

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ν. ΜΑΡΚΑΤΟΣ

Μοντελοποίηση διασποράς υδρογόνου και άλλων ανωστικών
αερίων σε κλειστούς χώρους με την μεθοδολογία της
υπολογιστικής ρευστομηχανικής



ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ Α. ΕΥΘΥΜΙΑ

ΑΘΗΝΑ, 2011

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)»

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε σε συνεργασία της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. (με επιβλέποντα τον καθηγητή κ. Ν. Μαρκάτο) και του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» (με επιβλέποντα τον ερευνητή κ. Α. Βενετσάνο). Η συγγραφή της διατριβής έλαβε χώρα στο Joint Research Centre of the European Commission (J.R.C.), Cleaner Energy Unit στο Petten της Ολλανδίας.

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. κ. Ν. Μαρκάτο για την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που έδειξε προς εμένα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να απευθύνω στον υπεύθυνο του εργαστηρίου Περιβαλλοντικών Ερευνών ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος ερευνητή κ. Θ. Στούμπο για την ευκαιρία που μου έδωσε να δουλέψω σε ένα ευχάριστο και φιλικό περιβάλλον και για τις χρήσιμες παρατηρήσεις του κατά τη συγγραφή του διδακτορικού μου καθώς και στον ερευνητή κ. Α. Βενετσάνο για την 4ετή συνεργασία μας στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια της οποίας προσπάθησε ακούραστα να μου μεταδώσει την εμπειρία και τις γνώσεις του.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου στον κέντρο Joint Research Centre of the European Commission (J.R.C.) κ. Krassimir Koutzarov και τον καθηγητή κ. Stanislav Vassilev για τις επιστημονικές και μη, αλλά πάντα εποικοδομητικές συζητήσεις μας.

Ευχαριστώ όσους με στήριξαν αυτά τα χρόνια, τον Μαρτίνο και την οικογένεια μου, Νίκη, Θανάση και Τασία και τέλος τους φίλους μου Δικαία, Μαιρη και Αλέξανδρο.

Παπανικολάου Έφη

Απρίλης 2011

Πρόλογος

Σύνοψη

Ως αποτέλεσμα των ενεργειακών και περιβαλλοντικών προβλημάτων που έχουν ανακύψει τις τελευταίες δεκαετίες κρίνεται απαραίτητη η μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων, η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των σταθμών παραγωγής ενέργειας και η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον τομέα μεταφοράς και την παραγωγή ηλεκτρισμού εν γένει.

Οι συστοιχίες κυψελών καυσίμου (fuel cells) σε συνδυασμό με το H_2 παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό. Θεωρούνται αποδοτικοί τροφοδότες ενέργειας ενώ πολλοί υποστηρίζουν ότι δεν σχετίζονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο, με τις τρέχουσες τεχνολογίες παραγωγής H_2 ούτε μειώνεται η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα ούτε οι εκπομπές CO_2 γεγονός που αποδεικνύει ότι η χρήση του H_2 ως φορέα ενέργειας, εάν αξιολογηθεί στο σύνολό της, προς το παρόν δεν είναι «καθαρή» τεχνολογία.

Το H_2 χρησιμοποιείται εδώ και τουλάχιστον 100 χρόνια σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο, οι τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διάθεσής του είναι πολύ δαπανηρές για την εφαρμογή τους στις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Επίσης για τον χαρακτηρισμό των κινδύνων που εγκυμονούν κατά τη χρήση του H_2 ως φορέα ενέργειας είναι απαραίτητη η μελέτη ρεαλιστικών συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας οι οποίες εκ των πραγμάτων είναι διαφορετικές από αυτές που επικρατούν στις χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες. Για την αποδοχή του H_2 ως φορέα εναλλακτικής πηγής ενέργειας, τα επίπεδα ασφάλειας πρέπει να είναι τουλάχιστον συγκρίσιμα με αυτά των συμβατικών καυσίμων.

Στην περίπτωση ατυχημάτων των εγκαταστάσεων υποδομής H_2 η αλληλουχία των φαινομένων είναι η έκλυση, η διασπορά, η έναυση και τέλος η φωτιά ή έκρηξη. Προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος ανάφλεξης και καύσης, είναι απαραίτητο να μελετηθεί πρώτα η χωρική και χρονική κατανομή του H_2 στον περιβάλλοντα χώρο. Σε πολλές περιπτώσεις των εφαρμογών τεχνολογιών H_2 ως φορέα ενέργειας, οι εγκαταστάσεις θα βρίσκονται σε κλειστούς χώρους για λόγους ασφάλειας και απομόνωσης τους από το ευρύτερο περιβάλλον και τον τελικό αποδέκτη ή το κοινό.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραματικών και υπολογιστικών μελετών, σχετικών με τις τεχνολογίες H_2 , αναγνωρίστηκαν τα παρακάτω ζητήματα ως εκκρεμή ή ελλιπώς μελετηθέντα: πειραματικές μελέτες της έκλυσης και διασποράς H_2/He προκειμένου να εξεταστούν ευρύτερες συνθήκες όπως η θέση, ο προσανατολισμός και η ένταση της έκλυσης, ο προσανατολισμός και το πλήθος και εύρος των ανοιγμάτων

αερισμού, η παρουσία εμποδίων στο χώρο και κεκλιμένες οροφές αυτού, εκλύσεις υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες (άνεμος και θερμοκρασία) οι οποίες θα πρέπει να καταγεγραφούν, πειραματικά δεδομένα για την αξιολόγηση των μεθοδολογιών CFD ισχυρών τυρβωδών δεσμών, προσκρούόμενων δεσμών σε τοίχους, εκλύσεις σε πολύπλοκες γεωμετρίες και σήραγγες, έλεγχος αξιοπιστίας της μεθόδου αντικατάστασης της πηγής έκλυσης υπο-εκτονωμένων δεσμών από τις λεγόμενες «φαινόμενες» πηγές, έλεγχος προβλέψεων του φαινομένου διαστρωμάτωσης από ασθενείς εκλύσεις ή εκλύσεις λόγω διαπερατότητας αλλά και των μεθόδων περιγραφής της διαπερατότητας εν γένει, αριθμητικές προβλέψεις φυσικού και μηχανικού αερισμού και πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες σεναρίων έκλυσης H_2 σε σταθμούς ανεφοδιασμού. Τα φαινόμενα λοιπόν που συνδέονται με την ασφάλεια των τεχνολογιών H_2 ως φορέα ενέργειας δεν έχουν διευκρινιστεί ακόμα τόσο από πλευράς πληρότητας πειραματικών δεδομένων σε όλο το εύρος των αναμενόμενων συνθηκών λειτουργίας όσο από πλευράς ανάπτυξης και ελέγχου της αξιοπιστίας των υπολογιστικών μέσων όπως οι μεθοδολογίες CFD.

Σ' αυτήν τη διατριβή επιχειρείται η συλλογή πληροφοριών και συστηματική μελέτη προς αυτήν την κατεύθυνση. Καταρχήν παρουσιάζεται ο έλεγχος της αξιοπιστίας και καταλληλότητας του κώδικα ADREA-HF για τη μελέτη σεναρίων έκλυσης και διασποράς H_2 σε κλειστούς χώρους. Σ' αυτήν την ενότητα της διατριβής παρουσιάζονται υπολογιστικές μελέτες πειραμάτων έκλυσης και διασποράς H_2 (ή He ως υποκατάστατο για λόγους ασφάλειας) σε κλειστούς χώρους με φυσικό αερισμό παρουσία εμποδίων με στόχο τόσο την εκτίμηση των προβλέψεων των υπολογιστικών μοντέλων τύρβης όσο σε γενικότερο πλαίσιο, την μελέτη της επίδρασης άλλων παραμέτρων των υπολογιστικών πρακτικών όπως τα χαρακτηριστικά του πλέγματος και οι οριακές συνθήκες προκειμένου να προταθούν οδηγίες καλής πρακτικής. Επιπλέον, στην περίπτωση των πειραμάτων διαρροής H_2 από το σύστημα συστοιχίας κυψελών καυσίμου παρουσιάζεται μια γενική εκτίμηση του φυσικού αερισμού και συγκρίνονται οι μέθοδοι υπολογισμού του αερισμού με τη χρήση απλοποιημένων μοντέλων (παρόμοια χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας ATEX) και υπολογιστικών μεθόδων. Στην δεύτερη ενότητα της διατριβής παρουσιάζονται εφαρμογές του κώδικα ADREA-HF σε ρεαλιστικά σενάρια με πολύπλοκες γεωμετρίες. Μελετάται η επίδραση του προσανατολισμού της έκλυσης σε σχέση με τη διάταξη των εμποδίων στο χώρο και η επίδραση του ανέμου στη χωρική και χρονική κατανομή του H_2 σεναρίων που αφορούν σταθμούς ανεφοδιασμού. Παρουσιάζεται επίσης μια μελέτη εκτίμησης κινδύνου ενός υποθετικού σταθμού ανεφοδιασμού H_2 με έμφαση στην παρουσίαση της ποσοτικής ανάλυσης των επιπτώσεων των σεναρίων ατυχήματος με τη χρήση CFD. Τα σενάρια αφορούσαν ατυχήματα διαρροής H_2 από διάφορες μονάδες του σταθμού όπως τη μονάδα συμπίεσης, τη μονάδα καθαρισμού και ξήρανσης, το θάλαμο διανομής, τις συστοιχίες αποθήκευσης H_2 και τη μονάδα διάθεσης. Βρέθηκε ότι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο το μέγεθος του κινδύνου είναι τα χαρακτηριστικά της διαρροής ενώ για τα σενάρια ανοιχτού χώρου, η αύξηση της έντασης του ανέμου δεν επηρεάζει κατ' αναλογία τα χαρακτηριστικά του αναφλέξιμου νέφους. Ακόμη, αναδεικνύονται σημαντικές διαφορές στην εκτίμηση του κινδύνου (υπό τη μορφή αποστάσεων υπερπίεσεων) όταν τα δεδομένα προέρχονται από το υπολογιστικό εργαλείο CFD ADREA-HF σε σχέση με αυτά από το απλοποιημένο μοντέλο Effects 7.6 το οποίο

Σύνοψη

χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συγκρίσεις μεταξύ κωδικών CFD και απλοποιημένων μοντέλων πρέπει να γίνουν στο μέλλον συστηματικά ώστε να αναδειχτούν τα όρια εφαρμογής και ακρίβειας των διαφόρων μεθοδολογιών. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι από τη σύγκριση των διαφόρων μεθοδολογιών εκτίμησης κινδύνου του ίδιου υποθετικού σταθμού ανεφοδιασμού H₂ αναδείχθηκαν σημαντικές διαφορές σε διάφορα στάδια της μελέτης πέραν του σταδίου της ποσοτικής εκτίμησης του κινδύνου (λόγω της χρήσης CFD ή απλοποιημένων μοντέλων) όπως διαφορές στην μέθοδο ποσοτικοποίησης του κινδύνου, διαφορές στα κριτήρια αποδοχής του κινδύνου, διαφορές στην εκτίμηση συχνότητας αστοχίας των συστημάτων, διαφορές στην εκτίμηση της πιθανότητας και του είδους της έναυσης H₂ και τέλος ακόμη και απουσία κοινών σεναρίων για τον ίδιο σταθμό ανεφοδιασμού διότι αυτό τελικά έγκειται στην κρίση του μελετητή. Θα πρέπει λοιπόν στο μέλλον να γίνουν προσπάθειες από τα ενδιαφερόμενα μέρη ώστε να προταθεί μια εναρμονισμένη μεθοδολογία και πρακτική των σχετικών μελετών εκτίμησης κινδύνου προκειμένου το H₂ να εισαχθεί στην αγορά ως φορέας ενέργειας με ασφάλεια.

Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από τη διδακτορική διατριβή σε διεθνή περιοδικά με κριτές

1. **Papanikolaou, E.A.**, Venetsanos, A.G., Schiavetti, M., Marangon, A., Carcassi, M. and Markatos N., (2011), "Consequence assessment of the BBC H₂ refuelling station using the ADREA-HF code", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, Issue 3, The 3rd International Conference on Hydrogen Safety, pp. 2573-2581
2. **Papanikolaou, E.A.**, Venetsanos, A.G., Cerchiara, G.M., Carcassi, M. and Markatos N., (2011), "CFD simulations on small hydrogen releases inside a ventilated facility and assesment of ventilation efficiency", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, Issue 3, The 3rd International Conference on Hydrogen Safety, pp. 2597-2605
3. **Papanikolaou, E.A.**, Venetsanos, A.G., Heitsch, M., Baraldi, D., Huser, J., Pujol, J., Garcia, J. and Markatos N., (2010), "HySafe SBEP-V20: Numerical studies of release experiments inside a naturally ventilated residential garage", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 10, pp. 4747-4757
4. Brennan, S., Bengaouer, A., Carcassi, M., Cerchiara, G., Evans, G., Friedrich, A., Gentilhomme, O., Houf, W., Kotchourko, A., Kotchourko, N., Kudriakov, S., Makarov, D., Molkov, V., **Papanikolaou, E.A.**, Pitre, C., Royle, M., Schefer, R., Stern, G., Venetsanos, A.G., Vesper, A., et al., (2011), "Hydrogen and fuel cell stationary applications: Key findings of modelling and experimental work in the HYPER project", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, Issue 3, The 3rd International Conference on Hydrogen Safety, pp. 2711-2720
5. Ham, K., Marangon, A., Middha, P., Versloot, N., Rosmuller, N., Carcassi, M., Hansen, O.R., Schiavetti, M., **Papanikolaou, E.**, Venetsanos, A., Engebø, A., Saw, J.L., Saffers, J.B., Flores, A. and Serbanescu D., (2011), "Benchmark exercise on risk assessment methods applied to a virtual hydrogen refuelling station", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, Issue 3, The 3rd International Conference on Hydrogen Safety, pp. 2666-2677
6. Venetsanos, A.G., **Papanikolaou, E.A.** and Bartzis, J.G., (2010), "The ADREA-HF CFD code for consequence assessment of hydrogen applications", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 8, pp. 3908-3918

Άλλες δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά με κριτές

1. **Papanikolaou, E.A.**, Heitsch, M. and Baraldi D., (2011), "Validation of a numerical code for the simulation of a short-term CO₂ release in an open environment: Effect of wind conditions and obstacles", Journal of Hazardous Materials, Vol. 190, Issue 1-3, pp. 268-275
2. Jordan, T., Adams, P., Azkarate, I., Baraldi, D., Barthelemy, H., Bauwens, L., Bengaouer, A., Brennan, S., Carcassi, M., Dahoe, A., Eisenreich, N., Engebo, A., Funnemark, E., Gallego, E., Gavrikov, A., Haland, E., Hansen, A.M., Haugom, G.P., Hawksworth, S., Jedicke, O., **Papanikolaou, E.A.**, et al., (2011), "Achievements of the EC network of excellence HySafe", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, Issue 3, The 3rd International Conference on Hydrogen Safety, pp. 2656-2665
3. Venetsanos, A.G., **Papanikolaou, E.A.**, Cariteau, B., Adams, P. and Bengaouer A., (2010), "Hydrogen permeation from CGH2 vehicles in garages: CFD dispersion calculations and experimntal validation", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 8, pp. 3848-3856
4. Venetsanos, A.G., **Papanikolaou, E.A.**, Hansen, O.R., Middha, P., Garcia, J., Heitsch, M., Baraldi, D., and Adams P., (2010), "HySafe standard benchmark problem SBEP-V11: Predictions of hydrogen release and dispersion from a CGH2 bus in an underpass", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 8, pp. 3857-3867
5. Baraldi, D., Venetsanos, A.G., **Papanikolaou, E.**, Heitsch, M. and Dallas V., (2009), "Numerical analysis of release, dispersion and combustion of liquid hydrogen in a mock-up hydrogen refuelling station", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 22, Issue 3, pp. 303-315
6. Venetsanos, A.G., **Papanikolaou, E.A.**, Delichatsios, M., Garcia, J., Hansen, O.R., Heitsch, M., Huser, A., Jahn, W., Jordan, T., Lacombe, J.-M., Ledin, H.S., Makarov, D., Middha, P., Studer, E., Tchouvelev, A.V., Teodorczyk, A., Verbecke, F. and Van der Voort, M.M., (2009), "An inter-comparison exercise on the capabilities of CFD models to predict the short and long term distribution and mixing of hydrogen in a garage", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, Issue 14, pp. 5912-5923
7. Gallego, E., Migoya, E., Martín-Valdepeñas, J.M., Crespo, A., García, J., Venetsanos, A., **Papanikolaou, E.A.**, Kumar, S., Studer, E., Dagba, Y., Jordan, T., Jahn, W., Høiset, S., Makarov, D. and Piechna J., (2007), "An intercomparison exercise on the capabilities of CFD models to predict distribution and mixing of H₂ in a closed vessel", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, Issue 13, pp. 2235-2245
8. Venetsanos, A.G., **Papanikolaou, E.A.**, Hansen, O.R., Middha, P., Garcia, J., Heitsch, M., Baraldi, D. and Adams, P., (2010), "HySafe standard benchmark problem SBEP-V11: Predictions of hydrogen release and dispersion from a CGH2 bus in an underpass", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, Issue 8, pp. 3857-3867

