναμικού κύκλου είναι ο λόγος μεταξύ της υψηλής πίεσης που αποκτά το εργαζόμενο μέσο στην έξοδο του συμπιεστή προς την χαμηλή πίεση που αποκτά στην έξοδο του στροβίλου. Αυξάνοντας τον λόγο πιέσεων αναμένεται και αύξηση στην αποδοτικότητα του κύκλου το οποίο οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Στο **Σχήμα 29** παρουσιάζεται η συσχέτιση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με τον λόγο πίεσης, ενώ στο **Σχήμα 30** παρουσιάζεται η αντίστοιχη συσχέτιση που αφορά τον μέσο βαθμό απόδοσης του συστήματος. Στα δύο αυτά σχήματα γίνεται σύγκριση για τέσσερις περιπτώσεις, δύο εκ των οποίων η χαμηλή πίεση επιλέγεται να είναι τα 7,5bar και άλλων δύο να είναι τα 10bar. Αντίστοιχα, η υψηλή πίεση επιλέγεται στη μία περίπτωση να είναι τα 15bar ενώ στη δεύτερη τα 20bar. Όπως φαίνεται στα δύο αυτά σχήματα, ο συνδυασμός της χαμηλότερης πίεσης (δηλαδή τα 7,5bar) με την υψηλότερη (δηλαδή τα 20bar) οδηγούν στον υψηλότερο βαθμό απόδοσης και σε μεγαλύτερη συνολική ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Οι τιμές αυτές ισχύουν για παροχή μάζας διοξειδίου του άνθρακα 35kg/s [65].



Σχήμα 29: Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς χαμηλής και υψηλής πίεσης του θερμοδυναμικού κύκλου



Σχήμα 30: Μέσος βαθμός απόδοσης του συστήματος για τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς χαμηλής και υψηλής πίεσης του θερμοδυναμικού κύκλου

10. Συμπεράσματα εργασίας

10.1 Αποτίμηση αποτελεσμάτων

Η γλώσσα προγραμματισμού Modelica προσφέρει σημαντικές δυνατότητες στην επίλυση διάφορων μοντέλων. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι η επίλυση γραμμικών και μη γραμμικών συστημάτων πολλών μεταβλητών με μεγάλη ακρίβεια χωρίς να είναι απαραίτητη η γραμμικοποίηση τους από τον χρήστη. Επίσης, επιλύει συστήματα διαφορικών εξισώσεων, γεγονός που επιτρέπει τη μοντελοποίηση και την επίλυση δυναμικών συστημάτων. Επιπρόσθετα, λόγω του ότι είναι μια αντικειμενοστραφής γλώσσα, επιτρέπει το διαχωρισμό της διαδικασίας μοντελοποίησης ενός συστήματος το οποίο δίνει τη δυνατότητα παράλληλης ανάπτυξης μοντέλων του ίδιου συστήματος. Τέλος, δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης πιο γενικών μοντέλων, τα οποία θα μπορούσαν με μερικές τροποποιήσεις να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών. Το λογισμικό Dymola είναι ένα περιβάλλον στο οποίο μπορεί να αναπτυχθεί κώδικας σε γλώσσα Modelica και εντέλει να προσομοιωθούν μοντέλα στηριζόμενα σε αυτήν, οδηγώντας στην επίλυση δυναμικών συστημάτων. Στο λογισμικό Dymola υπάρχουν πάρα πολλές έτοιμες βιβλιοθήκες, κάποιες εκ των οποίων έχουν αναπτυχθεί από χρήστες του λογισμικού. Για την καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του λογισμικού προτείνεται η χρήση έτοιμων βιβλιοθηκών, αφού όμως πρώτα ελεγχθεί ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των επιμέρους μοντέλων δεν οδηγούν σε απαράδεκτες λύσεις. Έχοντας όμως γνώση της γλώσσας Modelica, αυτό επιτρέπει την τροποποίηση έτοιμων μοντέλων έτσι ώστε να εξυπηρετούν την εκάστοτε μοντελοποίηση. Μεγάλη σημασία θα πρέπει να δίνεται στον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ των μοντέλων ως προς το ποιες πληροφορίες συναλλάσσουν και τον τρόπο που αυτά επικοινωνούν [67][68].

Το θερμικό ηλιακό σύστημα με ηλιακό πύργο παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα. Η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο κύκλωμα του τηγμένου άλατος επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας στο εργαζόμενο μέσο του θερμοδυναμικού κύκλου με τον οποίο συνεργάζεται. Αυτό, οδηγεί σε μεγάλη ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Επιπλέον, η χρήση των δοχείων αποθήκευσης του άλατος δίνουν τη δυνατότητα λειτουργίας της εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η εγκατάσταση θα μπορούσε να λειτουργεί μόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας, καλύπτοντας το φορτίο βάσης της νύχτας σε μια γεωγραφική περιοχή. Σε περιοχές που παρατηρείται παρατεταμένη νέφωση, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος η θερμοκρασία του τηγμένου άλατος να πέσει κάτω από το σημείο τήξης, δημιουργώντας σοβαρά λειτουργικά προβλήματα στην εγκατάσταση. Ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης είναι μικρότερος από άλλες συμβατικές μονάδες, όπως είναι αυτές του φυσικού αερίου, αλλά λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος την καθιστά ως μια ελκυστική λύση, ιδιαίτερα σε περιοχές αυξημένης ηλιοφάνειας και υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Βασικό μειονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί η μεγάλη έκταση γης η οποία δεσμεύεται λόγω του γηπέδου των ηλιοστατών. Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο κάθε ηλιοστάτης μοντελοποιείται ξεχωριστά, ανάλογα με τη θέση του στο γήπεδο αλλά και τη θέση του

ως προς τη θέση του ηλίου κατά τη διάρκεια του έτους. Στο βόρειο ημισφαίριο, οι ηλιοστάτες που βρίσκονται βόρεια του ηλιακού πύργου παρουσιάζουν υψηλότερη αποδοτικότητα λόγω της μικρότερης γωνίας πρόσπτωσης [44].

Το διοξείδιο του άνθρακα φαίνεται να είναι ένα αξιόλογο εργαζόμενο μέσο για κλειστούς θερμοδυναμικούς κύκλους, όπως είναι ο κύκλος Brayton. Το χαμηλό κρίσιμο σημείο του επιτρέπει την εύκολη μετάβαση σε υπερκρίσιμη κατάσταση, αποφεύγοντας λειτουργικά προβλήματα που οφείλονται στην αλλαγή φάσης ενός εργαζόμενου μέσου. Επιπλέον, σε υψηλές θερμοκρασίες συμπεριφέρεται ως τέλειο αέριο, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά τη χημική και θερμοδυναμική ανάλυση του. Επιπρόσθετα, ο αεριοστρόβιλος που απαιτείται για την εκτόνωση του είναι πολύ μικρότερου μεγέθους συγκριτικά με άλλα εργαζόμενα μέσα όπως είναι το νερό. Ο κύκλος Brayton είναι ο ιδανικός κύκλος για μεταβαλλόμενα φορτία. Λαμβάνοντας υπόψη την έντονη διακύμανση της ακτινοβολίας, τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και κατά τη διάρκεια του έτους, ο κύκλος Brayton αποτελεί την ιδανική λύση για μια εγκατάσταση ηλιακού πύργου [65][66].