Του Άρη

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Σύνοψη	iii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xv
Κατάλογος Πινάκων	xxv
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Κατακόρυφες υποηχητικές εκλύσεις.....	16
2.2.1 Κανόνες ομοιότητας και διαστατική ανάλυση.....	18
2.2.1.1 Κατακόρυφες ανωστικές δέσμες σε ομοιόμορφο περιβάλλον.....	19
2.2.1.2 Κατακόρυφες ανωστικές δέσμες σε περιβάλλον σταθερής διαστρωμάτωσης.....	20
2.2.1.3 Έκλυση δεσμών H ₂	21
2.3 Αερισμός.....	25
2.3.1 Φυσικός αερισμός.....	27
2.3.1.1 Υπολογισμός συγκέντρωσης αερίων ρύπων συναρτήσει του αερισμού: Μοντέλο μονής ζώνης (single-zone model).....	28
2.3.1.2 Υπολογισμός συγκέντρωσης αερίων ρύπων συναρτήσει του αερισμού: Μοντέλα πολλαπλών ζωνών (multi-zone model).....	29
2.3.1.3 Αποτελεσματικότητα αερισμού.....	29
2.3.1.4 Ροή μέσω ανοιγμάτων.....	30
2.3.1.4.1 Μεγάλα ανοίγματα.....	30
2.3.1.4.2 Μικρά ανοίγματα.....	31
2.3.1.5 Κινητήριοι μηχανισμοί αερισμού.....	31
2.3.1.5.1 Διαφορά πίεσης λόγω ανέμου.....	31
2.3.1.5.2 Διαφορά πίεσης λόγω άνωσης (διαφορά πυκνότητας).....	33
2.3.1.6 Υπολογισμός συνολικής πίεσης και παροχής αερισμού.....	35
2.3.1.6.1 Μέθοδος British Standards.....	36

Περιεχόμενα

2.3.1.6.2 Μέθοδος ASHRAE.....	40
2.4 Το φαινόμενο Coanda.....	42
2.5 Βασικές ιδιότητες υδρογόνου.....	43
2.5.1 Φυσικές ιδιότητες υδρογόνου.....	43
2.5.2 Χημικές ιδιότητες υδρογόνου.....	46
2.6 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	57
Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου.....	61
3.1 Εισαγωγή.....	62
3.2 Πειράματα σε ανοιχτούς χώρους.....	63
3.2.1 Πειράματα παρουσία εμποδίων.....	63
3.2.1.1 Πειράματα σε σταθμό ανεφοδιασμού H ₂ πραγματικής κλίμακας.....	63
3.2.2 Πειράματα απουσία εμποδίων.....	64
3.2.2.1 Έκλυση H ₂ από αγωγό χαμηλής πίεσης και μελέτη της επίδρασης ανέμου.....	64
3.2.2.2 Χαρακτηρισμός του πεδίου συγκέντρωσης υπερκρίσιμων δεσμών H ₂ και CH ₄	64
3.2.2.3 Έκλυση H ₂ , μέτρηση πεδίου συγκέντρωσης και σύγκρισή του με αποτελέσματα ολοκληρωματικών μοντέλων.....	65
3.2.2.4 Μεγάλης πίεσης έκλυση H ₂ στην ατμόσφαιρα.....	65
3.2.2.5 Έκλυση H ₂ και μέτρηση προκύπτοντος πεδίου συγκέντρωσης.....	66
3.2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων σε ανοιχτούς χώρους.....	65
3.3 Πειράματα σε κλειστούς χώρους.....	68
3.3.1 Πειράματα παρουσία εμποδίων.....	68
3.3.1.1 Έκλυση H ₂ σε μοντέλο συσκευής ενεργειακής συστοιχίας (fuel cell).....	68
3.3.1.2 Πειράματα σε σταθμό ανεφοδιασμού H ₂ πραγματικής κλίμακας.....	68
3.3.1.3 Πειράματα έκλυσης και διασποράς He σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου πραγματικής κλίμακας.....	70
3.3.1.4 Πειράματα έκλυσης και διασποράς H ₂ από ενεργειακή συστοιχία.....	74
3.3.1.5 Πειράματα έκλυσης και διασποράς H ₂ σε διάταξη μικρής κλίμακας με χωρίσματα.....	79
3.3.1.6 Πειράματα H ₂ σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης.....	80
3.3.2 Πειράματα απουσία εμποδίων.....	82
3.3.2.1 Έκλυση He σε χώρο ¼ διθέσιου χώρου στάθμευσης.....	82
3.3.2.2 Έκλυση H ₂ σε κυλινδρική οβίδα και He σε μοντέλο χώρου στάθμευσης.....	82
3.3.2.3 Υποχητική έκλυση H ₂ σε κλειστό κυλινδρικό δοχείο όγκου 20 m ³	84
3.3.2.4 Πειράματα σε προθάλαμο υποδιπλάσιας κλίμακας.....	84
3.3.2.5 Έκλυση και διασπορά H ₂ στην πειραματική εγκατάσταση INERIS.....	86

Περιεχόμενα

3.3.2.6 Πειράματα κατανομής ελεύθερης τυρβώδους δέσμης.....	87
3.3.2.7 Μελέτη φυσικού αερισμού χώρου στάθμευσης από δυνάμεις άνωσης κατά την έκλυση H_2	87
3.3.2.7.1 Ρυθμός έκλυσης.....	88
3.3.2.7.2 Ταχύτητα έκλυσης.....	88
3.3.2.7.3 Επίδραση ανέμου.....	88
3.3.2.7.4 Επίδραση θερμοκρασίας.....	89
3.3.2.7.5 Περιγραφή των πειραμάτων και του απλοποιημένου μοντέλου.....	89
3.3.2.8 Πειράματα έκλυσης και διασποράς He σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου πραγματικής κλίμακας.....	93
3.3.2.9 Πειράματα έκλυσης He σε εγκατάσταση χώρου στάθμευσης πραγματικής κλίμακας.....	94
3.3.3 Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων σε κλειστούς χώρους.....	96
3.4 Συμπεράσματα.....	100
3.5 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	100
Κεφάλαιο 4: Ανασκόπηση μαθηματικών προτύπων προσομοίωσης της τύρβης...	105
4.1 Εισαγωγή.....	106
4.2 Μαθηματική περιγραφή.....	107
4.2.1 Εξισώσεις RANS.....	109
4.2.2 Μοντέλα τυρβώδους ροής.....	111
4.2.2.1 Μοντέλα μεταφοράς.....	111
4.2.2.1.1 Μοντέλα μηδενικής εξίσωσης (μοντέλα μήκους ανάμιξης).....	112
4.2.2.1.2 Μοντέλα μιας διαφορικής εξίσωσης.....	114
4.2.2.1.3 Μοντέλα δύο διαφορικών εξισώσεων (μοντέλα $k\sim\epsilon$).....	115
4.2.2.1.4 Μοντέλο εξισώσεων τάσεων Reynolds (Reynolds Stress Models – RSM).....	119
4.2.2.1.5 Μοντέλο αλγεβρικών εξισώσεων τάσεων Reynolds.	120
4.2.2.2 Μοντέλα υπο-πλεγματικής κλίμακας ή εξομοίωσης μεγάλων δινών (LES).....	120
4.2.2.3 Άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS).....	120
4.2.2.4 Αναλυτικές θεωρίες τύρβης.....	120
4.3 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	121
Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου.....	123
5.1 Εισαγωγή.....	124
5.2 Μελέτες σεναρίων έκλυσης και διασποράς αερίων σε ανοιχτούς χώρους...	125
5.2.1 Μελέτη έκλυσης, διασποράς και καύσης ατυχήματος H_2 σε αστική περιοχή.....	125
5.2.2 Μελέτη της επίδρασης γειτνίασης στερεής επιφάνειας στην έκταση του αναφλέξιμου νέφους H_2 και CH_4	126
5.2.3 Προσομοίωση σεναρίων ατυχήματος H_2 και CH_4 από υπόγειους αγωγούς μεταφοράς.....	127

Περιεχόμενα

5.2.4 Ανάλυση επιπτώσεων έκλυσης H ₂ σε σταθμό ανεφοδιασμού.....	127
5.2.5 Πειραματική και υπολογιστική ανάλυση τυρβωδών δεσμών αέρα και H ₂	128
5.2.5.1 Ασυμπίεστη τυρβώδης δέσμη αέρα.....	128
5.2.5.2 Ασυμπίεστη τυρβώδης δέσμη H ₂	128
5.2.5.3 Συμπιεστή τυρβώδης δέσμη H ₂	129
5.2.6 Υπολογιστική μελέτη σεναρίων έκλυσης και διασποράς H ₂ από οχήματα.....	129
5.3 Μελέτες σεναρίων έκλυσης και διασποράς αερίων σε κλειστούς χώρους... ..	130
5.3.1 Κατακόρυφη τυρβώδης ανωστική δέσμη He.....	130
5.3.2 Έκλυση και διασπορά H ₂ σε χώρο στάθμευσης.....	131
5.3.3 Έκλυση και διασπορά H ₂ σε κλειστό κυλινδρικό δοχείο.....	132
5.3.4 Μοντελοποίηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς H ₂ σε διάταξη μικρής κλίμακας με χωρίσματα.....	133
5.3.5 Έκλυση και διασπορά H ₂ σε υπόγεια οδική διάβαση (underpass)..	133
5.3.6 Έκλυση και διασπορά He σε χώρο στάθμευσης με φυσικό αερισμό.....	134
5.3.7 Έκλυση H ₂ από τη δεξαμενή τροφοδοσίας αυτοκινήτου.....	134
5.3.8 Έκλυση και διασπορά H ₂ σε χώρο με φυσικό αερισμό.....	134
5.3.9 Έκλυση και διασπορά He σε χώρο μικρής κλίμακας.....	135
5.3.10 Μεθοδολογία μετριάσμού του κινδύνου διασποράς H ₂ σε κλειστό χώρο με τη χρήση ανιχνευτών συγκέντρωσης.....	137
5.3.11 Εκτίμηση της κατανομής H ₂ σε χώρους στάθμευσης από εκλύσεις λόγω διαπερατότητάς του από τα δοχεία αποθήκευσης αυτοκινήτων και λεωφορείων.....	137
5.4 Μοντελοποίηση έκλυσης ρευστού σε συνθήκες υψηλής πίεσης.....	139
5.4.1 Μοντελοποίηση της περιοχής πλησίον της έκλυσης.....	140
5.4.2 Σημειακή ηχητική πηγή.....	141
5.4.3 Σημειακή υποηχητική πηγή.....	141
5.4.4 Ηχητική πηγή.....	141
5.4.4.1 Birch 1984.....	142
5.4.4.2 Birch 1987.....	144
5.4.4.3 Schefer 2007.....	145
5.4.4.4 Xiao 2009.....	146
5.4.5 Υποηχητική πηγή.....	147
5.4.5.1 Μέθοδος δίσκου Mach.....	147
5.4.5.2 Πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή.....	147
5.5 Σύγκριση μεταξύ υπόθεσης ιδανικού και πραγματικού αερίου.....	150
5.6 Γενικά συμπεράσματα.....	152
5.7 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	154
Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό.....	159
6.1 Εισαγωγή.....	160
6.2 Περιγραφή των πειραμάτων.....	161
6.3 Προσομοίωση των πειραμάτων.....	164
6.3.1 Υπολογιστικό πεδίο.....	164

Περιεχόμενα

6.3.2 Καθορισμός βασικών εξισώσεων, αρχικών και οριακών συνθηκών ροής και αριθμητικής μεθοδολογίας επίλυσης.....	165
6.3.3 Αποτελέσματα.....	166
6.4 Γενική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του φυσικού αερισμού.....	176
6.5 Συμπεράσματα.....	182
6.6 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	183
Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό...	185
7.1 Εισαγωγή.....	186
7.2 Περιγραφή των πειραμάτων.....	189
7.3 Στατιστικοί δείκτες επίδοσης υπολογιστικών μεθοδολογιών.....	190
7.4 Προσομοίωση των πειραμάτων.....	192
7.4.1 Υπολογιστικό πλέγμα.....	193
7.4.2 Καθορισμός βασικών εξισώσεων, αρχικών και οριακών συνθηκών ροής και αριθμητικής μεθοδολογίας επίλυσης.....	195
7.4.3 Αποτελέσματα 1 ^{ης} φάσης: Σύγκριση μοντέλων k-ε και LVEL με πειραματικά δεδομένα.....	197
7.4.4 Μελέτη της επίδρασης υπόθεσης συμμετρίας, πύκνωσης πλέγματος και επέκτασης υπολογιστικού χωρίου.....	205
7.5 Σύγκριση μεταξύ προσομοιώσεων με τον κώδικα ADREA-HF και με άλλους CFD κώδικες.....	209
7.6 Γενικά συμπεράσματα.....	217
7.7 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	219
Κεφάλαιο 8: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινήτων.....	223
8.1 Εισαγωγή.....	224
8.2 Περιγραφή των πειραμάτων.....	224
8.3 Προσομοίωση των πειραμάτων.....	225
8.3.1 Υπολογισμός συνθηκών έκλυσης.....	225
8.3.2 Υπολογισμός της διασποράς H ₂	227
8.3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα.....	229
8.4 Συμπεράσματα.....	232
8.5 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	232
Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου.....	235
9.1 Εισαγωγή.....	236
9.2 Περιγραφή του σταθμού ανεφοδιασμού αερίου υδρογόνου.....	243
9.3 Γενική περιγραφή των σεναρίων.....	246
9.4 Ποσοτική εκτίμηση των επιπτώσεων των σεναρίων.....	249
9.4.1 Σενάριο στη μονάδα συμπίεσης.....	249
9.4.1.1 Υπολογισμός της έκλυσης H ₂	250
9.4.1.2 Υπολογισμός της διασποράς H ₂ μέσα στη μονάδα συμπίεσης.....	251
9.4.1.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα.....	252

Περιεχόμενα

9.4.1.3 Αποτελέσματα.....	252
9.4.2 Σενάρια στη μονάδα καθαρισμού και ξήρανσης.....	254
9.4.2.1 Υπολογισμός της έκλυσης H ₂	255
9.4.2.2 Υπολογισμός της διασποράς H ₂ μέσα στη μονάδα καθαρισμού και ξήρανσης.....	256
9.4.2.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα.....	256
9.4.2.3 Αποτελέσματα.....	257
9.4.3 Σενάρια στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής.....	258
9.4.3.1 Υπολογισμός της έκλυσης H ₂	258
9.4.3.2 Υπολογισμός της διασποράς H ₂ στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής και στον περιβάλλοντα εξωτερικό χώρο...	259
9.4.3.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα.....	260
9.4.3.3 Αποτελέσματα.....	262
9.4.4 Σενάρια στη μονάδα αποθήκευσης.....	264
9.4.4.1 Υπολογισμός της έκλυσης H ₂	264
9.4.4.2 Υπολογισμός της διασποράς H ₂ μέσα στη μονάδα αποθήκευσης.....	265
9.4.4.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα.....	265
9.4.4.3 Αποτελέσματα.....	266
9.4.5 Σενάρια στην περιοχή διάθεσης υδρογόνου.....	267
9.4.5.1 Υπολογισμός της έκλυσης H ₂	268
9.4.5.2 Υπολογισμός της διασποράς H ₂ στη μονάδα διάθεσης.....	269
9.4.5.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα.....	269
9.4.5.3 Αποτελέσματα.....	270
9.4.6 Συμπεράσματα της ποσοτικής εκτίμησης των σεναρίων με τον κώδικα ADREA-HF.....	271
9.4.6.1 Σενάρια σε κλειστό χώρο.....	271
9.4.6.2 Σενάρια σε ανοιχτό χώρο ή σε χώρο με εμπόδια.....	272
9.5 Εκτίμηση κινδύνου.....	273
9.6 Βιβλιογραφικές αναφορές.....	274
Κεφάλαιο 10: Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα.....	277
Κεφάλαιο 11: Προτεινόμενα μελλοντικά βήματα.....	283
Παράρτημα: Γενική περιγραφή του κώδικα ADREA-HF.....	i