Ο μέσος βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης ανέρχεται στο 14% όταν ο λόγος πίεσης του κύκλου Brayton είναι μέγιστος, δηλαδή η χαμηλή πίεση είναι στα 7,5bar και η υψηλή πίεση στα 20bar. Η διαφορά από τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης για υψηλή πίεση 10bar είναι δύο ποσοστιαίες μονάδες. Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μεγιστοποιείται αν το σύστημα εγκατασταθεί στο Ηράκλειο της Κρήτης και φτάνει στις 66,5GWh, αφού η διαθέσιμη ηλιακή ισχύς λόγω ηλιακής ακτινοβολίας είναι αυξημένη σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές της Ελλάδας.

10.2. Μελλοντική εργασία

Η ηλιακή ενέργεια αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό μείγμα του μέλλοντος. Επομένως, η μελλοντική ενασχόληση με θέματα που αφορούν τα συγκεκριμένα ηλιακά συστήματα κρίνεται ουσιαστική. Επιπλέον, οι μεγάλες δυνατότητες της γλώσσας προγραμματισμού Modelica προσφέρουν σημαντικές λύσεις στη διαδικασία μοντελοποίησης τέτοιων συστημάτων, αλλά και ευρύτερα συστημάτων από διάφορους τομείς. Μια επιλογή για τη συνέχιση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήταν η περαιτέρω ανάπτυξη των επιμέρους μοντέλων, έτσι ώστε να γίνουν πιο λεπτομερή και να προσομοιάζουν καλύτερα την πραγματική εγκατάσταση. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσε να προστεθεί επιπλέον έλεγχος που θα αφορά την παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου αλλά και η δοκιμή εναλλακτικών επιλογών των χρησιμοποιούμενων ρευστών, τόσο του εργαζόμενου μέσου όσο και του τηγμένου άλατος. Μια δεύτερη επιλογή είναι η ανάπτυξη αντίστοιχου μοντέλου χρησιμοποιώντας έτοιμες βιβλιοθήκες του λογισμικού Dymola. Μια άλλη βελτίωση θα αποτελούσε η μοντελοποίηση των ηλιοστατών ανάλογα με τη θέση τους στο γήπεδο. Τέλος, θα μπορούσε να τροποποιηθεί ο τρόπος λειτουργίας της εγκατάστασης έτσι ώστε να παράγεται ηλεκτρική ισχύ μόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ κατά τη διάρκεια της ημέρας η λειτουργία του μοντέλου του συστήματος θα εστιάζει στη φόρτιση του θερμού δοχείου.

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Μεταβλητές συστήματος εξισώσεων θερμοροών ηλιακού πύργου.....	56
Πίνακας 2: Ιδιότητες τηγμένων αλάτων.....	59
Πίνακας 3: Ιδιότητες χημικών ουσιών και ενώσεων.....	74
Πίνακας 4: Είδη κλάσεων στη γλώσσα Modelica.....	109
Πίνακας 5: Λέξεις-κλειδιά στη γλώσσα Modelica (Modelica keywords).....	110
Πίνακας 6: Είδη μεταβλητών στη γλώσσα Modelica.....	113
Πίνακας 7: Γνωρίσματα μεταβλητών στη γλώσσα Modelica.....	114
Πίνακας 8: Βασικοί τύποι στη γλώσσα Modelica.....	115
Πίνακας 9: Είδη εξισώσεων στη γλώσσα Modelica.....	116
Πίνακας 10: Σταθερές υπολογισμού ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση διοξειδίου του άνθρακα.....	144

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ηλεκτρικής ενέργειας.....	11
Σχήμα 2: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα με βάση το καύσιμο ή τον τύπο της βιομηχανίας.....	12
Σχήμα 3: Διακύμανση παγκόσμιας μέσης τιμής της θερμοκρασίας με βάση τον μέσο όρο των ετών 1850 μέχρι 1900.....	12
Σχήμα 4: Παγκόσμιες επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανά τεχνολογία.....	13
Σχήμα 5: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές που στηρίζονται στην ηλιακή ενέργεια.....	13
Σχήμα 6: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας.....	34
Σχήμα 7: Λογικό διάγραμμα υπολογισμών θερμορών συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος ηλιακού πύργου.....	57
Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση αντικειμενοστραφής μοντελοποίησης (object-oriented modelling).....	87
Σχήμα 9: Ισοδύναμες μορφές εξίσωσης για μοντελοποίηση βασισμένη σε εξισώσεις.....	88
Σχήμα 10: Σύγκριση μεταβλητών συνεχούς (A) και διακριτού (B) χρόνου.....	89
Σχήμα 11: Δημιουργία ‘instance’ σε γλώσσα Modelica.....	112
Σχήμα 12: Διατύπωση ‘if-clause’ σε γλώσσα Modelica.....	118
Σχήμα 13: Διατύπωση ‘while-clause’ και ‘for-clause’ σε γλώσσα Modelica.....	118
Σχήμα 14: Διατύπωση ‘when-clause’ σε γλώσσα Modelica.....	118
Σχήμα 15: Διατύπωση εξίσωσης ‘connect’ σε γλώσσα Modelica.....	122
Σχήμα 16: Διατύπωση εξίσωσης αλγορίθμου (algorithm) σε γλώσσα Modelica.....	125
Σχήμα 17: Διατύπωση συνάρτησης (function) στη γλώσσα Modelica.....	126
Σχήμα 18: Μεταβολή ενθαλπίας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας υπό σταθερή πίεση 7,5MPa για το διοξείδιο του άνθρακα.....	146
Σχήμα 19: Μεταβολή ενθαλπίας ως συνάρτηση της εντροπίας υπό σταθερή πίεση 7,5MPa για το διοξείδιο του άνθρακα.....	146
Σχήμα 20: Μεταβολή εντροπίας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας υπό σταθερή πίεση 7,5MPa για το διοξείδιο του άνθρακα.....	147
Σχήμα 21: Μεταβολή θερμοκρασίας ως συνάρτηση της ενθαλπίας υπό σταθερή πίεση 7,5MPa για το διοξείδιο του άνθρακα.....	147
Σχήμα 22: Χρονική μεταβολή παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος για τρεις διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες της Ελλάδας στο λογισμικό Dymola.....	208
Σχήμα 23: Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του συστήματος για τρεις διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας.....	208
Σχήμα 24: Ωριαία μεταβολή χαρακτηριστικών βαθμών απόδοσης της εγκατάστασης για μια τυπική ημέρα του Μαΐου.....	209
Σχήμα 25: Ωριαία μεταβολή χαρακτηριστικών βαθμών απόδοσης της εγκατάστασης για μια τυπική ημέρα του Αυγούστου.....	209
Σχήμα 26: Μεταβολή ωφέλιμης θερμικής ενέργειας του ηλιακού συγκεντρωτικού συστήματος ως συνάρτηση της κυλινδρικής παράπλευρης επιφάνειας του δέκτη.....	211

Σχήμα 27: Μεταβολή θερμοκρασίας στην είσοδο του αεριοστροβίλου ως συνάρτηση της παροχής μάζας του διοξειδίου του άνθρακα.....	212
Σχήμα 28: Μεταβολή ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος ως συνάρτηση της παροχής μάζας του διοξειδίου του άνθρακα.....	212
Σχήμα 29: Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς χαμηλής και υψηλής πίεσης του θερμοδυναμικού κύκλου.....	213
Σχήμα 30: Μέσος βαθμός απόδοσης του συστήματος για τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς χαμηλής και υψηλής πίεσης του θερμοδυναμικού κύκλου.....	214

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Βιώσιμοι αναπτυξιακοί στόχοι του ΟΗΕ.....	15
Εικόνα 2: Οι κατηγορίες ΑΠΕ με τη μεγαλύτερη εφαρμογή.....	17
Εικόνα 3: Συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	18
Εικόνα 4: Συστοιχία παραβολικών συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.....	19
Εικόνα 5: Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες σε οροφή οικίας.....	19
Εικόνα 6: Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με τρία πτερύγια.....	20
Εικόνα 7: Υπεράκτιο αιολικό πάρκο.....	21
Εικόνα 8: Μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο.....	22
Εικόνα 9: Σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με χρήση βιομάζας.....	23
Εικόνα 10: Σύστημα εκμετάλλευσης γεωθερμίας.....	23
Εικόνα 11: Τεχνολογία εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας.....	24
Εικόνα 12: Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ως προς την καταναλισκόμενη ενέργεια για τις χώρες μέλη της ΕΕ το 2020.....	25
Εικόνα 13: Ποσοστό συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από ΑΠΕ για τις χώρες μέλη της ΕΕ το 2021.....	25
Εικόνα 14: Ποσοστό και είδος κυρίαρχης πηγής παραγωγής ενέργειας σε χώρες της Ευρώπης.....	26
Εικόνα 15: Ενεργειακό μείγμα 10 χωρών της Ευρώπης το 2050 στο σενάριο που ολοκληρω το ενεργειακό τους μείγμα αποτελείται αποκλειστικά από ΑΠΕ.....	27
Εικόνα 16: Ποσοστό των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα των ΗΠΑ το 2050.....	28
Εικόνα 17: Φωτοβολταϊκό σύστημα «Sunflower».....	30
Εικόνα 18: Σφαιρικός συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης.....	32
Εικόνα 19: Απόσταση γης-ηλίου σε αστρονομικές μονάδες ($1\text{au}=149.597.871\text{km}$).....	33
Εικόνα 20: Ηλιακές γωνίες ηλίου και συλλεκτικής επιφάνειας.....	35
Εικόνα 21: Γεωγραφικό μήκος λ (Longitude) και γεωγραφικό πλάτος φ (latitude).....	36
Εικόνα 22: Σχηματική αναπαράσταση ωριαίας γωνίας.....	37
Εικόνα 23: Συνιστώσες ακτινοβολίας, άμεση (beam), διάχυτη (diffuse) και ανακλώμενη (albedo).....	39
Εικόνα 24: Πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου στην επιφάνεια της γης ανά το παγκόσμιο.....	43
Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση κοίλου παραβολικού συλλέκτη (PTC).....	45
Εικόνα 26: Κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά PTC σχεδιασμένου στο λογισμικό Solidworks 2021.....	46
Εικόνα 27: Σχηματική διάταξη τυπικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής με χρήση PTCs.....	48
Εικόνα 28: Σχηματική αναπαράσταση ηλιακού συλλέκτη Fresnel.....	48
Εικόνα 29: Σχηματική διάταξη τυπικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής με χρήση συλλέκτη Fresnel.....	49
Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση παραβολοειδούς ηλιακού συλλέκτη.....	49
Εικόνα 31: Σχηματική διάταξη τυπικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής με χρήση παραβολοειδούς ηλιακού συλλέκτη.....	50

Εικόνα 32: Σχηματική αναπαράσταση ηλιακού συγκεντρωτή κεντρικού δέκτη.....	51
Εικόνα 33: Σχηματική διάταξη τυπικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ηλιακού πύργου.....	51
Εικόνα 34: Επίδραση γωνίας πρόσπτωσης στην αποδοτικότητα των ηλιοστατών.....	52
Εικόνα 35: Σχηματική απεικόνιση θερμοροών συγκεντρωτικού ηλιακού συστήματος ηλιακού πύργου.....	54
Εικόνα 36: Σχηματική απεικόνιση θερμοροών δεξαμενής αποθήκευσης τηγμένου αλάτος.....	60
Εικόνα 37: Αναστρέψιμη μηχανή Carnot. Η δεξιόστροφη ροή (συνεχή και γεμάτα βέλη) αντιστοιχεί στην εργοπαραγωγό μηχανή Carnot (heat engine) ενώ η αριστερόστροφη ροή (διακεκομμένα και λευκά βέλη) στη ψυκτική μηχανή Carnot (refrigerator).....	64
Εικόνα 38: Θερμοδυναμικός κύκλος Carnot. Αριστερά, το διάγραμμα μεταβολών πίεσης-όγκου και δεξιά το διάγραμμα μεταβολών θερμοκρασίας-εντροπίας.....	65
Εικόνα 39: Ιδανικός κύκλος Clausius-Rankine. Αριστερά, η σχηματική απεικόνιση ενός απλού κύκλου και δεξιά το διάγραμμα μεταβολών θερμοκρασίας-εντροπίας του.....	66
Εικόνα 40: Θερμοδυναμικός κύκλος Stirling. Αριστερά το διάγραμμα πίεσης-όγκου και δεξιά, το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας.....	66
Εικόνα 41: Θερμοδυναμικός κύκλος Ericsson. Αριστερά, το διάγραμμα πίεσης-όγκου και δεξιά, το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας.....	67
Εικόνα 42: Θερμοδυναμικός κύκλος Kalina.....	67
Εικόνα 43: Σχηματικά διαγράμματα θερμοδυναμικών κύκλων Joule (αριστερά) και Brayton (δεξιά).....	68
Εικόνα 44: Διαγράμματα πίεσης-όγκου (αριστερά) και θερμοκρασίας-εντροπίας (δεξιά) θερμοδυναμικού κύκλου Brayton.....	69
Εικόνα 45: Σύνθετη σχηματική διάταξη θερμοδυναμικού κύκλου Joule-Brayton.....	70
Εικόνα 46: Σχηματική διάταξη θερμοδυναμικού κύκλου Joule με αναγέννηση.....	71
Εικόνα 47: Διαγράμματα πίεσης-όγκου (αριστερά) και θερμοκρασίας-εντροπίας (δεξιά) θερμοδυναμικού κύκλου Joule με αναγέννηση.....	71
Εικόνα 48: Σχηματική διάταξη κλειστού θερμοδυναμικού κύκλου Brayton με πολυβάθμια συμπίεση και εκτόνωση, αναγέννηση, ενδιάμεση ψύξη και ψύξη πριν τον συμπιεστή....	72
Εικόνα 49: Κρίσιμο σημείο καθαρής ουσίας σε διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας.....	74
Εικόνα 50: Διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας διοξειδίου του άνθρακα.....	76
Εικόνα 51: Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας διοξειδίου του άνθρακα.....	76
Εικόνα 52: Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ως συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας για το διοξείδιο του άνθρακα.....	77
Εικόνα 53: Σύγκριση θερμοδυναμικών μεγεθών μεταξύ πραγματικού και τελείου αερίου διοξειδίου του άνθρακα σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση (πάνω αριστερά), του δυναμικού ιξώδους (πάνω δεξιά), της θερμικής αγωγιμότητας (κάτω αριστερά) και του αριθμού Prandtl (κάτω δεξιά).....	78
Εικόνα 54: Σύγκριση μεγέθους στροβίλου για εργαζόμενο μέσο ατμό (steam), ήλιο (helium) και υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα (SCO ₂).....	79
Εικόνα 55: Θερμοκρασιακό προφίλ πηγής θερμότητας ως προς καθαρή ουσία (a), ζεοτροπικό ρευστό (b) και υπερκρίσιμο ρευστό (c).....	79