Κατάλογος Σχημάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 1:	Αναπαράσταση ειδών δεσμών/πλουμιών σε ομοιογενές περιβάλλον: a) απλή δέσμη, b) απλό πλούμιο, c) ανωστική δέσμη και d) δέσμη αρνητικής άνωσης (Chen και Rodi, 1980).....	17
Σχήμα 2:	Αναπαράσταση ανωστικής δέσμης σε περιβάλλον σταθερής διαστρωμάτωσης (Chen και Rodi, 1980).....	17
Σχήμα 3:	Αναπαράσταση τυρβώδους δέσμης (El-Amin, 2009).....	22
Σχήμα 4:	Αναπαράσταση κλειστού χώρου με αερισμό και παραγωγή ρύπου – Μοντέλο μονής ζώνης.....	28
Σχήμα 5:	Παράδειγμα τιμών C_p σε τυπικό βιομηχανικό κτίριο	32
Σχήμα 6:	Αερισμός χώρου με 2 κάθετα ανοίγματα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (Awbi, 2005).....	34
Σχήμα 7:	α) πιέσεις και β) προκύπτουσες παροχές αέρα στο χώρο λόγω επίδρασης ανέμου, διαφοράς θερμοκρασίας και μηχανικού αερισμού (Awbi, 2005).....	35
Σχήμα 8:	Σχηματική αναπαράσταση χώρου με 2 ανοίγματα.....	39
Σχήμα 9:	Επίδραση του ανοίγματος παραθύρου: α) παράθυρα με πλάγια παραθυρόφυλλα b) κεντρικά αρθρωτά παράθυρα αερισμού (Awbi, 2005)...	40
Σχήμα 10:	Αύξηση του αερισμού λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας ενός ανοίγματος έναντι του άλλου (ASHRAE, 2005).....	42
Σχήμα 11:	Επίδραση της απόστασης γραμμική δέσμης από στερεή επιφάνεια στο μήκος της περιοχής προσκόλλησης x_a (Awbi, 2005).....	43
Σχήμα 12:	Διάγραμμα φάσης H_2 (Zuttel και συν., 2008, p.76).....	45
Σχήμα 13:	Πυκνότητα υγροποιημένου (21.2 K) και αερίου (298.15 K) H_2 συναρτήσει της πίεσης (Hydrogen Safety Engineering).....	45
Σχήμα 14:	Σχέση ελάχιστης ενέργειας έναυσης από σπινθήρα με την διάμετρο σβέσης (Law, 2006).....	49
Σχήμα 15:	Αόρατη φλόγα H_2 (College of Desert - Manual, 2001).....	51
Σχήμα 16:	Πιέσεις προκαλούμενες από διάφορα είδη καύσης H_2 (BRHS, 2007).....	51
Σχήμα 17:	Σύγκριση ιδιοτήτων (σχετικών με θέματα ασφάλειας) H_2 με αυτές των υδρογονανθράκων (Breitung, 2005).....	52
Σχήμα 18:	Το H_2 είναι πολύ πιο ανωστικό από τον αέρα και άλλα καύσιμα (California Energy Commission, 2004).....	52
Σχήμα 19:	Σύγκριση των ιδιοτήτων H_2 και μεθανίου σχετικά με θέματα ασφάλειας (California Energy Commission, 2004).....	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχήμα 1:	Μέγιστη έκταση αναφλέξιμου νέφους εκλύσεων H_2 από τον διανομέα σταθμού ανεφοδιασμού (Tanaka και συν., 2005).....	63
Σχήμα 2:	Διάταξη πειραμάτων (Ruffin και συν., 1996).....	64

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3:	Πειραματική διάταξη (Shirvill και συν., 2005).....	66
Σχήμα 4:	Πειραματική διάταξη (Chaineaux, 1999).....	66
Σχήμα 5:	Μεταβολή μέγιστης απόστασης συγκέντρωσης H ₂ ίσης με LFL συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας της πίεσης αποθήκευσης (HySafe report, 2004b)....	66
Σχήμα 6:	Πειραματική διάταξη (αριστερά) και εικόνα πειράματος έκλυσης 6 g/s H ₂ με την μέθοδο BOS(δεξιά) (Friedrich και συν., 2009).....	68
Σχήμα 7:	Αριστερά – Φωτογραφία μοντέλου χώρου αποθήκευσης, Δεξιά – Σχηματική αναπαράσταση των 2 περιπτώσεων φυσικού αερισμού (Tanaka και συν., 2005).....	69
Σχήμα 8:	Αριστερά – Δωμάτιο αποθήκευσης H ₂ υψηλής πίεσης, Δεξιά – Διάταξη κυλίνδρων αποθήκευσης (Tanaka και συν., 2005).....	69
Σχήμα 9:	Αναπαράσταση πειραματικής εγκατάστασης (Swain, 1998).....	70
Σχήμα 10:	Φωτογραφία από την πειραματική εγκατάσταση (Swain, 1998).....	70
Σχήμα 11:	Χρονική μεταβολή συγκέντρωσης He για πειράματα με 1 μόνο άνοιγμα (Swain, 1998).....	71
Σχήμα 12:	Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 1 με ύψος ανοιγμάτων 0,495 m (Swain, 1998).....	73
Σχήμα 13:	Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 2 με ύψος ανοιγμάτων 0,241 m (Swain, 1998).....	73
Σχήμα 14:	Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 3 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,114 m και ύψος άνω ανοίγματος 0,127 m (Swain, 1998).....	73
Σχήμα 15:	Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 4 με ύψος ανοιγμάτων 0,063 m (Swain, 1998).....	73
Σχήμα 16:	Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 5 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,025 m και ύψος άνω ανοίγματος 0,102 m (Swain, 1998).....	73
Σχήμα 17:	Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 6 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,102 m και ύψος άνω ανοίγματος 0,025 m (Swain, 1998).....	73
Σχήμα 18:	Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 7 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,063 m+περσίδες και ύψος άνω ανοίγματος 0,063 m (Swain, 1998).....	74
Σχήμα 19:	Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 8 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,178 m+περσίδες και ύψος άνω ανοίγματος 0,063 m (Swain, 1998).....	74
Σχήμα 20:	Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 9 με ύψος ανοιγμάτων 0,178 m+περσίδες (Swain, 1998).....	74
Σχήμα 21:	Πειραματική εγκατάσταση CVE (Cerchiara και συν., 2009).....	75
Σχήμα 22:	Σχηματική αναπαράσταση και διαστάσεις της εγκατάστασης CVE (Cerchiara και συν., 2009).....	75
Σχήμα 23:	Θέση ανοιγμάτων αερισμού, ενεργειακής συστοιχίας και ανιχνευτών συγκέντρωσης H ₂ (Cerchiara και συν., 2009).....	76
Σχήμα 24:	Άνοιγμα αερισμού V1s.....	76
Σχήμα 25:	Ανοίγματα αερισμού V1s, V2.....	76
Σχήμα 26:	Άνοιγμα αερισμού V1b.....	77
Σχήμα 27:	Ανοίγματα αερισμού V1b, V2.....	77
Σχήμα 28:	Ανοίγματα αερισμού V1s, V3.....	77
Σχήμα 29:	Ανοίγματα αερισμού V1s, V3.....	77
Σχήμα 30:	Ανοίγματα αερισμού V1b, V3.....	77
Σχήμα 31:	Ανοίγματα αερισμού V1s, V4.....	77
Σχήμα 32:	Ανοίγματα αερισμού V1b, V4.....	77
Σχήμα 33:	Ανοίγματα αερισμού V1s, V2, V3, V4.....	77
Σχήμα 34:	Ανοίγματα αερισμού V1b, V2, V3, V4.....	77
Σχήμα 35:	Πάνω αριστερά – Πειραματική διάταξη, Πάνω δεξιά – Θέση ανιχνευτών	80

Κατάλογος Σχημάτων

συγκέντρωσης H ₂ , Κάτω δεξιά – Θέση χωρισμάτων πειράματος D06, Κάτω κέντρο – Θέση χωρισμάτων πειράματος D27 και Κάτω Αριστερά – Θέση χωρισμάτων πειράματος D58 (GexCon, 2003).....	81
Σχήμα 36: Θέση μηχανικού αερισμού πειραματικής εγκατάστασης (Merilo και συν., 2009).....	81
Σχήμα 37: Θέση φυσικού αερισμού πειραματικής εγκατάστασης (Merilo και συν., 2009).....	81
Σχήμα 38: Μέση συγκέντρωση H ₂ πειράματος με φυσικό αερισμό και έκλυση 2,56 g/s (Merilo και συν., 2009).....	81
Σχήμα 39: Μέση συγκέντρωση H ₂ πειράματος με φυσικό αερισμό και έκλυση 2,5 g/s (Merilo και συν., 2009).....	81
Σχήμα 40: Μέση συγκέντρωση H ₂ πειράματος με φυσικό αερισμό και έκλυση 0,24 g/s (Merilo και συν., 2009).....	81
Σχήμα 41: Μέση συγκέντρωση H ₂ πειράματος με μηχανικό αερισμό 0,10 m ³ /s και έκλυση 1,86 g/s (Merilo και συν., 2009).....	81
Σχήμα 42: Μέση συγκέντρωση H ₂ συναρτήσει μηχανικού αερισμού για έκλυση 0,42-0,44 g/s, 0,92 g/s και 1,39 g/s σε ύψος 2,7m, 2,3m και 1,9m από το έδαφος (χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές όπως αναφέρονται από τους Merilo και συν., 2009).....	81
Σχήμα 43: Πειραματική διάταξη (Pitts και συν., 2009).....	82
Σχήμα 44: Πειραματική διάταξη μεταλλικής οβίδας (Denisenko και συν., 2009).....	83
Σχήμα 45: Πειραματική διάταξη χώρου στάθμευσης (Denisenko και συν., 2009).....	83
Σχήμα 46: Χρονική εξέλιξη ειρηνικτικού μίγματος περίπτωσης «πληρούμενου κιβωτίου» και «κιβωτίου βαθμιαίας εξασθένισης» (Denisenko και συν., 2009).....	84
Σχήμα 47: Τομή πειραματικού δοχείου (Gallego και συν., 2007).....	85
Σχήμα 48: Συγκέντρωση H ₂ συναρτήσει της απόστασης από την οροφή του κυλίνδρου με την παρέλευση 2, 50, 100 και 250 s από το τέλος της έκλυσης (Gallego και συν., 2007).....	85
Σχήμα 49: Αναπαράσταση προθαλάμου, θέση ανιχνευτών, έκλυσης και ανοιγμάτων φυσικού αερισμού (Swain και συν., 1998 και HySafe report, 2004a).....	86
Σχήμα 50: Συγκέντρωση H ₂ στους 4 ανιχνευτές συναρτήσει του χρόνου (χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές όπως αναφέρονται στους Swain και συν., 1998).....	86
Σχήμα 51: Αναπαράσταση πειραματικής εγκατάστασης INERIS (HySafe Report, InsHyde project, 2005).....	87
Σχήμα 52: Φωτογραφία πειραματικής εγκατάστασης (HySafe report, 2006).....	87
Σχήμα 53: Σχηματική αναπαράσταση του 1D μοντέλου των Barley και Gawlik (2009).....	90
Σχήμα 54: Εσωτερικό πειραματικού χώρου, φαίνεται η θέση της σημειακής έκλυσης, η στήλη μετρήσεων συγκέντρωσης, τα ανοίγματα και η πόρτα (Barley και Gawlik, 2009).....	92
Σχήμα 55: Σύγκριση απλοποιημένου μοντέλου (καμπύλες και τμήματα καμπυλών βάσει της εξίσωσης (16) με πειραματικές μετρήσεις (σημεία) (Barley και Gawlik, 2009).....	93
Σχήμα 56: Πειραματική εγκατάσταση CEA διαστάσεων L=5,76m (x), W=2,96m (y) και H=2,42m (z).....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήμα 1: Κατηγορίες μοντέλων τυρβώδους ροής.....	111
--	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σχήμα 1:	Διάταξη περιοχής πλησίον ακροφυσίου υποεκτονώμενης δέσμης υψηλής πίεσης με λόγο πιέσεων δέσμης προς περιβάλλοντος αέρα >10 : 1. Κρουστικό όριο, 2. Δίσκος Mach, 3. Ισοβαρής γραμμή διατμητικής ζώνης, 4. Κύμα ανάκλασης, 5. Διατμητική ζώνη, 6. Ζώνη ανάμειξης δίσκου Mach (Lehnasch, 2005).....	139
Σχήμα 2:	Αριστερά: πεδίο ροής, Δεξιά: κατανομή αριθμού Mach (Xu και συν., 2005)	140
Σχήμα 3:	Μη δομημένο πλέγμα με δυναμική προσαρμογή βάσει βαθμίδας πίεσης (Réneau και συν., 2009).....	141
Σχήμα 4:	Αναπαράσταση έκλυσης υπερκρίσιμου αερίου (Θέση 1: συνθήκες στην δεξαμενή αποθήκευσης - συνθήκες ηρεμίας - ανάντη έκλυσης, Θέση 2: συνθήκες ακροφυσίου, Θέση 3: συνθήκες μετά τη θεωρητική περιοχή εκτόνωσης του αερίου όπου επικρατούν συνθήκες περιβάλλοντος).....	142
Σχήμα 5:	Αναπαράσταση μεθόδου δίσκου Mach.....	149
Σχήμα 6:	Διαφορά πυκνότητας πραγματικού αερίου από αυτήν ιδανικού αερίου συναρτήσει της πίεσης σε θερμοκρασία 293.15 K. (Tchouvelev και συν., 2007).....	150
Σχήμα 7:	Φραγμένος (choked) ρυθμός έκλυσης H_2 , αρχική πίεση δεξαμενής 700 bar, διάμετρος ακροφυσίου 6 mm. Ο ρυθμός έκλυσης με την υπόθεση ιδανικού αερίου είναι μεγαλύτερος κατά 53% μετά από 3 s από την έναρξη της έκλυσης (Tchouvelev και συν., 2007).....	151

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σχήμα 1:	Διατάξεις ανοιγμάτων φυσικού αερισμού.....	163
Σχήμα 2:	Καρτεσιανό υπολογιστικό πλέγμα.....	164
Σχήμα 3:	Εσωτερικό ενεργειακής συστοιχίας και θέση έκλυσης H_2 z_{p_up}	165
Σχήμα 4:	Εσωτερικό ενεργειακής συστοιχίας και θέση έκλυσης H_2 y_{p_out}	165
Σχήμα 5:	Θέση ανιχνευτών συγκέντρωσης H_2	167
Σχήμα 6:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 3.....	168
Σχήμα 7:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 5.....	169
Σχήμα 8:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 6.....	170
Σχήμα 9:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 14.....	170
Σχήμα 10:	Ισο-επιφάνεια 1% H_2 πειράματος 3 σε χρόνο 900 s από την έκλυση.....	171
Σχήμα 11:	Κατανομή συγκεντρώσεων H_2 και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο y-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 900 s από την έκλυση (πείραμα 3) (Tecplot 8.0).....	171
Σχήμα 12:	Ισο-επιφάνεια 1% H_2 πειράματος 14 σε χρόνο 900 s από την έκλυση.....	171
Σχήμα 13:	Κατανομή συγκεντρώσεων H_2 και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο y-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 900 s από την έκλυση (πείραμα 14) (Tecplot 8.0).....	171
Σχήμα 14:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 15.....	172
Σχήμα 15:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 16.....	173
Σχήμα 16:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 11.....	174
Σχήμα 17:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 12.....	174
Σχήμα 18:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 18.....	175
Σχήμα 19:	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 19.....	175
Σχήμα 20:	Σχηματική αναπαράσταση του απλοποιημένου μοντέλου; Αριστερά: πλήρης ανάμιξη H_2 με τον περιβάλλοντα αέρα, Δεξιά: μερική ανάμιξη H_2 με τον περιβάλλοντα αέρα.....	177