Εικόνα 56: Πιθανοί θερμοδυναμικοί κύκλοι διοξειδίου του άνθρακα σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας.....	80
Εικόνα 57: Σύγκριση βαθμού απόδοσης υπερκρίσιμου κύκλου Brayton με άλλους θερμοδυναμικούς κύκλους για διάφορες θερμοκρασίες της πηγής πρόσδοσης θερμότητας....	81
Εικόνα 58: Μεταβολή του γινομένου του βαθμού απόδοσης (η) και του ειδικού τεχνικού έργου (w) ως προς τον λόγο πίεσης (ρ) και θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο (T_1) 400°C, για τρεις διαφορετικές πιέσεις εισόδου σε αυτόν (P_1) με και χωρίς τη χρήση αναγεννητή.....	82
Εικόνα 59: Τροποποιημένες διατάξεις υπερκρίσιμου κύκλου Brayton.....	83
Εικόνα 60: Σχηματικό διάγραμμα υπερκρίσιμου θερμοδυναμικού κύκλου Brayton με αναγεννητή και πηγή θερμότητας ηλιακό συγκεντρωτικό σύστημα.....	84
Εικόνα 61: Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας υπερκρίσιμου θερμοδυναμικού κύκλου Brayton που λειτουργεί κοντά στο κρίσιμο σημείο.....	84
Εικόνα 62: Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης ηλιακού πύργου σε συνδυασμό με υπερκρίσιμο θερμοδυναμικό κύκλο Brayton.....	85
Εικόνα 63: Παραστατική απεικόνιση εγκατάστασης ηλιακού πύργου σε συνδυασμό με υπερκρίσιμο θερμοδυναμικό κύκλο Brayton.....	85
Εικόνα 64: Ιστότοπος «Modelica Association».....	90
Εικόνα 65: Ιστότοπος για λήψη του λογισμικού OpenModelica.....	91
Εικόνα 66: Το περιβάλλον του λογισμικού OpenModelica (OMEdit).....	91
Εικόνα 67: Λήψη και εγκατάσταση της βιβλιοθήκης «Modelica Standard Library» στο λογισμικό OpenModelica.....	92
Εικόνα 68: Φόρτωση της βιβλιοθήκης «Modelica Standard Library» στο λογισμικό OpenModelica.....	92
Εικόνα 69: Δημιουργία νέου μοντέλου (new model) στο λογισμικό OpenModelica.....	93
Εικόνα 70: Προβολή διαγράμματος (Diagram view) του λογισμικού OpenModelica.....	93
Εικόνα 71: Προβολή κειμένου (Text view) του λογισμικού OpenModelica.....	95
Εικόνα 72: Επιτυχής έλεγχος μοντέλου (Check Model) στο λογισμικό OpenModelica.....	95
Εικόνα 73: Εντολή προσομοίωσης (Simulate) στο λογισμικό OpenModelica.....	95
Εικόνα 74: Αποτέλεσμα προσομοίωσης (Plotting) στο λογισμικό OpenModelica.....	96
Εικόνα 75: Καρτέλα γραφικών (Graphics) του λογισμικού Dymola.....	97
Εικόνα 76: Καρτέλα πληροφοριών (Documentation) του λογισμικού Dymola.....	97
Εικόνα 77: Καρτέλα κειμένου (Text) του λογισμικού Dymola.....	98
Εικόνα 78: Καρτέλα προσομοίωσης (Simulation) του λογισμικού Dymola.....	98
Εικόνα 79: Καρτέλα εργαλείων (Tools) του λογισμικού Dymola.....	99
Εικόνα 80: Βασική βιβλιοθήκη «Modelica» (Modelica Standard Library).....	100
Εικόνα 81: Υπάρχουσες βιβλιοθήκες στο λογισμικό Dymola.....	100
Εικόνα 82: Βιβλιοθήκη «ThermalSystems» στο λογισμικό Dymola.....	101
Εικόνα 83: Διαθέσιμες βιβλιοθήκες που αναπτύχθηκαν από άλλους χρήστες.....	102
Εικόνα 84: Λήψη βιβλιοθήκης μέσω του ιστότοπου «GitHub».....	102
Εικόνα 85: Αποσυμπίεση και εγκατάσταση βιβλιοθήκης στον υπολογιστή.....	103
Εικόνα 86: Εντολές φόρτωσης βιβλιοθήκης στο λογισμικό Dymola.....	103
Εικόνα 87: Φόρτωση βιβλιοθήκης από τον υπολογιστή στο λογισμικό Dymola.....	104
Εικόνα 88: Βιβλιοθήκη «PhotoVoltaics» στο λογισμικό Dymola.....	104

Εικόνα 89: Εισαγωγή βιβλιοθηκών σε κώδικα γλώσσας Modelica.....	105
Εικόνα 90: Εισαγωγή αντικειμένου βιβλιοθήκης στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Dymola.....	106
Εικόνα 91: Εισαγωγή αντικειμένου μέσω εντολής της γλώσσας Modelica.....	106
Εικόνα 92: Καρτέλα πληροφοριών αντικειμένου στο λογισμικό Dymola.....	107
Εικόνα 93: Σύνδεση αντικειμένων στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Dymola....	107
Εικόνα 94: Διαγραφή βιβλιοθήκης από το λογισμικό Dymola.....	108
Εικόνα 95: Δημιουργία κλάσης (class) στο λογισμικό Dymola.....	109
Εικόνα 96: Δημιουργία νέου μοντέλου στο λογισμικό Dymola.....	111
Εικόνα 97: Τοποθέτηση μοντέλου σε βιβλιοθήκη (Insert in package) στο λογισμικό Dymola.....	111
Εικόνα 98: Δημιουργία μεταβλητών στο λογισμικό Dymola.....	113
Εικόνα 99: Δήλωση γνωρισμάτων (attributes) των μεταβλητών στο περιβάλλον Dymola.....	114
Εικόνα 100: Δημιουργία καινούριου τύπου (type) στο λογισμικό Dymola.....	115
Εικόνα 101: Διατύπωση παραδείγματος προβλήματος μόνιμων συνθηκών στο περιβάλλον Dymola.....	117
Εικόνα 102: Διατύπωση παραδείγματος προβλήματος μη μόνιμων συνθηκών στο περιβάλλον Dymola.....	119
Εικόνα 103: Ρυθμίσεις προσομοίωσης (Simulation Setup) στο λογισμικό Dymola.....	120
Εικόνα 104: Επιτυχής προσομοίωση (SUCCESSFULL Simulation) στο λογισμικό Dymola.....	120
Εικόνα 105: Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων στο λογισμικό Dymola.....	121
Εικόνα 106: Σύγκριση μεταβλητών τύπου ‘across’ (u _i) και τύπου ‘threw’ (i _i).....	122
Εικόνα 107: Δημιουργία συνδέσμου (connector) στο λογισμικό Dymola.....	123
Εικόνα 108: Μοντέλο αντικειμένου «Sun_test» με σύνδεσμο στο λογισμικό Dymola....	123
Εικόνα 109: Μοντέλο αντικειμένου «Collector_test» με σύνδεσμο στο λογισμικό Dymola.....	124
Εικόνα 110: Μοντέλο σύνδεσης δύο αντικειμένων στο λογισμικό Dymola.....	124
Εικόνα 111: Προσομοίωση και ενδεικτικά αποτελέσματα μοντέλου σύνδεσης δύο αντικειμένων στο λογισμικό Dymola.....	125
Εικόνα 112: Παράδειγμα διατύπωσης αλγοριθμικής εξίσωσης στο λογισμικό Dymola..	126
Εικόνα 113: Επιλογή θέσης εργασίας (working directory) στο λογισμικό Dymola.....	127
Εικόνα 114: Δημιουργία κεντρικής βιβλιοθήκης στο λογισμικό Dymola.....	128
Εικόνα 115: Εισαγωγή μοντέλου μέσα σε ένα προϋπάρχον μοντέλο στο λογισμικό Dymola.....	129
Εικόνα 116: Δημιουργία απαραίτητων βιβλιοθηκών για τη μοντελοποίηση του συστήματος στο λογισμικό Dymola.....	129
Εικόνα 117: Προβολή κειμένου της βασικής βιβλιοθήκης του συστήματος «Solar_Thermal_SCO2_STP_Brayton» στο λογισμικό Dymola.....	130
Εικόνα 118: Προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Connectors» στο λογισμικό Dymola...	131
Εικόνα 119: Προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Connectors» στο λογισμικό Dymola.....	131
Εικόνα 120: Προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Functions» στο λογισμικό Dymola....	132