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 21: Q_{in}/Q_{H_2} (θεωρητικά) συναρτήσει της συγκέντρωσης H_2 στη θέση S5.....	181
Σχήμα 22: Q_{in}/Q_{H_2} (βάσει προσομοιώσεων) συναρτήσει της συγκέντρωσης H_2 στη θέση S5.....	181
Σχήμα 23: Σύγκριση της παροχής αερισμού από τις θεωρητικές σχέσεις (6) και (7) Q_{in} theoretical με αυτής των προσομοιώσεων Q_{in} simulation.....	182

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Σχήμα 1: Τυπικό γράφημα σύγκρισης επίδοσης μοντέλων με τη χρήση των στατιστικών δεικτών MG και VG.....	192
Σχήμα 2: Μικρά ανοίγματα (0,063 m).....	193
Σχήμα 3: Μεσαία ανοίγματα (0,241 m).....	193
Σχήμα 4: Μεγάλα ανοίγματα (0,495 m).....	193
Σχήμα 5: Διαστάσεις υπολογιστικού πεδίου (Tecplot 8.0).....	194
Σχήμα 6: Θέση των τεσσάρων ανιχνευτών συγκέντρωσης He (Tecplot 8.0).....	194
Σχήμα 7: Υπολογιστικό πλέγμα στο επίπεδο y-z του πειράματος 1 (Tecplot 8.0, γεωμετρική επεξεργασία με τον κώδικα DELTA-B).....	195
Σχήμα 8: Υπολογιστικό πλέγμα στο επίπεδο y-z του πειράματος 3 (Tecplot 8.0, γεωμετρική επεξεργασία με τον κώδικα DELTA-B).....	195
Σχήμα 9: Σύγκριση μοντέλου k-ε με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 1, μικρά ανοίγματα – 0,063 m).....	194
Σχήμα 10: Σύγκριση μοντέλου LVEL με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 1, μικρά ανοίγματα – 0,063 m).....	198
Σχήμα 11: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 1 – k-ε μοντέλο) (Tecplot 8.0).....	198
Σχήμα 12: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 1 – LVEL μοντέλο) (Tecplot 8.0).....	199
Σχήμα 13: Σύγκριση μοντέλου k-ε με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 2, μεσαία ανοίγματα – 0,241 m).....	199
Σχήμα 14: Σύγκριση μοντέλου LVEL με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 2, μεσαία ανοίγματα – 0,241 m).....	200
Σχήμα 15: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 2 – k-ε μοντέλο) (Tecplot 8.0).....	200
Σχήμα 16: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 2 – LVEL μοντέλο) (Tecplot 8.0).....	201
Σχήμα 17: Σύγκριση μοντέλου k-ε με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 3, μεγάλα ανοίγματα – 0,495 m).....	202
Σχήμα 18: Σύγκριση μοντέλου LVEL με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 3, μεγάλα ανοίγματα – 0,495 m).....	202
Σχήμα 19: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 3 – k-ε μοντέλο) (Tecplot 8.0).....	203
Σχήμα 20: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 3 – LVEL μοντέλο) (Tecplot 8.0).....	203
Σχήμα 21: Σύγκριση μέσης συγκέντρωσης He πειράματος 1 με τα μοντέλα k-ε και LVEL.....	205

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 22: Σύγκριση μέσης συγκέντρωσης He πειράματος 2 με τα μοντέλα k-ε και LVEL.....	205
Σχήμα 23: Σύγκριση μέσης συγκέντρωσης He πειράματος 3 με τα μοντέλα k-ε και LVEL.....	205
Σχήμα 24: Ογκομετρική συγκέντρωση He (%) των προσομοιώσεων (πείραμα 1- κάτω ανιχνευτής S1, κοντά στην πηγή).....	208
Σχήμα 25: Ογκομετρική συγκέντρωση He (%) των προσομοιώσεων (πείραμα 1- κάτω ανιχνευτής S4, κοντά στο άνοιγμα αερισμού).....	208
Σχήμα 26: Ογκομετρική συγκέντρωση He (%) των προσομοιώσεων (πείραμα 1- άνω ανιχνευτής S3).....	209
Σχήμα 27: Ογκομετρική συγκέντρωση He (%) των προσομοιώσεων (πείραμα 1- άνω ανιχνευτής S4, κοντά στο άνοιγμα αερισμού).....	209
Σχήμα 28: Πείραμα 1(μικρά ανοίγματα): συγκέντρωση He %, αριστερά: ανιχνευτές κοντά στην πηγή (S1, S2), δεξιά: ανιχνευτές κοντά στα ανοίγματα (S3, S4)...	212
Σχήμα 29: NCSRΔ αποτελέσματα με το μοντέλο k-ε και με υπόθεση στρωτής ροής (πείραμα 1 – μικρά ανοίγματα).....	212
Σχήμα 30: Αρχικά και τελικά αποτελέσματα εταιρού JRC (πείραμα 1 – κάτω ανιχνευτές).....	213
Σχήμα 31: Αρχικά και τελικά αποτελέσματα εταιρού JRC (πείραμα 1 – άνω ανιχνευτές).....	213
Σχήμα 32: Πείραμα 2 (μεσαία ανοίγματα): συγκέντρωση He %, αριστερά: ανιχνευτές κοντά στην πηγή (S1, S2), δεξιά: ανιχνευτές κοντά στα ανοίγματα (S3, S4)...	213
Σχήμα 33: Πείραμα 3 (μεγάλα ανοίγματα): συγκέντρωση He %, αριστερά: ανιχνευτές κοντά στην πηγή (S1, S2), δεξιά: ανιχνευτές κοντά στα ανοίγματα (S3, S4)...	214
Σχήμα 34: Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη χρήση των στατιστικών δεικτών MG και VG (πείραμα 1: μικρά ανοίγματα).....	215
Σχήμα 35: Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη χρήση των στατιστικών δεικτών MG και VG (πείραμα 2: μεσαία ανοίγματα).....	215
Σχήμα 36: Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη χρήση των στατιστικών δεικτών MG και VG (πείραμα 3: μεγάλα ανοίγματα).....	216
Σχήμα 37: Όγκος αναφλέξιμου μίγματος και περιεχόμενη μάζα H ₂ σε αυτό (πείραμα 1: μικρά ανοίγματα).....	217
Σχήμα 38: Όγκος αναφλέξιμου μίγματος και περιεχόμενη μάζα H ₂ σε αυτό (πείραμα 2: μεσαία ανοίγματα).....	217
Σχήμα 39: Όγκος αναφλέξιμου μίγματος και περιεχόμενη μάζα H ₂ σε αυτό (πείραμα 3: μεγάλα ανοίγματα).....	217

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Σχήμα 1: Σταθμός ανεφοδιασμού – επισημαίνεται με κίτρινο ο χώρος αποθήκευσης H ₂ (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	224
Σχήμα 2: Χώρος αποθήκευσης με πλέγμα στα ανοίγματα αερισμού και 35 δοχεία χωρητικότητας 250 l (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	224
Σχήμα 3: Σύγκριση χρονικής μεταβολής της πίεσης στο δοχείο μεταξύ πειραματικών δεδομένων, προβλέψεων Tanaka και προβλέψεων GAJET.....	226
Σχήμα 4: Χρονική μεταβολή της "φαινόμενης" διαμέτρου κατά Birch (1984).....	227
Σχήμα 5: Σύγκριση της μέσης συγκέντρωσης H ₂ στο χώρο αποθήκευσης μεταξύ πειραμάτων, προβλέψεων Tanaka και σεναρίων με τον κώδικα ADREA-HF (0,8 mm αρχική διάμετρος έκλυσης, ανοίγματα με 50% ελεύθερη επιφάνεια).....	229
Σχήμα 6: Έκλυση με προσανατολισμό γ, 0,8 mm διαμέτρου, δυτικός άνεμος 2 m/s,	230

Κατάλογος Σχημάτων

	0,5 s.....	
Σχήμα 7:	Έκλυση με προσανατολισμό y, 0,8 mm διαμέτρου, δυτικός άνεμος 2 m/s, 2 s.....	230
Σχήμα 8:	Έκλυση με προσανατολισμό x, 0,8 mm διαμέτρου, δυτικός άνεμος 2 m/s, 0,5 s.....	230
Σχήμα 9:	Έκλυση με προσανατολισμό x, 0,8 mm διαμέτρου, δυτικός άνεμος 2 m/s, 2 s.....	230
Σχήμα 10:	Σύγκριση της μέσης συγκέντρωσης H ₂ στο χώρο αποθήκευσης μεταξύ πειραμάτων, προβλέψεων Tanaka και σεναρίων με τον κώδικα ADREA-HF (8 mm αρχική διάμετρος έκλυσης, ανοίγματα με 50% ελεύθερη επιφάνεια).....	231
Σχήμα 11:	Σύγκριση της μέσης συγκέντρωσης H ₂ στο χώρο αποθήκευσης μεταξύ πειραμάτων, προβλέψεων Tanaka και σεναρίων με τον κώδικα ADREA-HF (8 mm αρχική διάμετρος έκλυσης, ανοίγματα με 100% ελεύθερη επιφάνεια).....	231
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9		
Σχήμα 1:	Τρέχοντες σταθμοί ανεφοδιασμού H ₂ (Fuel Cell 2000)	236
Σχήμα 2:	Σταθμοί ανεφοδιασμού H ₂ στο εγγύς μέλλον (Fuel Cell 2000)	236
Σχήμα 3:	Σχεδιάγραμμα γενικών βημάτων μελέτης εκτίμησης κινδύνου (DNV, 2008)	239
Σχήμα 4:	Διάγραμμα διεργασίας του σταθμού ανεφοδιασμού BBC (Hansen και συν., 2008).....	245
Σχήμα 5:	Γενικό σχέδιο του σταθμού BBC και των παρακείμενων κτιρίων (Hansen και συν., 2008).....	245
Σχήμα 6:	«Βασικός» Πίνακας Κινδύνου (Marangon και συν., 2009).....	246
Σχήμα 7:	Διάγραμμα μεθόδου Αναγνώρισης Επικίνδυνης Κατάστασης (HAZID).....	247
Σχήμα 8:	Μονάδα συμπίεσης (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	249
Σχήμα 9:	Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο C1).....	250
Σχήμα 10:	Εκλυθείσα μάζα H ₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο C1).....	250
Σχήμα 11:	Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο C2).....	250
Σχήμα 12:	Εκλυθείσα μάζα H ₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο C2).....	250
Σχήμα 13:	Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο C3).....	251
Σχήμα 14:	Εκλυθείσα μάζα H ₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο C3).....	251
Σχήμα 15:	Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H ₂ και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 0,8 mm (C1 σενάριο), 1,6 mm (C2 σενάριο) και 8 mm (C3 σενάριο).....	253
Σχήμα 16:	Κατανομή συγκεντρώσεων H ₂ στο επίπεδο y-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 10 s από την έκλυση (σενάριο C1) (Tecplot 8.0).....	254
Σχήμα 17:	Κατανομή συγκεντρώσεων H ₂ στο επίπεδο y-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 10 s από την έκλυση (σενάριο C2) (Tecplot 8.0).....	254
Σχήμα 18:	Κατανομή συγκεντρώσεων H ₂ στο επίπεδο y-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 10 s από την έκλυση (σενάριο C3) (Tecplot 8.0).....	254
Σχήμα 19:	Μονάδα καθαρισμού και ξήρασης (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	255
Σχήμα 20:	Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο P1).....	256
Σχήμα 21:	Εκλυθείσα μάζα H ₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο P1).....	256

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 22: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο P2).....	256
Σχήμα 23: Έκλυθείσα μάζα H ₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο P2).....	256
Σχήμα 24: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H ₂ και όγκος αναφλέξιμου νέφους (5 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 0,8 mm (P1 σενάριο) και 12 mm (P2 σενάριο)).....	257
Σχήμα 25: Κατανομή συγκεντρώσεων H ₂ στο επίπεδο y-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 6 s από την έκλυση (σενάριο P1) (Tecplot 8.0).....	257
Σχήμα 26: Κατανομή συγκεντρώσεων H ₂ στο επίπεδο y-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 6 s από την έκλυση (σενάριο P2) (Tecplot 8.0).....	258
Σχήμα 27: Θάλαμος αποθήκευσης/διανομής (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	258
Σχήμα 28: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάρια ST1/ST2).....	259
Σχήμα 29: Έκλυθείσα μάζα H ₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάρια ST1/ST2).....	259
Σχήμα 30: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάρια ST3/ST4).....	259
Σχήμα 31: Έκλυθείσα μάζα H ₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάρια ST3/ST4).....	259
Σχήμα 32: Υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα 2 ^ο βήματος (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	261
Σχήμα 33: Πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το θάλαμο αποθήκευσης/διανομής – άνεμος 1,5 m/s (Tecplot 8.0).....	261
Σχήμα 34: Υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα σεναρίων ST1/ST2 του 3 ^ο βήματος – έκλυση και διασπορά H ₂ (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	262
Σχήμα 35: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H ₂ και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 0,8 mm και άνεμος 1,5 m/s (ST1 σενάριο) ή 5 m/s (ST2 σενάριο)).....	263
Σχήμα 36: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H ₂ και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 8 mm και άνεμος 1,5 m/s (ST3 σενάριο) ή 5 m/s (ST4 σενάριο)).....	263
Σχήμα 37: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H ₂ 18% στα 10 s μετά την έναρξη της έκλυσης (ST3 σενάριο).....	264
Σχήμα 38: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H ₂ 18% στα 10 s μετά την έναρξη της έκλυσης (ST4 σενάριο).....	264
Σχήμα 39: Μονάδα αποθήκευσης (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	264
Σχήμα 40: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάρια S1/S2 και S3/S4)...	265
Σχήμα 41: Έκλυθείσα μάζα H ₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάρια S1/S2 και S3/S4).....	265
Σχήμα 42: Υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα σεναρίων S1/S2 (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	266
Σχήμα 43: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H ₂ και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 1,6 mm, 12,5 m ³ H ₂ και άνεμος 1,5 m/s (S1 σενάριο) ή 5 m/s (S2 σενάριο)).....	267
Σχήμα 44: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H ₂ και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 1,6 mm, 2,5 m ³ H ₂ και άνεμος 1,5 m/s (S3 σενάριο) ή 5 m/s (S4 σενάριο)).....	267
Σχήμα 45: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H ₂ 0,8% (20% του LFL) στα 14 s μετά την έναρξη της έκλυσης (S1 σενάριο).....	267
Σχήμα 46: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H ₂ 0,8% (20% του LFL) στα 14 s μετά την έναρξη της έκλυσης (S2 σενάριο).....	267

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 47: Περιοχή διάθεσης H ₂ (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	268
Σχήμα 48: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάρια RF1/RF2).....	269
Σχήμα 49: Εκλυθείσα μάζα H ₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάρια RF1/RF2).....	269
Σχήμα 50: Υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα σεναρίων RF1/RF2 (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade).....	270
Σχήμα 51: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H ₂ και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 1,6 mm, 0,15 kg H ₂ και άνεμος 1,5 m/s (RF1 σενάριο) ή 5 m/s (RF2 σενάριο).....	271
Σχήμα 52: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H ₂ 0,8% στα 30 s μετά την έναρξη της έκλυσης (RF1 σενάριο).....	271
Σχήμα 53: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H ₂ 0,8% στα 30 s μετά την έναρξη της έκλυσης (RF2 σενάριο).....	271
Σχήμα 54: Μέγιστη οριζόντια απόσταση αναφλέξιμου νέφους από την έκλυση.....	272
Σχήμα 55: Μέγιστη κατακόρυφη απόσταση αναφλέξιμου νέφους από την έκλυση.....	272