Εικόνα 121: Προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Functions» στο λογισμικό Dymola.....	132
Εικόνα 122: Προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Examples» στο λογισμικό Dymola.....	133
Εικόνα 123: Προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Examples» στο λογισμικό Dymola..	133
Εικόνα 124: Παράθυρο εργαλείου 'Text' της καρτέλας γραφικών στο λογισμικό Dymola.....	134
Εικόνα 125: Προβολή εικόνας της βιβλιοθήκης «Components» στο λογισμικό Dymola.....	134
Εικόνα 126: Προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Components» στο λογισμικό Dymola.....	135
Εικόνα 127: Εισαγωγή ενός μοντέλου μέσα σε μια προϋπάρχουσα βιβλιοθήκη στο λογισμικό Dymola.....	136
Εικόνα 128: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Power» στο λογισμικό Dymola.....	137
Εικόνα 129: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Power» στο λογισμικό Dymola.....	137
Εικόνα 130: Ρύθμιση εμφάνισης ονόματος μοντέλου στο εικονίδιο του στο λογισμικό Dymola.....	138
Εικόνα 131: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Heat» στο λογισμικό Dymola.....	138
Εικόνα 132: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Heat» στο λογισμικό Dymola.....	139
Εικόνα 133: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Transmission» στο λογισμικό Dymola.....	140
Εικόνα 134: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Transmission» στο λογισμικό Dymola.....	140
Εικόνα 135: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Temp_input» στο λογισμικό Dymola...	141
Εικόνα 136: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Temp_input» στο λογισμικό Dymola.....	141
Εικόνα 137: Προβολή εικόνας του συνδέσμου «Irr_input» στο λογισμικό Dymola.....	142
Εικόνα 138: Προβολή κειμένου του συνδέσμου «Irr_input» στο λογισμικό Dymola.....	142
Εικόνα 139: Τελική προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Connectors» στο λογισμικό Dymola.....	143
Εικόνα 140: Προβολή εικόνας των συναρτήσεων στο λογισμικό Dymola.....	144
Εικόνα 141: Προβολή κειμένου της συνάρτησης «Cr_CO2_NIST» στο λογισμικό Dymola.....	145
Εικόνα 142: Προβολή κειμένου της συνάρτησης «S_T_CO2» στο λογισμικό Dymola.....	148
Εικόνα 143: Προβολή κειμένου της συνάρτησης «h_S_CO2» στο λογισμικό Dymola.....	149
Εικόνα 144: Προβολή κειμένου της συνάρτησης «h_T_CO2» στο λογισμικό Dymola.....	149
Εικόνα 145: Προβολή κειμένου της συνάρτησης «T_h_CO2» στο λογισμικό Dymola.....	150
Εικόνα 146: Τελική προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Functions» στο λογισμικό Dymola.....	150
Εικόνα 147: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Heliostats» στο λογισμικό Dymola.....	152
Εικόνα 148: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Heliostats» στο λογισμικό Dymola.....	152
Εικόνα 149: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Heliostats» στο λογισμικό Dymola.....	153
Εικόνα 150: Προβολή κειμένου (παραμέτρων) του μοντέλου «Receiver» στο λογισμικό Dymola.....	155

Εικόνα 151: Προβολή κειμένου (εξισώσεων) του μοντέλου «Receiver» στο λογισμικό Dymola.....	155
Εικόνα 152: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Receiver» στο λογισμικό Dymola.....	156
Εικόνα 153: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Receiver» στο λογισμικό Dymola.....	156
Εικόνα 154: Προβολή κειμένου (παραμέτρων) του μοντέλου «Tank» στο λογισμικό Dymola.....	158
Εικόνα 155: Προβολή κειμένου (εξισώσεων) του μοντέλου «Tank» στο λογισμικό Dymola.....	158
Εικόνα 156: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Tank» στο λογισμικό Dymola.....	159
Εικόνα 157: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Tank» στο λογισμικό Dymola.....	159
Εικόνα 158: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Circulator» στο λογισμικό Dymola.....	160
Εικόνα 159: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Circulator» στο λογισμικό Dymola.....	161
Εικόνα 160: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Circulator» στο λογισμικό Dymola.....	161
Εικόνα 161: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Hex» στο λογισμικό Dymola.....	163
Εικόνα 162: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Hex» στο λογισμικό Dymola.....	164
Εικόνα 163: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Hex» στο λογισμικό Dymola.....	164
Εικόνα 164: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Turbine» στο λογισμικό Dymola.....	166
Εικόνα 165: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Turbine» στο λογισμικό Dymola.....	166
Εικόνα 166: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Turbine» στο λογισμικό Dymola.....	167
Εικόνα 167: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Generator» στο λογισμικό Dymola.....	168
Εικόνα 168: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Generator» στο λογισμικό Dymola.....	168
Εικόνα 169: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Generator» στο λογισμικό Dymola.....	169
Εικόνα 170: Προβολή κειμένου (παραμέτρων) του μοντέλου «Regenerator» στο λογισμικό Dymola.....	170
Εικόνα 171: Προβολή κειμένου (εξισώσεων) του μοντέλου «Regenerator» στο λογισμικό Dymola.....	171
Εικόνα 172: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Regenerator» στο λογισμικό Dymola.....	171
Εικόνα 173: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Regenerator» στο λογισμικό Dymola.....	171
Εικόνα 174: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Cooler» στο λογισμικό Dymola.....	172
Εικόνα 175: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Cooler» στο λογισμικό Dymola.....	173
Εικόνα 176: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Cooler» στο λογισμικό Dymola.....	173
Εικόνα 177: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Compressor» στο λογισμικό Dymola.....	174
Εικόνα 178: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Compressor» στο λογισμικό Dymola.....	175
Εικόνα 179: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Compressor» στο λογισμικό Dymola.....	175
Εικόνα 180: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Integrator» στο λογισμικό Dymola.....	176
Εικόνα 181: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Efficiency» στο λογισμικό Dymola.....	177
Εικόνα 182: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Efficiency» στο λογισμικό Dymola.....	177
Εικόνα 183: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Efficiency» στο λογισμικό Dymola.....	178

Εικόνα 184: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Value_kWh» στο λογισμικό Dymola...	179
Εικόνα 185: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Value_kWh» στο λογισμικό Dymola.....	179
Εικόνα 186: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Value_kWh» στο λογισμικό Dymola.....	180
Εικόνα 187: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Value_efficiency» στο λογισμικό Dymola.....	180
Εικόνα 188: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «Value_efficiency» στο λογισμικό Dymola.....	181
Εικόνα 189: Προβολή εικόνας του μοντέλου «Value_efficiency» στο λογισμικό Dymola.....	181
Εικόνα 190: Δομή της βιβλιοθήκης «Weather_data» των μετεωρολογικών δεδομένων στο λογισμικό Dymola.....	182
Εικόνα 191: Προβολή κειμένου του μοντέλου «WeatherDataFileGeneralIR» στο λογισμικό Dymola.....	183
Εικόνα 192: Προβολή κειμένου του μοντέλου «Athens» στο λογισμικό Dymola.....	184
Εικόνα 193: Προβολή κειμένου του μοντέλου «WeatherDataReaderIR» στο λογισμικό Dymola.....	185
Εικόνα 194: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «WeatherDataReaderIR» στο λογισμικό Dymola.....	185
Εικόνα 195: Προβολή εικόνας του μοντέλου «WeatherDataReaderIR» στο λογισμικό Dymola.....	186
Εικόνα 196: Προσωρινή προβολή διαγράμματος του μοντέλου «SCO2_Brayton» χωρίς την τελική συνδεσμολογία στο λογισμικό Dymola.....	187
Εικόνα 197: Προβολή διαγράμματος του μοντέλου «SCO2_Brayton» στο λογισμικό Dymola.....	188
Εικόνα 198: Προβολή κειμένου του τμήματος των μοντέλων που αποτελούν το τελικό μοντέλο «SCO2_Brayton» στο λογισμικό Dymola.....	189
Εικόνα 199: Προβολή κειμένου των εξισώσεων συνδεσμολογίας (connect equations) του μοντέλου «SCO2_Brayton» στο λογισμικό Dymola.....	190
Εικόνα 200: Τροποποίηση παραμέτρων ενός μοντέλου στην προβολή διαγράμματος του λογισμικού Dymola.....	191
Εικόνα 201: Τελική προβολή κειμένου της βιβλιοθήκης «Examples» στο λογισμικό Dymola.....	192
Εικόνα 202: Εντολή μετάφρασης μοντέλου ‘Translate’ στο λογισμικό Dymola.....	193
Εικόνα 203: Επιτυχής μετάφραση μοντέλου «SCO2_Brayton» στο λογισμικό Dymola.	193
Εικόνα 204: Γενική καρτέλα ‘General’ των ρυθμίσεων προσομοίωσης (Simulation Setup) στο λογισμικό Dymola.....	194
Εικόνα 205: Καρτέλα μεταβλητών εξόδου ‘Output’ των ρυθμίσεων προσομοίωσης (Simulation Setup) στο λογισμικό Dymola.....	195
Εικόνα 206: Εκτέλεση προσομοίωσης στο λογισμικό Dymola.....	195
Εικόνα 207: Επιτυχής εκτέλεση προσομοίωσης στο λογισμικό Dymola.....	196
Εικόνα 208: Χρονική μεταβολή ωφέλιμης ισχύος (Receiver.Qu) σε σύγκριση με τη διαθέσιμη ηλιακή (Receiver.Qsol) και την απορροφούμενη ισχύ από τον κεντρικό δέκτη (Receiver.Qabs) στο λογισμικό Dymola.....	197

Εικόνα 209: Χρονική μεταβολή θερμικών απωλειών ακτινοβολίας (Receiver.Qrad) και συναγωγής (Receiver.Qconv) σε σύγκριση με τη διαθέσιμη ηλιακή ισχύ (Receiver.Qsol) στο λογισμικό Dymola.....	197
Εικόνα 210: Έλεγχος στάθμης θερμού (Hot_tank.level_tank) και κρύου (Cold_tank.level_tank) δοχείου στο λογισμικό Dymola.....	198
Εικόνα 211: Λόγος θερμοκρασίας προς σημείο τήξης τηγμένου άλατος εντός του κρύου δοχείου (Cold_tank.Ts_ratio) στο λογισμικό Dymola.....	199
Εικόνα 212: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου τηγμένου άλατος (hot) και διοξειδίου του άνθρακα (cold) από τον εναλλάκτη θερμότητας στο λογισμικό Dymola.....	200
Εικόνα 213: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου διοξειδίου του άνθρακα στον αναγεννητή του κύκλου Brayton στο λογισμικό Dymola.....	200
Εικόνα 214: Χρονική μεταβολή θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου διοξειδίου του άνθρακα στον ψύκτη του κύκλου Brayton στο λογισμικό Dymola.....	201
Εικόνα 215: Χρονική μεταβολή θερμοκρασίας εισόδου (Turbine.heat_hot.T) και εξόδου (Turbine.heat_cold.T) του διοξειδίου του άνθρακα από τον αεριοστρόβιλο στο λογισμικό Dymola.....	202
Εικόνα 216: Χρονική μεταβολή πραγματικής (Turbine.h_cold) και ισεντροπικής (Turbine.h_cold_is) ενθαλπίας αεριοστρόβιλου στο λογισμικό Dymola.....	202
Εικόνα 217: Χρονική μεταβολή καθαρά παραγομένης ισχύος στον αεριοστρόβιλο (Turbine.Pnet) σε σύγκριση με την προσδιδόμενη από τον εναλλάκτη (Heat_exchanger.Q_cold) θερμότητα στον κύκλο Brayton στο λογισμικό Dymola.....	203
Εικόνα 218: Χρονική μεταβολή καθαρά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τη γεννήτρια του συστήματος στο λογισμικό Dymola.....	204
Εικόνα 219: Σωρευτικό διάγραμμα χρονικής μεταβολής διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας (Qsol), ωφέλιμης ενέργειας κεντρικού δέκτη (Qu), προσδιδόμενης στον κύκλο ενέργειας (Qin) και καθαρά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Pnet) στο λογισμικό Dymola....	204
Εικόνα 220: Μέσοι βαθμοί απόδοσης θερμικού συστήματος (Eff_thermal), θερμοδυναμικού κύκλου (Eff_cycle) και συστήματος (Eff_system) όπως προκύπτουν με βάση τα σωρευτικά διαγράμματα ενέργειας στο λογισμικό Dymola.....	206
Εικόνα 221: Επιλογή γεωγραφικής θέσης εγκατάστασης από το μοντέλο «WeatherDataReaderIR» στο λογισμικό Dymola.....	207