Κατάλογος Σχημάτων

Κατάλογος Πινάκων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πίνακας 1:	Οδηγίες απαίτησης αερισμού κλειστών χώρων (Hall and Greeno, 2007)...	27
Πίνακας 2:	Τιμές παραμέτρων α και δ (ASHRAE, 2005).....	33
Πίνακας 3:	Τιμές για τις παραμέτρους K_H και α (Chartered Institution of Building Services Engineers CIBSE cited in Vitooraporn, 2005-2006, p. 4).....	33
Πίνακας 4:	Εξισώσεις υπολογισμού παροχής εγκαρσιου αερισμού (Awbi, 2005).....	37
Πίνακας 5:	Εξισώσεις υπολογισμού παροχής αερισμού από άνοιγμα σε έναν τοίχο (Awbi, 2005).....	40
Πίνακας 6:	Ιδιότητες έναυσης και καύσης μιγμάτων διαφόρων καυσίμων με αέρα στους 25 °C και 101,3 kPa (ISO/TR 15916).....	50
Πίνακας 7:	Εκλυόμενη ενέργεια μετά την έναυση ομοιογενούς μίγματος καυσίμου/αέρα σε υποθετικό χώρο στάθμευσης 85 m ³ (California Energy Commission, 2004).....	53
Πίνακας 8:	Θερμοφυσικές, χημικές και ιδιότητες καύσης αερίου, υγρού, τήγματος και στερεού πάρα-H ₂ (NASA, 1997).....	54
Πίνακας 9:	Ιδιότητες κοινού H ₂ σε ορισμένες συνθήκες (NASA, 1997).....	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 1:	Μέγιστη συγκέντρωση He των πειραμάτων με 2 ανοίγματα (Swain, 1998).	72
Πίνακας 2:	Συνοπτικός πίνακας πειραμάτων φυσικού αερισμού (Cerchiara και συν., 2009).....	78
Πίνακας 3:	Συνοπτικός πίνακας πειραμάτων μηχανικού αερισμού με ή χωρίς φυσικό αερισμό (Cerchiara και συν., 2009).....	78
Πίνακας 4:	Πειραματικές συνθήκες και αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης He στους 11 ανιχνευτές (y_s : ύψος θέσης έκλυσης, S: παροχή έκλυσης (lt/min), P _o : ατμοσφαιρική πίεση, ΔT : διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου από μετρήσεις στο μέσον του άνω και κάτω ανοίγματος, T _i : Μέση θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, B: ανιχνευτής στο μέσον του κάτω ανοίγματος, T: ανιχνευτής στο μέσον του άνω ανοίγματος) (Barley and Gawlik, 2009).....	92
Πίνακας 5:	Πειραματικά αποτελέσματα και τιμές παραγόντων απλοποιημένου μοντέλου (Barley and Gawlik, 2009).....	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Πίνακας 1:	Επίδραση στερεής επιφάνειας στην έκταση αναφλέξιμου νέφους H ₂ και CH ₄	126
Πίνακας 2:	Συνθήκες πειραμάτων.....	135
Πίνακας 3:	Μελέτη ευαισθησίας στα αποτελέσματα συγκέντρωσης της περίπτωσης 1... 136	136
Πίνακας 4:	Περίληψη συνθηκών μελετηθέντων σεναρίων.....	138

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5:	Σχέσεις υπολογισμού των συνθηκών του ρευστού στα διάφορα επίπεδα (μέθοδος δίσκου Mach).....	148
Πίνακας 6:	Διαφορά έκτασης συγκέντρωσης νέφους LFL και 50% LFL μεταξύ ιδανικού και πραγματικού αερίου.....	152

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Πίνακας 1:	Συνοπτικός πίνακας πειραμάτων φυσικού αερισμού.....	162
Πίνακας 2:	Τιμές παροχής αερισμού Q_{in} και μέσης πυκνότητας ρ_{avg} από πειραματικά δεδομένα και συγκέντρωση H_2 στη θέση S5.....	178
Πίνακας 3:	Τιμές παροχής εισαγωγής φρέσκου αέρα και απαγωγής μίγματος H_2 /αέρα προσομοιώσεων πειραμάτων έκλυσης H_2 40 l/min.....	179
Πίνακας 4:	Τιμές παροχής εισαγωγής φρέσκου αέρα και απαγωγής μίγματος H_2 /αέρα προσομοιώσεων πειραμάτων 90 l/min έκλυσης H_2	179

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Πίνακας 1:	Ύψος ανοιγμάτων μελετηθέντων πειραμάτων του Swain (Swain, 1998).....	193
Πίνακας 2:	Περίληψη των προσομοιώσεων.....	193
Πίνακας 3:	Χαρακτηριστικά υπολογιστικού πλέγματος.....	194
Πίνακας 4:	Οριακές συνθήκες.....	196
Πίνακας 5:	Χαρακτηριστικά υπολογιστικού χωρίου και πλέγματος των 5 προσομοιώσεων του πειράματος 1 (μικρά ανοίγματα).....	206
Πίνακας 6:	Βασικά χαρακτηριστικά μεθοδολογιών CFD I (κώδικας, μοντέλο και σχήματα διακριτοποίησης).....	210
Πίνακας 7:	Βασικά χαρακτηριστικά μεθοδολογιών CFD II (χαρακτηριστικά πλέγματος, χρονικό βήμα, αρχικές και οριακές συνθήκες).....	210
Πίνακας 8:	Στατιστικοί δείκτες επίδοσης μεθοδολογιών CFD (με έντονο μπλε χρώμα επισημαίνονται οι τιμές που ήταν εκτός των κριτηρίων αποδοχής).....	214

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Πίνακας 1:	Περίληψη μελετηθέντων πειραμάτων Tanaka (Tanaka, 2005).....	225
Πίνακας 2:	Χαρακτηριστικά υπολογιστικού πλέγματος.....	228

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Πίνακας 1:	Πίνακας κινδύνου (DNV, 2008).....	240
Πίνακας 2:	Ποιοτική εκτίμηση της σπουδαιότητας διαφόρων παραγόντων στην αβεβαιότητα των υπολογισθέντων κινδύνων (τα αστέρια σηματοδοτούν τη σπουδαιότητα) (Pasman, 2009).....	241
Πίνακας 3:	Τεχνικά χαρακτηριστικά σταθμού BBC (Hansen και συν., 2008).....	244
Πίνακας 4:	Συνθήκες των 15 σεναρίων του σταθμού BBC.....	248
Πίνακας 5:	Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων μονάδας συμπίεσης.....	252
Πίνακας 6:	Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων μονάδας καθαρισμού και ξήρανσης.....	256
Πίνακας 7:	Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής.....	260
Πίνακας 8:	Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων στη μονάδα αποθήκευσης.....	265
Πίνακας 9:	Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων στη μονάδα διάθεσης.....	269
Πίνακας 10:	Σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των κωδικών ADREA-HF και Effects 7.6 και υπολογισμός των αντίστοιχων αποστάσεων επικινδυνότητας/ζημίας (Marangon, 2009).....	273

Εισαγωγή

Οι κλιματικές αλλαγές, η μόλυνση του περιβάλλοντος και η ενεργειακή αστάθεια και αβεβαιότητα είναι σημαντικά προβλήματα της εποχής μας. Για να δοθεί λύση στα προβλήματα αυτά απαιτούνται αλλαγές στο ενεργειακό μας σύστημα. Οι αλλαγές θα πρέπει να κατευθυνθούν προς μια καθαρή, διαρκή, αξιόπιστη και χαμηλού κόστους παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα με παράλληλη αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Την τελευταία δεκαετία έχουν δημοσιευτεί μελέτες που προτείνουν την εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Κατά τους Jacobson και Masters (2001)¹, οι Ηνωμένες Πολιτείες μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του Πρωτοκόλλου Kyoto για τη μείωση των εκπομπών CO₂ με αντικατάσταση του 60% της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα (άνθρακες) από περίπου 230.000 ανεμογεννήτριες. Επίσης, οι Ftenakis και συν. (2009)² ανέλυσαν τεχνικά, γεωγραφικά και οικονομικά τη δυνατότητα χρησιμοποίησης της ηλιακής ενέργειας για την τροφοδοσία των ενεργειακών αναγκών των Ηνωμένων Πολιτειών και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι είναι εφικτή η αντικατάσταση της χρήσης των συμβατικών ορυκτών καυσίμων σε τέτοιο βαθμό ώστε να ανταποκριθούν στους πιο αυστηρούς στόχους για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών. Ακόμη, ο Jacobson (2009)³ αξιολόγησε μακροπρόθεσμα ενεργειακά συστήματα βάσει περιβαλλοντικών και άλλων κριτηρίων και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αιολική, υδάτινη και ηλιακή ενέργεια (Water Wind and Solar) είναι ανώτερες της πυρηνικής, συμβατικής (ορυκτά καύσιμα) και αυτής των βιο-καυσίμων. Μελέτησε αυτές τις τεχνολογίες διότι έχουν μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και άλλων αερίων ρύπων ανά μονάδα αποδιδόμενης ενέργειας από το συνολικό κύκλο ζωής του συστήματος. Επίσης, οι τεχνολογίες αυτές έχουν μικρές επιπτώσεις στην χλωροπανίδα, στη ρύπανση υδάτινων πόρων και στη γη, η δε διάθεση των αποβλήτων τους δεν εγείρει σημαντικές ανησυχίες. Τέλος, οι WWS τεχνολογίες βασίζονται σε πρωτογενείς πόρους οι οποίοι είναι ανανεώσιμοι ή ανακυκλώσιμοι. Για την ωριαία και εποχιακή μεταβλητότητα των WWS πρότεινε τη χρήση γεωγραφικά κατανεμημένων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συνέστησε επίσης τη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας (BEV) και την αποθήκευση της ενέργειας σε θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες και υπό τη μορφή H₂. Ακόμη, συνέστησε ως μέτρο αντιμετώπισης της ρύπανσης από τον τομέα μεταφορών τη χρήση ηλεκτρικών

¹ Jacobson, M.Z. and Masters, G.M., (2001), "Exploiting wind versus coal", Science, Vol. 293, pp. 1438

² Ftenakis, V.M., Mason, J.E. and Zweibel K., (2009), "The technical, geographical and economic feasibility of solar energy to supply the energy needs of the U.S.", Energy Policy, Vol. 37, pp. 387-399

³ Jacobson M.Z., (2009), "Review of solutions to global warming, air pollution and energy security", Energy and Environmental Science, Vol. 2, pp. 148-173

οχημάτων μπαταριών και ενεργειακών συστοιχιών με H_2 παραχθέν από τις WWS. Πηγαίνοντας ένα βήμα παρακάτω, οι Jacobson και Delucchi (2009)⁴ συμπέραναν ότι είναι τεχνικά εφικτή η παγκόσμια ενεργειακή τροφοδοσία με τη χρήση των WWS από το 2030 αλλά πιθανότατα τέτοιου είδους αλλαγή θα χρειαστεί περισσότερο χρόνο λόγω των δυσκολιών εφαρμογής τέτοιων πολιτικών. Θεωρούν όμως ότι είναι πραγματοποιήσιμη η τροφοδοσία των νέων (αυξανόμενων) ενεργειακών αναγκών από τις WWS από το 2030 και η αντικατάσταση όλων των υπαρχόντων συμβατικών τεχνολογιών ενέργειας από τις WWS από το 2050⁵. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι βάση πληροφοριών που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυσή τους βασίζεται κατά μεγάλο ποσοστό σε δεδομένα από το διαδίκτυο, η αξιοπιστία των οποίων είναι αμφισβητήσιμη. Από την άλλη πλευρά, τέτοιου είδους δραστική αντικατάσταση απαιτεί αλλαγές σε πολιτικό και κοινωνικό επίπεδο, κάτι που φαντάζει και πιθανότατα είναι κατ' ουσίαν αρκετά δύσκολο.

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε H_2 μέσω της φωτο-οξειδωσης του H_2O είναι μια σχετικά καθαρή και βιώσιμη μέθοδος παραγωγής H_2 από ανανεώσιμες πηγές⁶. Η μετατροπή μπορεί να λάβει χώρα σε συστήματα φωτοχημικά, φωτοβιολογικά, συστήματα ημιαγωγών ή υβριδικά (τα οποία συνδυάζουν τις παραπάνω περιπτώσεις)⁷. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις τεχνολογίες πρέπει να πληρούν κάποιες προδιαγραφές όπως: σταθερότητα στο νερό, αντοχή στη φωτο-διάβρωση κατά την ακτινοβόληση, ενώ το διάκενο εύρους ζώνης (bandgap) πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να απορροφούν την ορατή ή υπεριώδη ακτινοβολία αλλά αρκετά μεγάλο ώστε να μην καταναλώνονται κατά τη διαδικασία και να είναι χημικά αδρανή.

Η ετήσια παραγωγή H_2 ανέρχεται στα 368 τρισεκατομμύρια m^3 , όπου απορροφούνται κατά 40% από τις χημικές βιομηχανίες και κατά 40% από τα διυλιστήρια. Το 2005, το 48% των αναγκών σε H_2 προήλθε από την αναμόρφωση φυσικού αερίου, το 30% από την αναμόρφωση πετρελαίου/νάφθας, το 18% από την αεριοποίηση του άνθρακα ή πυρόλυση, το 3,9% από την ηλεκτρολύση του νερού και το υπόλοιπο 0,1% από άλλες πηγές⁸. Με τις τρέχουσες λοιπόν τεχνολογίες παραγωγής H_2 , ούτε μειώνεται η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα ούτε οι εκπομπές CO_2 πράγμα που σημαίνει ότι η χρήση του H_2 ως φορέα ενέργειας, εάν αξιολογηθεί στο σύνολό της, προς το παρόν δεν είναι «καθαρή» τεχνολογία.

Η χρήση του H_2 ως φορέα ενέργειας έχει λάβει ιδιαίτερης προσοχής σε παγκόσμιο επίπεδο. Παραδειγματός χάριν, το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα-Πλαίσιο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης χρηματοδοτεί την ανάπτυξη τεχνολογιών H_2 και

⁴ Jacobson, M.Z. and Delucchi M.A.(2009), “A path to sustainable energy by 2030”, Scientific American

⁵ Jacobson, M. Z. and Delucchi, M. A., (2010), “Providing all global energy with wind, water and solar power, Part I: Technologies, energy sources, quantities and areas infrastructure and materials”, Energy Policy, doi: 10.1016/j.enpol.2010.11.040

⁶ Vayssieres L., “On solar hydrogen and nanotechnology”, Willey, Singapore, 2009

⁷ Δασκαλάκη Β., “Παραγωγή υδρογόνου με χρήση ηλιακής ακτινοβολίας”, διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2009

⁸ Lemus, R.G and Duart J.M., (2010), “Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable energies”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, pp. 3929-3936

ενεργειακών συστοιχιών από το 1980 μέχρι σήμερα. Οι χρηματοδοτήσεις για την έρευνα, τεχνολογική ανάπτυξη και επίδειξη σ' αυτόν τον τομέα έχουν αυξηθεί από € 8 εκατομμύρια για την περίοδο 1988-1992 (2^ο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Πλαίσιο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, FP2) σε περισσότερα από € 275 εκατομμύρια για την περίοδο 2002-2006 (6^ο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Πλαίσιο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, FP6)⁹. Επιπλέον, για την προώθηση των τεχνολογιών H₂ και ενεργειακών συστοιχιών στην Ευρώπη, δημιουργήθηκε το 2008 μια σύμπραξη δημοσίου και ιδιωτικού τομέα, η λεγόμενη «Fuel Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative – FCH JU», η οποία αποφασίζει ετησίως και μέχρι το έτος 2013, για την χρηματοδότηση σχετικών προγραμμάτων. Η συνολική χρηματοδότηση ανέρχεται στα € 470 εκατομμύρια¹⁰. Παρόμοια ή ίσως μεγαλύτερης προσοχής από πλευράς χρηματοδότησης έχει λάβει αυτή η τεχνολογία στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ο Bush ανακοίνωσε το 2003 το λεγόμενο 5ετές πρόγραμμα «Hydrogen Fuel Initiative» με χρηματοδότηση \$ 1,2 δισεκατομμύρια¹¹. Επίσης, όπως έχει ανακοινωθεί, το πρόγραμμα «Energy Hydrogen Program» κατευθύνεται προς την υλοποίηση της ευρείας διάθεσης οχημάτων H₂/ενεργειακών συστοιχιών και των αντίστοιχων υποδομών για το 2015.

Το H₂ χρησιμοποιείται εδώ και τουλάχιστον 100 χρόνια σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Οι φυσικές ιδιότητες του H₂ έχουν λοιπόν δεόντως διαπιστωθεί. Ωστόσο, οι τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διάθεσης του H₂ που εφαρμόζονται στις χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες είναι πολύ δαπανηρές για την εφαρμογή τους στις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, για τον χαρακτηρισμό των κινδύνων που εγκυμονούν κατά τη χρήση του H₂ ως φορέα ενέργειας είναι απαραίτητη η μελέτη ρεαλιστικών συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας¹² οι οποίες εκ των πραγμάτων είναι διαφορετικές από αυτές που επικρατούν στις χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες. Επιπλέον, για την αποδοχή του H₂ ως εναλλακτική πηγή ενέργειας, τα επίπεδα ασφάλειας πρέπει να είναι τουλάχιστον συγκρίσιμα με αυτά των συμβατικών καυσίμων. Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρονται οι βασικές ιδιότητες του H₂, φυσικές και χημικές και επιχειρείται ο συσχετισμός των ιδιοτήτων του με θέματα ασφάλειας. Παρουσιάζεται επίσης μια σύγκριση των ιδιοτήτων του H₂ με αυτές των συμβατικών καυσίμων. Το H₂ δεν θεωρείται πιο επικίνδυνος φορέας ενέργειας από τα συμβατικά καύσιμα, ωστόσο συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο¹³. Οι κυριότερες ιδιότητες του H₂ που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής για θέματα ασφάλειας και που το διαφοροποιούν από τα υπόλοιπα συμβατικά καύσιμα είναι: τα ευρύτερα όρια αναφλεξιμότητας, η πολύ χαμηλή ελάχιστη ενέργεια έναυσης, το μικρότερο μέγιστο ασφαλές πειραματικό κενό, η μεγαλύτερη θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας, η μεγαλύτερη ταχύτητα στρωτής καύσης, η υψηλή διαχυτότητά του και η τάση του να προσβάλλει σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις το μαλακό χάλυβα προκαλώντας εξανθράκωση και

⁹ Introducing Hydrogen as an energy carrier: Safety, regulatory and public acceptance issues, Results from the EU Research Framework Programmes, 2006, EUR 22002

¹⁰ http://cordis.europa.eu/fp7/energy/about-hydro_en.html

¹¹ <http://www.energy.gov/energysources/hydrogen.htm>

¹² Hoagland W., (2009), “The international energy agency hydrogen implementing agreement task on hydrogen safety”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio

¹³ Breitung W., (2005), “Analysis methodology for hydrogen behaviour in accident scenarios”, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

ευθραυστοποίηση. Ωστόσο το H_2 έχει υψηλότερη θερμοκρασία αυτανάφλεξης ενώ η βασικότερη ιδιότητά του που λειτουργεί ευνοϊκά σε θέματα ασφάλειας σε ανοιχτούς χώρους ή χώρους μερικώς κλειστούς είναι η χαμηλή πυκνότητά του. Το H_2 είναι πολύ πιο ελαφρύ από τον αέρα με συνέπεια να διαφεύγει ταχέως προς τα πάνω πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει με τους βαρύτερους υδρογονάνθρακες.

Στην περίπτωση ατυχημάτων των τεχνολογιών και εγκαταστάσεων υποδομής H_2 η αλληλουχία των φυσικών φαινομένων είναι η έκλυση, η διασπορά και η έναυση η οποία μπορεί να καταλήξει σε φωτιά ή έκρηξη. Η αρχική φάση προκύπτει από τη διαρροή του H_2 από το δοχείο αποθήκευσης ή από κάποιο άλλο στοιχείο του συστήματος. Στο Κεφάλαιο 2 επιχειρείται η περιγραφή υποηχητικών εκλύσεων και ο χαρακτηρισμός τους βάσει της διαστατικής ανάλυσης ενώ στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες μοντελοποίησης της περιοχής πλησίον της ηχητικής έκλυσης. Μετά την πρώτη φάση του ατυχήματος, ακολουθεί η διασπορά, κατά την οποία το H_2 αναμιγνύεται με τον περιβάλλοντα αέρα. Το H_2 εν συνεχεία είτε θα αυτοαναφλεγεί είτε θα αναφλεγεί παρουσία κάποιας πηγής έναυσης. Προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος ανάφλεξης και καύσης, είναι απαραίτητο να μελετηθεί η χωρική και χρονική κατανομή του H_2 στον περιβάλλοντα χώρο. Ανάλογα με την γεωμετρία του χώρου, την παροχή έκλυσης, το συνολικό εκλυθέν H_2 και την προϋπάρχουσα κινητική κατάσταση του χώρου, το H_2 μπορεί να δημιουργήσει αμελητέο ή σημαντικό αναφλέξιμο νέφος ή ακόμα και αναφλέξιμο/εκρηκτικό νέφος.

Σε πολλές περιπτώσεις των εφαρμογών τεχνολογιών H_2 ως φορέα ενέργειας, οι εγκαταστάσεις θα βρίσκονται σε κλειστούς χώρους όπως παραδείγματος χάριν στην περίπτωση αποθήκευσης H_2 σε σταθμό ανεφοδιασμού ή του χώρου υποδοχής ενεργειακής συστοιχίας σε συνδυασμό με την αποθήκευση και διανομή του H_2 . Η τοποθέτηση των συστημάτων σε κλειστούς χώρους κρίνεται συχνά σκόπιμη για λόγους ασφάλειας και απομόνωσης τους από το ευρύτερο περιβάλλον και τον τελικό αποδέκτη ή το κοινό.

Η συμπεριφορά του εκλυόμενου H_2 σε κλειστούς χώρους εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες έκλυσης (παροχή, ταχύτητα έκλυσης, θερμοκρασία, θέση έκλυσης και κατεύθυνση), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου (μέγεθος και γεωμετρία, θέση και μέγεθος ανοιγμάτων αερισμού, παρουσία εμποδίων), τις ατμοσφαιρικές συνθήκες μέσα στο χώρο (θερμοκρασία, μηχανικός αερισμός) και αυτές του εξωτερικού χώρου (θερμοκρασία, παρουσία, ένταση και κατεύθυνση ανέμου).

Για εκλύσεις σε κλειστούς χώρους απουσία αερισμού, ο κίνδυνος κατά την ανάλυση των δυσμενέστερων σεναρίων επηρεάζεται κυρίως από τον συνολικό όγκο του εκλυθέντος H_2 και λιγότερο από την παροχή έκλυσής του και αυτό γιατί το H_2 δύναται να αναφλεγεί σε μικρό χρονικό διάστημα από την έναρξη της έκλυσης. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η υπερπίεση, η προκύπτουσα από καθυστερημένη ανάφλεξη, επισωρευμένου αναφλέξιμου νέφους δημιουργεί συνήθως μεγαλύτερο κίνδυνο από αυτόν μιας πρώιμης ανάφλεξης. Η πρώιμη ανάφλεξη δημιουργεί συνήθως φλεγόμενη δέσμη (burning jet) ή σταθερή φλόγα (standing flame). Το μέγεθος της φλόγας εξαρτάται από την παροχή έκλυσης. Στην περίπτωση καθυστερημένης ανάφλεξης, το μέγεθος των υπερπίεσεων εξαρτάται από την κινητική κατάσταση του ρευστού στον χώρο. Αν ο όγκος του εκλυθέντος H_2 είναι μικρότερος

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

από 4.1% του συνολικού όγκου του χώρου, ο κίνδυνος καύσης θα μηδενιστεί με την ομοιόμορφη κατανομή του H_2 στο χώρο. Αν όμως ο όγκος του εκλυθέντος H_2 είναι μεγαλύτερος από 4.1%, ο κίνδυνος καύσης θα παραμείνει έως ότου ο χώρος εξαερωθεί ή λάβει χώρα η καύση. Ειδικότερα, εάν η έκλυση έχει σχετικά μικρή αρχική ορμή το H_2 θα ανέλθει λόγω της άνωσης και θα σχηματίσει στρώμα μίγματος H_2 /αέρα στην οροφή. Τα χαρακτηριστικά του στρώματος όπως το μέγεθος και η συγκέντρωση είναι σημαντικές παράμετροι για την εκτίμηση του κινδύνου. Με την παρέλευση της έκλυσης, το στρώμα κατέρχεται προς το έδαφος λόγω μοριακής διάχυσης. Η διάχυση μπορεί να διαρκέσει έως και ώρες ή ακόμα και μέρες κατά περίπτωση. Τελικά το H_2 θα κατανεμηθεί ομοιογενώς στο χώρο. Από την άλλη, στην περίπτωση έκλυσης με σημαντική αρχική ορμή, η επίδραση της άνωσης είναι ασθενής. Αναμένεται έντονη ανάμιξη λόγω προσκρούσεων της δέσμης στην οροφή και σε άλλα εμπόδια και εμφάνιση ανακυκλοφορίας. Λόγω αυτών των φαινομένων η κατανομή H_2 μπορεί να είναι ακόμα και κατά τη διάρκεια της έκλυσης ομοιογενής στο μεγαλύτερο μέρος της.

Λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας του H_2 από τον αέρα, ο φυσικός αερισμός φαίνεται να είναι ένα αποδοτικό μέσο για τον έλεγχο και περιορισμό σχηματισμού επικίνδυνου μίγματος H_2 /αέρα σε κλειστούς χώρους. Σ' αυτήν την περίπτωση ο κίνδυνος κατά την ανάλυση των δυσμενέστερων σεναρίων συνήθως εξαρτάται τόσο από την παροχή έκλυσης όσο από τον συνολικό όγκο της έκλυσης. Η επίδραση καθενός εκ των δύο παραμέτρων εξαρτάται από την γεωμετρία του χώρου και την θέση της έκλυσης. Κατάλληλος σχεδιασμός του χώρου και του αερισμού μπορεί να μειώσει τον υφιστάμενο κίνδυνο είτε εμποδίζοντας την εμφάνιση αναφλέξιμου νέφους στην περίπτωση ασθενών εκλύσεων είτε μεταφέροντας τις επικίνδυνες συνέπειες εκτός του χώρου στην περίπτωση μεγαλύτερων εκλύσεων. Τα ανοίγματα κοντά στην οροφή του χώρου επιτρέπουν την έξοδο του πλούσιου μίγματος H_2 -αέρα αρκεί να υπάρχουν ανοίγματα κοντά στο έδαφος τα οποία επιτρέπουν την είσοδο καθαρού (φρέσκου) αέρα ο οποίος ουσιαστικά μετατοπίζει το πλούσιο μίγμα H_2 -αέρα. Εάν ο καθαρός αέρας εισέρχεται από το ίδιο άνοιγμα που εξέρχεται το μίγμα H_2 -αέρα τότε η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης του H_2 από το χώρο μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται κυρίως ο φυσικός αερισμός και οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του καθώς σημαντικό μέρος της εργασίας αναφέρεται σε υπολογιστικές μελέτες έκλυσης H_2 σε κλειστό χώρο παρουσία φυσικού αερισμού. Επιπλέον, η επίδραση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου καθώς και του ανέμου πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν εφόσον είναι δυνατό να λειτουργήσουν είτε ευεργετικά είτε επιζήμια.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το H_2 χρησιμοποιείται ήδη σε κλειστούς χώρους στη βιομηχανία. Ωστόσο, οι ισχύοντες Κώδικες (κανονισμοί) και Προδιαγραφές είναι είτε μη πρακτικοί είτε ασύμβατοι για τις εφαρμογές H_2 ως φορέα ενέργειας. Οι περισσότεροι κώδικες που εφαρμόζονται για το H_2 σήμερα, όπως παραδείγματος χάριν στην περίπτωση εγκατάστασης συστοιχιών κυψελών καυσίμου σε συνδυασμό με το H_2 , αναφέρονται είτε στο φυσικό αέριο είτε στο LPG, τα οποία έχουν διαφορετική συμπεριφορά από αυτήν του H_2 . Στο Κεφάλαιο 9 αναφέρεται μια γενική περιγραφή των σημαντικότερων Κωδίκων και Προδιαγραφών που χρησιμοποιούνται έως σήμερα για τη μεταφορά, αποθήκευση και διανομή του H_2 .

Πειραματικές μελέτες έκλυσης και διασποράς H₂ (ή He ως υποκατάστατο για λόγους ασφαλείας) έχουν δημοσιευτεί στο παρελθόν. Στην περίπτωση εκλύσεων σε κλειστούς χώρους, τα πειράματα περιλαμβάνουν είτε πλήρως κλειστούς χώρους είτε χώρους με ανοίγματα αερισμού, ο δε όγκος των χώρων κυμαίνεται από 1 έως 80 m³. Η παροχή έκλυσης κυμαίνεται από 0,1 NI/min έως περίπου 1.900 NI/min. Οι μετρήσεις συνήθως περιορίζονται σε μετρήσεις συγκέντρωσης H₂ μέσα στο χώρο ιδιαίτερα κοντά στην έκλυση και σε κατακόρυφες ή οριζόντιες θέσεις από αυτήν και σε κάποια πειράματα κοντά στα ανοίγματα αερισμού. Σε μερικά από τα πειράματα ελήφθησαν μετρήσεις της ταχύτητας καθώς και οπτική παρακολούθηση του νέφους H₂/αέρα. Στο Κεφάλαιο 3 επιχειρείται μια ανασκόπηση των σχετικών πειραμάτων δίνοντας έμφαση σ' αυτά κλειστού χώρου. Όπως αναφέρεται και στο εσωτερικό πρόγραμμα InsHyde¹⁴ του HySafe, είναι απαραίτητη η περαιτέρω πειραματική μελέτη της έκλυσης και διασποράς H₂/He προκειμένου να εξεταστούν ευρύτερες συνθήκες όπως η θέση, ο προσανατολισμός και η ένταση της έκλυσης, ο προσανατολισμός και το πλήθος και εύρος των ανοιγμάτων αερισμού, η παρουσία εμποδίων στο χώρο και κεκλιμένες οροφές αυτού, υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες (άνεμος και θερμοκρασία) οι οποίες θα πρέπει να καταγεγραφούν.

Από πλευράς υπολογιστικών μελετών, με τη χρήση κωδικών CFD, έχουν δημοσιευτεί κάποιες μελέτες που συνδέονται με πιθανά ατυχήματα στοιχείων υποδομής των τεχνολογιών H₂. Οι μελέτες στοχεύουν (ή θα πρέπει να στοχεύουν) στην περιγραφή της εξέλιξης και των αποτελεσμάτων του ατυχήματος, την ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων αποσόβησης κινδύνων, τη δημιουργία αξιόπιστης βάσης δεδομένων για τον καθορισμό Κωδικών και Προδιαγραφών ενώ θα πρέπει παράλληλα να έχουν υποστηρικτικό χαρακτήρα για την ανάπτυξη ασφαλών τεχνολογιών. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των κυριότερων υπολογιστικών μελετών ενώ στο Κεφάλαιο 4 αναφέρονται το πιο διαδεδομένα μαθηματικά πρότυπα προσομοίωσης της τύρβης. Από την ανασκόπηση των υπολογιστικών μελετών αναγνωρίζονται τα παρακάτω ζητήματα ως εκκρεμή: α) έλλειψη πειραματικών δεδομένων για την αξιολόγηση των μεθοδολογιών CFD ισχυρών τυρβωδών δεσμών, προσκρουόμενων δεσμών σε τοίχους, εκλύσεις σε πολύπλοκες γεωμετρίες και σήραγγες, β) έλεγχος αξιοπιστίας της μεθόδου αντικατάστασης της πηγής έκλυσης υπο-εκτονωμένων δεσμών από τις λεγόμενες «φαινόμενες» πηγές, γ) έλεγχος προβλέψεων του φαινομένου διαστρωμάτωσης από ασθeneίς εκλύσεις ή εκλύσεις λόγω διαπερατότητας αλλά και των μεθόδων περιγραφής της διαπερατότητας εν γένει, δ) προβλέψεις φυσικού και μηχανικού αερισμού και ε) πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες σεναρίων έκλυσης H₂ σε σταθμούς ανεφοδιασμού.