Κατάλογος αναφορών

- [1] Ritchie, H., Roser, M. and Rosado, P., *Energy production and consumption, Our World in Data*, 2022. Available at: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>.
- [2] Ritchie, H., Roser, M. and Rosado, P., *CO2 Emissions by Fuel, Our World in Data*, 2020. Available at: <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel>.
- [3] Rohde, Robert., *Global Temperature Report for 2021, Berkeley Earth*, 2022. Available at: <https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2021/>.
- [4] “Investment in Renewable Energy, by Technology.”, *Our World in Data*, Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/investment-in-renewable-energy-by-technology>.
- [5] “Solar Power Generation.”, *Our World in Data*, Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-energy-consumption?tab=chart>.
- [6] Akhlaghi, Ali, “A Modelica-Based Framework for Modeling and Optimization of Microgrids.” *KTH School of Industrial Engineering and Management*, 2019.
- [7] Guccione, Salvatore, “Design and Optimization of a Sodium Molten Salt Heat Exchanger for Concentrating Solar Power Applications.” *KTH School of Industrial Engineering and Management*, 2020.
- [8] Ferrero, Simone, “Modelica Dynamic Modelling of a Supercritical CO2 Loop for Solar and Nuclear Applications.” *POLITECNICO DI TORINO*, 2020.
- [9] Ζερβός, Αρθούρος, *ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, 2018.
- [10] “Βιώσιμη Ανάπτυξη.”, *European Economic and Social Committee*, 2023. Available at: <https://www.eesc.europa.eu/el/policies/policy-areas/sustainable-development>.
- [11] “Agenda 2030.”, *Περιφερειακό Κέντρο Πληροφόρησης Του ΟΗΕ – Greece*, 2021. Available at: <https://unric.org/el/17-στοχοι-βιωσιμησ-αναπτυξησ/>.
- [12] “Types of Renewable Energy Sources: Inspire Clean Energy.” *Types of Renewable Energy Sources | Inspire Clean Energy*. Available at: <https://www.inspirecleanenergy.com/blog/clean-energy-101/types-of-renewable-energy-sources>.
- [13] Bull, S.R., “Renewable Energy Today and Tomorrow.” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 8, pp. 1216–1226, 2001, <https://doi.org/10.1109/5.940290>.
- [14] “Application Industry-Solar Ground Park.” *Xiamen Panda Solar Technology Co., Ltd*. Available at: <https://www.pandasolarpv.com/application-industry-solar-ground-park>.
- [15] “An Unprecedented Project Developed by Furnas Will Allow the Generation of Electric Energy from a Heliothmic Solar System.” *HELIOSCSP*. Available at: <https://helioscsp.com/an-unprecedented-project-developed-by-furnas-will-allow-the-generation-of-electric-energy-from-a-heliotermic-solar-system/>.
- [16] Ecozen. “Ηλιακοί Θερμοσίφωνες: Πριν Το Τέλος Του Χρόνου Το Πρόγραμμα.” *Ecozen*. Available at: <https://ecozen.gr/2022/10/iliakoi-thermosifones-prin-to-telos-tou-chronou-to-programma-epidotisis-oi-pinakes-tou-exoikonomo-2021/>.
- [17] Just Energy. “Everything You Need to Know about Wind Energy!” *Just Energy*. Available at: <https://justenergy.com/blog/everything-you-need-to-know-about-wind-energy/>.

- [18] Brey, Jared. “Wind Turbines (and Lawsuits) Are Coming to the Jersey Shore.” *Governing*. Available at: <https://www.governing.com/now/wind-turbines-and-law-suits-are-coming-to-the-jersey-shore>.
- [19] Παπαντώνης, Ε., Δημήτριος, *ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ, 2008.
- [20] World, The Scientific, “What Are the Four Major Types of Hydropower Plants?” *The Scientific World - Let’s Have a Moment of Science*, 2020. Available at: <https://www.scientificworldinfo.com/2020/03/four-major-types-of-hydropower-plants.html>.
- [21] Power Engineering International, “In Depth: Electric Actuators in Biomass Power Plants.” *Power Engineering International*, 2018. Available at: <https://www.powerengineeringint.com/emissions-environment/in-depth-electric-actuators-in-bio-mass-power-plants/>.
- [22] Josh, “A Rundown of Geothermal Heat Pumps: Wichita: Hanna Heating and Air.” *Hanna Heating and Air Conditioning Inc*, 2019. Available at: <https://www.hannainc.com/a-rundown-of-geothermal-heat-pumps/>.
- [23] “Ενέργεια Κυμάτων.” *All about Energy*. Available at: <https://www.allaboutenergy.gr/EnergieiaOkeanon.html>.
- [24] “Renewable Energy on the Rise: 37% of EU’s Electricity.” *Renewable Energy on the Rise: 37% of EU’s Electricity - Products Eurostat News – Eurostat*. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220126-1>.
- [25] “Interactive Publications.” *Shedding Light on Energy - 2023 Edition - Interactive Publications – Eurostat*. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2023>.
- [26] Landgeist, “Most Used Energy Source in Europe.” *Landgeist*, 2022. Available at: <https://landgeist.com/2022/09/17/most-used-energy-source-in-europe/>.
- [27] “2050 Energy Mix.”, *Wikimedia Commons*, 2018. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2050_energy_mix.jpg.
- [28] “EIA Projects That Renewable Generation Will Supply 44% of U.S. Electricity by 2050.” *Homepage - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Available at: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=51698>.
- [29] Goswami, D. Yogi, *ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ*, 3rd ed., ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2021.
- [30] “Smartflower: The Solar Panel That ‘Follows’ The Sun.” *The Patent*, 2019. Available at: <https://www.thepatent.news/2019/12/17/smartflower-solar-panel/>.
- [31] “The Solar ‘Magnifying Glass’—Spherical Solar Collector.” *Jockey Club SolarCare Programme*. Available at: <https://www.ccinnolab.org/solarcare/en/SolarAroundTheWorldPost/SphericalSolarCollector>.
- [32] ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΙΜΩΝΑΣ Α. *ΘΕΡΜΙΚΑ - ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ*. ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΕΜΠ, 2015.
- [33] Stix, Michael. “Characteristics of the Sun.” *The Sun: An Introduction*, 2nd ed., Springer Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 1–15.
- [34] “Insolation.” *Insolation | EARTH 103: Earth in the Future*. Available at: <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/1004>.
- [35] “Thermal Radiation.” *Understanding Spectra from the Earth*. Available at: <https://seos-project.eu/earthspectra/earthspectra-c02-p12.html>.