Τα φαινόμενα λοιπόν που συνδέονται με την ασφάλεια των τεχνολογιών H₂ ως φορέα ενέργειας δεν έχουν επιλυθεί ακόμα τόσο από πλευράς πληρότητας πειραματικών δεδομένων σε όλο το εύρος των αναμενόμενων συνθηκών όσο από πλευράς

¹⁴ Venetsanos, A.G., Adams, P., Azkarate, I,M Bengaouer, A., Brett, L. Carcassi, M,N,M Enebo, A., Gallego, E., Gavrikov, A.I., Hansen, O.R., Hawksworth, S., Jordan, T., Kessler, A., Kumar, S., Molkov, V., Nilsen, S., Reinecke, E., Stöcklin, M., Schmidtchen, U., Teodorcyk, A., Tigreat, D., Versloot, N.H.A., "On the use of hydrogen in confined spaces: Results from the internal project InsHyde", Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, 16-18 September 2009

ανάπτυξης και ελέγχου της αξιοπιστίας των υπολογιστικών μέσων όπως οι μεθοδολογίες CFD¹⁵.

Σ' αυτήν τη διατριβή επιχειρείται η συλλογή πληροφοριών και συστηματική μελέτη προς αυτήν την κατεύθυνση. Καταρχήν παρουσιάζεται ο έλεγχος της αξιοπιστίας και καταλληλότητας του κώδικα ADREA-HF για τη μελέτη σεναρίων έκλυσης και διασποράς H₂ (ή He ως υποκατάστατο για λόγους ασφάλειας) σε κλειστούς χώρους. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης H₂ σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό. Τα πειράματα αφορούν την έκλυση και διασπορά H₂ από στατικό σύστημα συστοιχίας κυψελών καυσίμου ισχύος 4,8 kW. Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός των απαιτήσεων φυσικού ή μηχανικού αερισμού του χώρου υποδοχής της συστοιχίας προκειμένου αυτός να μην χαρακτηριστεί ως ζώνη 2 βάσει των οδηγιών ATEX. Οι υπολογιστικές προβλέψεις είναι στην πλειοψηφία τους σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Παρουσιάζεται επίσης μια γενική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του φυσικού αερισμού με τη χρήση ενός απλοποιημένου μοντέλου μηδενικής διάστασης. Οι τιμές παροχής του φυσικού αερισμού των προσομοιώσεων συγκρίνονται με αυτές από τις θεωρητικές σχέσεις, τις προκύπτουσες από το Κεφάλαιο 2. Βρέθηκε ότι οι θεωρητικές σχέσεις υποεκτιμούν συστηματικά τον φυσικό αερισμό¹⁶. Η υποεκτίμηση είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση ανοιγμάτων μόνο κοντά στην οροφή τοποθετημένων σ' έναν μόνο τοίχο. Παρόμοιες σχέσεις προτείνονται στις Ιταλικές Οδηγίες (CEI EN-60079-10)¹⁷ για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας ATEX ωστόσο δεν έχουν αξιολογηθεί εκτενώς με πειραματικά δεδομένα, δεν περιλαμβάνουν την ενδεχόμενη αύξηση του αερισμού που μπορεί να προκαλέσει η έκλυση ανωστικού αερίου υπό ορισμένες συνθήκες, ούτε την πιθανή παρεμπόδιση του από τη θερμική ανακυκλοφορία (όταν δηλαδή ο εξωτερικός αέρας έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη απ' αυτήν στο εσωτερικό του χώρου) και τέλος δεν προτείνονται σχέσεις που συνδυάζουν τα παραπάνω φαινόμενα με την παρουσία ανέμου. Επίσης, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται η υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης He (αντί H₂) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με 3 διαφορετικές διατάξεις φυσικού αερισμού. Στην πρώτη φάση γίνεται αξιολόγηση της επίδοσης δυο μαθηματικών μοντέλων τύρβης, του k-ε και LVEL, με τα πειραματικά δεδομένα. Οι προβλέψεις των δυο μοντέλων έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια μελετάται η επίδραση της υπόθεσης συμμετρίας, της επέκτασης του πλέγματος σε όλες τις κατευθύνσεις εκτός των φυσικών ορίων της πειραματικής εγκατάστασης και της πύκνωσης και ομοιομορφίας αυτού. Η απουσία επέκτασης του πλέγματος κατά την οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση δε δημιουργεί μόνο έντονες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης He αλλά και χειρότερες προβλέψεις στους ανιχνευτές. Οι συγκεντρώσεις He επηρεάζονται επίσης από την ομοιομορφία και πύκνωση του πλέγματος μέσα στο χώρο, δίνοντας πολύ καλές προβλέψεις στην περίπτωση

¹⁵ Molkov M., "Hydrogen safety research: State of the art", 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Edinburgh 2007

¹⁶ Papanikolaou, E.A., Venetsanos, A.G., Cerchiara, G.M., Carcassi, M. and Markatos, N., (2011), "CFD simulations on small hydrogen releases inside a ventilated facility and assessment of ventilation efficiency", International Journal of Hydrogen Energy, The 3rd Annual International Conference on Hydrogen Safety, Vol. 36, Issue 3, pp. 2597-2605

¹⁷ CEI EN 60079-10, (2004), "Electrical apparatus for explosive atmospheres – part 10: classification of hazardous areas", 2nd edition

πυκνότερου και ομοιόμορφου πλέγματος. Έπειτα, συγκρίνονται 4 διαφορετικές μεθοδολογίες CFD με 4 διαφορετικούς κώδικες και μοντέλα όπου αναδεικνύεται και πάλι η επίδραση των οριακών συνθηκών στις προβλέψεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προσομοιώσεις με αποτελέσματα πολύ κοντά στα πειραματικά προβλέπουν διαφορετικούς όγκους αναφλέξιμου νέφους¹⁸. Για τη σύγκριση λοιπόν διαφόρων μεθοδολογιών CFD σεναρίων ασφάλειας είναι σκόπιμη η χρήση πειραμάτων με περισσότερες μετρήσεις συγκέντρωσης καθώς και οπτικής απεικόνισης του εκλυθέντος αερίου. Μετρήσεις θα πρέπει να ληφθούν επίσης για τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία και ένταση και κατεύθυνση ανέμου.

Στο επόμενο στάδιο της διατριβής παρουσιάζονται εφαρμογές του κώδικα ADREA-HF σε ρεαλιστικά σενάρια με πολύπλοκες γεωμετρίες. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης H₂ σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινήτων πραγματικής κλίμακας¹⁹. Οι υπολογισμοί των συνθηκών έκλυσης από το δοχείο αποθήκευσης 40 MPa χρησιμοποιώντας πραγματικές ιδιότητες αερίου και υποθέτοντας ισηντροπική μεταβολή βρίσκονται πολύ κοντά στα πειραματικά δεδομένα. Οι προβλέψεις διασποράς H₂ δείχνουν ότι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την κατανομή του στο χώρο είναι ο, σχετικός με τα εμπόδια, προσανατολισμός της έκλυσης. Ασθενέστερη επίδραση στην κατανομή έχει ο προσανατολισμός ήπιου ανέμου. Έπειτα, παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 9 μια μελέτη εκτίμησης κινδύνου ενός υποθετικού σταθμού ανεφοδιασμού H₂ με έμφαση στην παρουσίαση της ποσοτικής ανάλυσης των επιπτώσεων των σεναρίων ατυχήματος²⁰. Γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των σταδίων που ακολουθούνται για τον προσδιορισμό των πιο επικίνδυνων σεναρίων: (α) ο προσδιορισμός των ατυχημάτων με τη μέθοδο Αναγνώρισης Επικίνδυνης Κατάστασης (HAZID), (β) η ανάλυση ακολουθίας πιθανών γεγονότων λαμβάνοντας υπ' όψιν όχι μόνο τα συστήματα ασφαλείας και εκτάκτου ανάγκης αλλά και των πιθανοτήτων έναυσης H₂ και (γ) ο ποσοτικός προσδιορισμός των επιπτώσεων και βλαβών. Τα σενάρια αφορούν ατυχήματα είτε σε κλειστό (χώρος συμπίεσης και μονάδα καθαρισμού και ζήρασης) είτε σε κλειστό με άμεση διασπορά του H₂ στο περιβάλλον (θάλαμος διανομής) είτε τέλος σε πλήρως ανοιχτό χώρο (μονάδα αποθήκευσης και περιοχή διάθεσης). Για κάθε ένα από αυτά, υπολογίζονται οι συνθήκες έκλυσης και διασποράς H₂ για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του αναφλέξιμου νέφους και του νέφους συγκέντρωσης μεγαλύτερης από το 20% του LFL (Lower Flammibility Limit). Αποδεικνύεται ότι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο το μέγεθος του κινδύνου είναι τα χαρακτηριστικά της διαρροής. Από την άλλη πλευρά, για τα σενάρια ανοιχτού χώρου, η αύξηση της έντασης του ανέμου δεν επηρεάζει κατ' αναλογία τα χαρακτηριστικά του αναφλέξιμου νέφους. Τέλος, παρουσιάζεται η εκτίμηση του κινδύνου για τα σενάρια ανοιχτού χώρου με τη

¹⁸ Papanikolaou, E.A., Venetsanos, A.G., Heitsch, M., Baraldi, D., Huser, J., Pujol, J., Garcia, J. and Markatos N., (2010), "HySafe SBEP-V20: Numerical studies of release experiments inside a naturally ventilated residential garage", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 10, pp. 4747-4757

¹⁹ Papanikolaou, E.A. and Venetsanos, A.G., (2007), "CFD simulations of hydrogen release and dispersion inside the storage room of a hydrogen refueling station using the ADREA-HF code", Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

²⁰ Papanikolaou, E., Venetsanos, A.G., Schiavetti, M., Marangon, A., Carcassi, M. and Markatos N., (2011), "Consequence assessment of the BBC H2 refuelling station using the ADREA-HF code", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, Issue 3, pp. 2573-2581

μέθοδο MEM (Multi Energy Method) με δεδομένα από τους υπολογισμούς του κώδικα CFD ADREA-HF και του απλοποιημένου μοντέλου Effects 7.6. Η εκτίμηση του κινδύνου παρουσιάζεται μέσω των αποστάσεων υπερπείσεων 30 και 10 kPa. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των 2 μεθοδολογιών εμφανίζεται στα σενάρια με τον ισχυρότερο άνεμο. Αυτό αποδίδεται κυρίως στην αδυναμία του μοντέλου Effects 7.6 να συμπεριλάβει την παρουσία των παρακείμενων κτιρίων με αποτέλεσμα την πρόβλεψη μικρότερου αναφλέξιμου νέφους λόγω της εντονότερης ανάμιξης του H₂ με τον αέρα. Συγκρίσεις μεταξύ κωδίκων CFD και απλοποιημένων μοντέλων όπως το Effects 7.6, που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, πρέπει να γίνουν συστηματικά στο μέλλον ώστε να αναδειχτούν τα όρια εφαρμογής και ακρίβειας των διαφόρων μεθοδολογιών. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι στο πρόγραμμα HyQRA²¹ αναδείχθηκαν σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων διαφόρων μεθοδολογιών εκτίμησης κινδύνου του ίδιου υποθετικού σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου. Οι διαφορές εντοπίζονται όχι μόνο στο στάδιο ποσοτικής εκτίμησης του κινδύνου (λόγω της χρήσης CFD ή απλοποιημένων μοντέλων) αλλά και σε προγενέστερα στάδια όπως: διαφορές στην μέθοδο ποσοτικοποίησης του κινδύνου, διαφορές στα κριτήρια αποδοχής του κινδύνου, διαφορές στην εκτίμηση συχνότητας αστοχίας των συστημάτων και της πιθανότητας και του είδους της έναυσης H₂ και τέλος απουσία κοινών σεναρίων για τον ίδιο σταθμό ανεφοδιασμού διότι αυτό τελικά έγκειται στην κρίση του μελετητή. Θα πρέπει λοιπόν στο μέλλον να γίνουν προσπάθειες από τα ενδιαφερόμενα μέρη ώστε να προταθεί μια εναρμονισμένη και κοινή μεθοδολογία και πρακτική των μελετών εκτίμησης κινδύνου των εγκαταστάσεων υποδοχής και χρήσης του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας.

²¹ Koos, H., Marangon, A., Middha, P., Versloot, N., et al., (2009), “Benchmark exercise on risk assessment methods applied to a virtual hydrogen refuelling station”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Το φυσικό πρόβλημα

Λίστα Συμβόλων

Χαρακτήρες κεφαλαίων

A	Επιφάνεια αερισμού	m ²
C _d	Συντελεστής παροχής ανοίγματος	
C _p	Συντελεστής στατικής πίεσης	
ΔH _c	Θερμότητα καύσης	J/mol
D	Πλάτος πηγής (γραμμική δέσμη) ή διάμετρος (κυκλική δέσμη)	m
D _c	Χαρακτηριστική απόσταση φαινομένου Coanda	m
Fr	Αριθμός Froude $(\frac{u_0^2}{gD\frac{(\rho_\alpha - \rho_0)}{\rho_0}})$	
G	Αριθμός Grashof $(\frac{g(\rho_\alpha - \rho_0)D^3}{\rho_0\nu^2})$	
H	Ύψος	m
L	Βάθος ρωγμής κατά μήκος της κατεύθυνσης της ροής του αέρα	m
L _i	Όριο αναφλεξιμότητας συστατικού i	
P	Πίεση	Pa
Q	Ογκομετρική παροχή	m ³ /s
Re	Αριθμός Reynolds $(\frac{\rho_0 u_0 D}{\mu_0})$	
S	Παράμετρος διαστρωμάτωσης	
T	Θερμοκρασία	K
V	Όγκος κλειστού χώρου	m ³

Χαρακτήρες μικρών γραμμάτων

a	Εκθέτης υπολογισμού ταχύτητας ανέμου	
---	--------------------------------------	--

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

b	Μήκος ρωγμής	m
c	Συγκέντρωση ρύπου (κατ' όγκο)	m^3 / m^3
c_0	Αρχική συγκέντρωση ρύπου (κατ' όγκο)	m^3 / m^3
d_c	Κρίσιμη διάμετρος σωλήνα	mm
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	m/s^2
h	Ύψος ρωγμής	m
k	Συντελεστής ροής	$m^2 s^{-1} Pa^{-1}$
n	Εκθέτης ροής	
ppm	Parts per milion	
p_0	Πίεση σε σημείο αναφοράς h_0	Pa
p_w	Μέση πίεση ανέμου	Pa
q	Παροχή ρύπου	m^3/s
t	χρόνος	s
u	Ταχύτητα	m/s
u_{ref}	Ταχύτητα ανέμου σε σημείο αναφοράς	m/s
u_H	Ταχύτητα ανέμου σε ύψος H	m/s
x_m	Ανώτατο ύψος ανωστικής δέσμης	m
y	Ύψος από σημείο αναφοράς	m
y_i	Κλάσμα όγκου συστατικού i	

Δείκτες

a	Συνθήκες περιβάλλοντος
avg	Μέση τιμή (average)
cl	Άξονας συμμετρίας
e	Περιβάλλον (environment)
ef	Ενεργός (effective)
fb	Συνθήκη ευσταθούς μηχανικού αερισμού
fu	Συνθήκη ασταθούς μηχανικού αερισμού
I, in	Συνθήκη στο εσωτερικό (inside)
met	Συνθήκες σε μετεωρολογικό σταθμό
o	Συνθήκες στην πηγή έκλυσης ή αρχικές συνθήκες ή συνθήκες σε σημείο αναφοράς
p	Τοπική συνθήκη
s	Συνθήκη θερμοτονισμού (stack condition)

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

t	Συνθήκη μετά την πάροδο χρόνου t
tot	Συνολική συνθήκη (total)
w	Άνεμος (wind)
∞	Συνθήκες σε μόνιμη κατάσταση ή συνθήκες περιβάλλοντος

Ελληνικοί χαρακτήρες

Δ	Διαφορά	
α	Σταθερά ροής	$\text{kg/s}\cdot\text{m}^4$
β	Σταθερά ροής	kg/m^7
λ	Μέγεθος κελιού κατάρρηξης	mm
μ	Δυναμικό ιξώδες	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	Κινηματικό ιξώδες	m^2/s
ρ	Πυκνότητα	kg/m^3
ρ_0	Πυκνότητα σε συνθήκες αναφοράς P_0, T_0	kg/m^3

Συντομογραφίες

ACH	Αριθμός εναλλαγών αέρα στη μονάδα του χρόνου (Air Changes per Hour)	h^{-1}
LFL	Κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας (Lower Flammability Limit)	
LH2	Υγροποιημένο H_2 (Liquid H_2)	
NTP	Συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, (20 °C και 1 bar Normal Temperature and Pressure)	
UFL	Ανώτερο όριο αναφλεξιμότητας (Upper Flammability Limit)	

2.1 Εισαγωγή

Στην περίπτωση ατυχημάτων των τεχνολογιών και εγκαταστάσεων υποδομής H_2 , τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα εξαρτώνται συνήθως από την εξέχου αλληλουχία γεγονότων: έκλυση, διασπορά, έναυση, φωτιά ή έκρηξη. Η αρχική φάση του ατυχήματος προκύπτει από την έκλυση (διαρροή) H_2 από το δοχείο αποθήκευσης ή από κάποιο άλλο στοιχείο του συστήματος. Ακολουθεί η διασπορά, κατά την οποία το H_2 αναμιγνύεται με τον περιβάλλοντα αέρα. Σ' αυτό το στάδιο, το H_2 είτε αυτοαναφλέγεται είτε αναφλέγεται παρουσία κάποιας πηγής έναυσης. Ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες κατά την έναυση, η καύση του H_2 μπορεί να προκαλέσει είτε φωτιά είτε έκρηξη (κατάκαυση ή κατάρρηξη) (Baraldi και συν., 2010).