- [36] VR, Akshay, “7 Important Solar Angles Nobody Talks about: Solar Labs.” *Republic Of Solar*, 2022. Available at: <https://thesolarlabs.com/ros/solar-angles/>.
- [37] “Latitude and Longitude.” *Britannica*, 2023. Available at: <https://www.britannica.com/science/latitude>.
- [38] Wald, Lucien, *BASICS IN SOLAR RADIATION AT EARTH SURFACE*. PSL Research University, Lecture Notes, 2019.
- [39] Aly, Shahzada Pamir, “NUMERICAL MODELS DEVELOPMENT FOR SIMULATING OPTICAL, THERMAL AND ELECTRICAL PERFORMANCE, AS WELL AS STRUCTURAL DEGRADATION OF PV MODULES.” *HAMAD BIN KHALIFA UNIVERSITY, COLLEGE OF SCIENCE AND ENGINEERING*, 2019.
- [40] Liu, Benjamin Y. H., and Richard C. Jordan, *The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar-Energy Collectors*, 1963.
- [41] Pereira, Manuel Collares, and Ari Rabl, “THE AVERAGE DISTRIBUTION OF SOLAR RADIATION - CORRELATIONS BETWEEN DIFFUSE AND HEMISPHERICAL AND BETWEEN DAILY AND HOURLY INSOLATION VALUES.” *Solar Energy*, 1979. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90100-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90100-2).
- [42] “Solar Resource Maps of World.”, *Solargis*, 2020. Available at: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>.
- [43] Blanco, M.J., and S. Miller. “Introduction to Concentrating Solar Thermal (CST) Technologies.” *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, 2017, <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100516-3.00001-0>.
- [44] Chandra, Laltu, and Ambesh Dixit. *Concentrated Solar Thermal Energy Technologies: Recent Trends and Applications*. Springer Singapore, 2018.
- [45] Bellos, Evangelos, and Christos Tzivanidis. “Analytical Expression of Parabolic Trough Solar Collector Performance.” *Designs*, vol. 2, no. 1, 2018, <https://doi.org/10.3390/designs2010009>.
- [46] Wang, Tao. “HIGH THERMAL ENERGY STORAGE DENSITY MOLTEN SALTS FOR PARABOLIC TROUGH SOLAR POWER GENERATION.” *The University of Alabama*, 2011.
- [47] Bauer, Thomas, et al. “High-Temperature Molten Salts for Solar Power Application.” *Molten Salts Chemistry*, 2013, pp. 415–438, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-398538-5.00020-2>.
- [48] Alnaimat, Fadi, and Yasir Rashid. “Thermal Energy Storage in Solar Power Plants: A Review of the Materials, Associated Limitations, and Proposed Solutions.” *Energies*, vol. 12, no. 21, 31 Oct. 2019, <https://doi.org/10.3390/en12214164>.
- [49] Siegel, Nathan P. “Thermal Energy Storage for Solar Power Production.” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 1, no. 2, 2012, pp. 119–131, <https://doi.org/10.1002/wene.10>.
- [50] Zaversky, Fritz, et al. “Transient Molten Salt Two-Tank Thermal Storage Modeling for CSP Performance Simulations.” *Solar Energy*, vol. 93, 2013, pp. 294–311, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.02.034>.
- [51] Borgnakke, Claus, and Richard Edwin Sonntag. *Fundamentals of Thermodynamics*. Wiley, 2022.

- [52] Παγωνάρη, Κωνσταντίνου Ζ. *ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ*. Vol. 3, ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ, 2020.
- [53] Bagaria, Mehul. “Carnot Efficiency: Formula, Derivation & Explanation.” *Eigenplus*, 23 Jan. 2023. Available at: <https://www.eigenplus.com/carnot-efficiency-formula-derivation-explanation/>.
- [54] Reddy, Vundela Siva, et al. “An Approach to Analyse Energy and Exergy Analysis of Thermal Power Plants: A Review.” *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 01, no. 03, 2010, pp. 143–152, <https://doi.org/10.4236/sgre.2010.13019>.
- [55] “Notes on Stirling Cycle.” *Me Mechanical*, 24 Aug. 2021. Available at: <https://mechanicalengineering.blog/stirling-cycle/>.
- [56] “Mechanicalfunda for Mechanical Engineer.” *Ericsson Cycle*. Available at: <https://www.mechanicalfunda.com/2018/01/ericsson-cycle.html>.
- [57] Κακαράς, Ε, and Σ Καρέλλας. *Αποκεντρωμένα Συστήματα Παραγωγής Ενέργειας*. Εκδόσεις ΤΣΟΤΡΑΣ, 2016.
- [58] Salehi, Gholamreza, et al. “Thermodynamic and Exergoeconomic Evaluation of Heat Recovery of Gas Refinery Steam Network Using Organic Rankine Cycle and Kalina Cycle with Different Fluids.” *Journal of Energy Engineering*, vol. 146, no. 3, 2020, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ey.1943-7897.0000650](https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000650).
- [59] Kaushik, Shubhash C., et al. *Finite Time Thermodynamics of Power and Refrigeration Cycles*. Springer, 2018.
- [60] Chen, Yang. “Novel Cycles Using Carbon Dioxide as Working Fluid: New Ways to Utilize Energy from Low-Grade Heat Sources.” *Stockholm: Kungliga tekniska högskolan*, 2006.
- [61] “Critical Point (Thermodynamics).” *Wikipedia*, 22 Mar. 2023. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Critical_point_\(thermodynamics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Critical_point_(thermodynamics)).
- [62] “Supercritical Carbon Dioxide.” *Wikipedia*, 12 May 2023. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Supercritical_carbon_dioxide.
- [63] *Pressure-Enthalpy Diagram for Carbon Dioxide Refrigerant (R744)*. Available at: https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/CO2/ph_CO2.html.
- [64] Muñoz-Antón, Javier, et al. “Performance Study of Solar Power Plants with CO₂ as Working Fluid. A Promising Design Window.” *Energy Conversion and Management*, vol. 92, 2015, pp. 36–46, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.030>.
- [65] Liu, Yaping, et al. “Supercritical CO₂ Brayton Cycle: A State-of-the-Art Review.” *Energy*, vol. 189, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115900>.
- [66] Habibi, Hamed, et al. “Working Fluid Selection for Regenerative Supercritical Brayton Cycle Combined with Bottoming Orc Driven by Molten Salt Solar Power Tower Using Energy–Exergy Analysis.” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 39, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100699>.
- [67] Fritzson, Peter A. *Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica*. Wiley, 2012.
- [68] Moraleda, Urquía Alfonso, and Martín Carla Villalba. *Modeling and Simulation in Engineering Using Modelica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2018.
- [69] “The Modelica Association.” *The Modelica Association - Modelica Association*. Available at: <https://modelica.org/index.html>.

- [70] “Download Windows.” *OpenModelica*. Available at: <https://openmodelica.org/download/download-windows/>.
- [71] “Open Modelica” [Computer software], version 1.20.
- [72] “Dymola” [Computer software], 2023.
- [73] “Let’s Build from Here.” *GitHub*. Available at: <https://github.com/>.
- [74] “Modelica® – A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling Language Specification.” Modelica Association, 9 Mar. 2023.
- [75] “Carbon Dioxide.”, *NIST*. Available at: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Mask=1&Type=JANAFG&Table=on>
- [76] Span, Roland, and Wolfgang Wagner. “A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa.” *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 25, no. 6, 1996, pp. 1509–1596, <https://doi.org/10.1063/1.555991>.
- [77] Noone, Corey J., et al. “Heliostat Field Optimization: A New Computationally Efficient Model and Biomimetic Layout.” *Solar Energy*, vol. 86, no. 2, 2012, pp. 792–803, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.12.007>.
- [78] Incropera, Frank P, et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed., John Wiley & Sons, 2006.
- [79] Tec-Science. “Prandtl Number - Tec-Science.” *Tec*, 23 Mar. 2022. Available at: www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/prandtl-number/.
- [80] Kreith, Frank, et al. *Principles of HEAT TRANSFER*. 7th ed., Cengage Learning.
- [81] “PVGIS Online Tool.” *EU Science Hub*. Available at: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool_en.
- [82] Awan, Ahmed Bilal, et al. “Performance Enhancement of Solar Tower Power Plant: A Multi-Objective Optimization Approach.” *Energy Conversion and Management*, vol. 225, 2020, p. 113378, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113378>.