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

Προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος ανάφλεξης και καύσης, είναι απαραίτητο να μελετηθεί η χωρική και χρονική κατανομή του H_2 στον περιβάλλοντα χώρο. Ανάλογα με την γεωμετρία του χώρου, την παροχή έκλυσης, το συνολικό εκλυθέν H_2 και την προϋπάρχουσα κινητική κατάσταση του χώρου, το H_2 μπορεί να δημιουργήσει αμελητέο ή σημαντικό αναφλέξιμο νέφος ή ακόμα και αναφλέξιμο/ειρηνικό νέφος.

Στις μελέτες αξιολόγησης κινδύνων, συνήθως εξετάζονται τα δυσμενέστερα σενάρια (worst-case scenarios) στα οποία θεωρείται ότι στοιχειομετρικό νέφος H_2 και αέρα περιβάλλει τον υπό εξέταση χώρο. Ωστόσο, η πολύ μικρή πυκνότητα του H_2 καθιστά την πιθανότητα ύπαρξης τέτοιου είδους σεναρίων σχετικά μικρή. Κατά τους Swain και συν. (1998), η αρχική κατηγοριοποίηση των σεναρίων γίνεται βάσει του χώρου στον οποίο λαμβάνει χώρα η έκλυση του αερίου H_2 : α) εκλύσεις σε κλειστούς χώρους, β) εκλύσεις σε κλειστούς χώρους με αερισμό και γ) εκλύσεις σε ανοιχτούς χώρους. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω κατηγοριοποίηση είναι δυνατόν να προταθούν γενικές περιγραφές του είδους και της έκτασης του κινδύνου που μπορεί να προκαλέσει μία ανεπιθύμητη έκλυση H_2 .

Η συμπεριφορά του εκλυόμενου H_2 σε κλειστούς χώρους εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες έκλυσης (παροχή, ταχύτητα έκλυσης, θερμοκρασία, θέση έκλυσης και κατεύθυνση), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου (μέγεθος και γεωμετρία, θέση και μέγεθος ανοιγμάτων αερισμού, παρουσία εμποδίων), τις ατμοσφαιρικές συνθήκες μέσα στο χώρο (θερμοκρασία, μηχανικός αερισμός) και αυτές του εξωτερικού χώρου (θερμοκρασία, παρουσία ανέμου). Οι συνθήκες της έκλυσης καθορίζουν τη δομή της ροής και το πεδίο διασποράς κοντά στην πηγή. Σε αυτήν την περιοχή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου δεν επηρεάζουν τη ροή εκτός κι αν η έκλυση βρίσκεται πολύ κοντά σε εμπόδια ή τοίχους. Ανάλογα με τις συνθήκες έκλυσης (κυρίως την πίεση ηρεμίας) η έκλυση μπορεί να είναι υποηχητική, ηχητική ή υπερηχητική (HySafe, Deliverable D113, 2008).

Στην περίπτωση υποηχητικών εκλύσεων, οι Chen και Rodi (1980) οριοθέτησαν 3 περιοχές του πεδίου ροής βάσει της επίδρασης της άνωσης: μη ανωστική περιοχή, ενδιάμεση περιοχή και περιοχή πλουμίου (πλήρως ανωστική). Στην περίπτωση αποθήκευσης υπό υψηλές πιέσεις, η έκλυση είναι ηχητική όταν ο λόγος της πίεσης ηρεμίας προς την ατμοσφαιρική είναι μεγαλύτερη από 1,9. Η δέσμη υπό αυτές τις συνθήκες αναφέρεται συχνά ως υποεκτονώμενη δέσμη επειδή η πίεση στην έκλυση είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής με συνέπεια την εκτόνωση της δέσμης σε ατμοσφαιρική πίεση επέκεινα του αιροφυσίου έκλυσης. Έχουν προταθεί σχέσεις για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης της δέσμης στον άξονα συμμετρίας (Birch και συν. (1984), Ewan και συν. (1986), Birch και συν. (1987), Schefer και συν. (2007) και Yuceil and Otugen (2002)). Συνήθως χρησιμοποιούνται οι σχέσεις υποηχητικών μη ανωστικών εκλύσεων αντικαθιστώντας την πραγματική διάμετρο έκλυσης με μια φαινόμενη μετά την εκτόνωση της δέσμης. Οι διάφορες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της φαινόμενης διαμέτρου παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου. Σε υψηλές πιέσεις η έκλυση μπορεί να προκληθεί επίσης λόγω διαπερατότητας του H_2 από τα τοιχώματα του δοχείου αποθήκευσης. Η διαπερατότητα του H_2 έχει συνήθως μεγάλη διάρκεια. Κατά τον Schefer (2006) ο μηχανισμός διαπερατότητας του H_2 σε μεταλλική

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

επιφάνεια περιλαμβάνει τα εξής στάδια: προσρόφηση και διάσταση των μορίων H_2 σε άτομα H_2 στην εσωτερική επιφάνεια, διάχυση των ατόμων H_2 διαμέσου του μετάλλου και τελικά ανασύνδεση των ατόμων σε μόρια με παράλληλη εκρόφησή τους από την εξωτερική επιφάνεια. Η διαπερατότητα επηρεάζεται από το είδος του μετάλλου, τη θερμοκρασία και την πίεση. Στην περίπτωση μη μεταλλικών περιβλημάτων, το προσχέδιο του κανονισμού ECE ορίζει ως μέγιστο επιτρεπόμενο ρυθμό διαπερατότητας H_2 τα $1.0 \text{ Ncm}^3/\text{hr}/\text{lt}$. Για συστήματα αποθήκευσης αστικών λεωφορείων με χωρητικότητα 40 kg σε πίεση 20 MPa (8 δοχεία όγκου 334 lt) η απαίτηση αυτή μεταφράζεται σε $0.045 \text{ NL}/\text{min}$ (HySafe, Deliverable D113, 2008).

Για εκλύσεις σε κλειστούς χώρους απουσία αερισμού, ο κίνδυνος κατά την ανάλυση των δυσμενέστερων σεναρίων επηρεάζεται κυρίως από τον συνολικό όγκο του εκλυθέντος H_2 και λιγότερο από την παροχή έκλυσής του και αυτό γιατί το H_2 δύναται να αναφλεγεί σε μικρό χρονικό διάστημα από την έναρξη της έκλυσης. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η υπερπίεση, η προκύπτουσα από καθυστερημένη ανάφλεξη, επισωρευμένου αναφλέξιμου νέφους δημιουργεί συνήθως μεγαλύτερο κίνδυνο από αυτόν μιας πρώιμης ανάφλεξης. Η πρώιμη ανάφλεξη δημιουργεί συνήθως φλεγόμενη δέσμη (burning jet) ή σταθερή φλόγα (standing flame). Το μέγεθος της φλόγας εξαρτάται από την παροχή έκλυσης. Στην περίπτωση καθυστερημένης ανάφλεξης, το μέγεθος των υπερπίεσεων εξαρτάται από την κινητική κατάσταση του ρευστού στον χώρο. Αν ο όγκος του εκλυθέντος H_2 είναι μικρότερος από 4.1% του συνολικού όγκου του χώρου, ο κίνδυνος καύσης θα μηδενιστεί με την ομοιόμορφη κατανομή του H_2 στο χώρο. Αν όμως ο όγκος του εκλυθέντος H_2 είναι μεγαλύτερος από 4.1%, ο κίνδυνος καύσης θα παραμείνει έως ότου ο χώρος εξαερωθεί ή λάβει χώρα η καύση. Ειδικότερα, εάν η έκλυση έχει σχετικά μικρή αρχική ορμή το H_2 θα ανέλθει λόγω της άνωσης και θα σχηματίσει στρώμα μίγματος H_2 /αέρα στην οροφή. Τα χαρακτηριστικά του στρώματος όπως το μέγεθος και η συγκέντρωση είναι σημαντικές παράμετροι για την εκτίμηση του κινδύνου. Με την παρέλευση της έκλυσης, το στρώμα κατέρχεται προς το έδαφος λόγω μοριακής διάχυσης. Η διάχυση μπορεί να διαρκέσει έως και ώρες ή ακόμα και μέρες κατά περίπτωση. Τελικά το H_2 θα κατανεμηθεί ομοιογενώς στο χώρο. Από την άλλη, στην περίπτωση έκλυσης με σημαντική αρχική ορμή, η επίδραση της άνωσης είναι ασθενής. Αναμένεται έντονη ανάμιξη λόγω προσκρούσεων της δέσμης στην οροφή και σε άλλα εμπόδια και εμφάνιση ανακυκλοφορίας. Λόγω αυτών των φαινομένων η κατανομή H_2 μπορεί να είναι ομοιογενής κατά τη διάρκεια της έκλυσης.

Στην περίπτωση εκλύσεων σε κλειστούς χώρους με φυσικό αερισμό, ο κίνδυνος κατά την ανάλυση των δυσμενέστερων σεναρίων συνήθως εξαρτάται τόσο από την παροχή έκλυσης όσο από τον συνολικό όγκο της έκλυσης. Η επίδραση καθενός εκ των δύο παραμέτρων εξαρτάται από την γεωμετρία του χώρου και την θέση της έκλυσης. Κατάλληλος σχεδιασμός του χώρου και του αερισμού μπορεί να μειώσει τον υφιστάμενο κίνδυνο από την έκλυση H_2 . Κατά την έκλυση, το H_2 κινείται προς τα πάνω λόγω της χαμηλής του πυκνότητας. Ανοίγματα κοντά στην οροφή του χώρου επιτρέπουν την έξοδο του πλούσιου μίγματος H_2 -αέρα αρκεί να υπάρχουν ανοίγματα κοντά στο έδαφος τα οποία επιτρέπουν την είσοδο καθαρού (φρέσκου) αέρα ο οποίος ουσιαστικά μετατοπίζει το πλούσιο μίγμα H_2 -αέρα. Εάν ο καθαρός αέρας εισέρχεται από το ίδιο άνοιγμα που εξέρχεται το μίγμα H_2 -αέρα τότε η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης του H_2 από το χώρο μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Η επίδραση της

διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου καθώς και του ανέμου πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν εφόσον είναι δυνατό να λειτουργήσουν αυτοί οι δυο παράγοντες είτε ευεργετικά είτε επιζήμια.

Για εκλύσεις σε ανοιχτούς χώρους, ο κίνδυνος εξαρτάται περισσότερο από την παροχή έκλυσης παρά από τον συνολικό όγκο της έκλυσης. Σε ανοιχτούς χώρους, το H_2 ανέρχεται και κατά συνέπεια ο κίνδυνος συσσώρευσης απουσιάζει. Απαιτούνται συνήθως μερικά δευτερόλεπτα για την δημιουργία αναφλέξιμου νέφους σταθερού μεγέθους ενώ αν η έκλυση διακοπεί, το νέφος εξαφανίζεται συνήθως επίσης σε μερικά δευτερόλεπτα. Ο κίνδυνος μεγάλων υπερπιέσεων είναι μικρός λόγω της απουσίας κλειστού χώρου ο οποίος περιορίζει τα διαστελλόμενα προϊόντα της καύσης. Επιπλέον, η προκύπτουσα δέσμη H_2 είναι ανομοιογενής και ο όγκος του μίγματος H_2 -αέρα που μπορεί να παραγάγει φλόγες με μεγάλη ταχύτητα είναι σχετικά μικρός. Μόνο στοιχειομετρικά ή πλούσια μίγματα H_2 -αέρα καίγονται τόσο γρήγορα ώστε να προκύψουν υπολογίσιμες υπερπιέσεις.

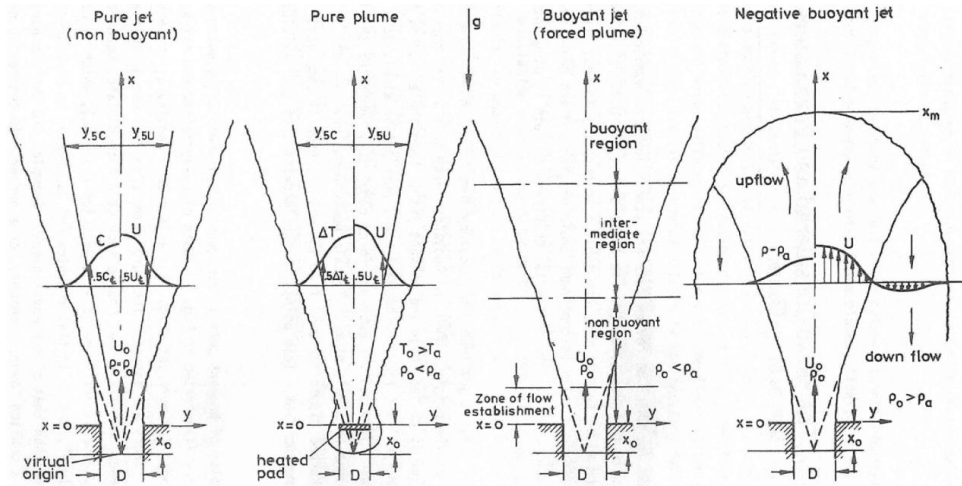
2.2 Κατακόρυφες υποηχητικές εκλύσεις

Οι Chen και Rodi (1980) δημοσίευσαν μια εκτεταμένη ανασκόπηση πειραματικών δεδομένων κάθετων υποηχητικών εκλύσεων σε συνθήκες νηνεμίας ή σε περιβάλλον σταθερής διαστρωμάτωσης (όπου δηλαδή η πυκνότητα του αέρα ελαττώνεται καθ' ύψος) σε όλο το εύρος του αριθμού Froude (από δέσμες με ισχυρή ορμή έως πλήρως ανωστικές δέσμες/πλούμια). Τα πειραματικά δεδομένα αναλύθηκαν βάσει κανόνων ομοιότητας και διαστατικής ανάλυσης. Οι συγγραφείς διέκριναν τις εξής περιπτώσεις (βλέπε Σχήμα 1):

- Απλή δέσμη: το ρευστό έχει την ίδια πυκνότητα με αυτήν του περιβάλλοντος, οι δυνάμεις άνωσης απουσιάζουν.
- Απλό πλούμιο: απουσία ορμής κατά την έκλυση.
- Ανωστικές δέσμες: δέσμη αρχικής ορμής εκλύεται σε περιβάλλον μεγαλύτερης πυκνότητας.
- Δέσμη αρνητικής άνωσης: η δέσμη έχει πυκνότητα μεγαλύτερη του περιβάλλοντος, η ορμή της ελαττώνεται διαρκώς λόγω των αρνητικών δυνάμεων άνωσης με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να αρχίσει να κατέρχεται.

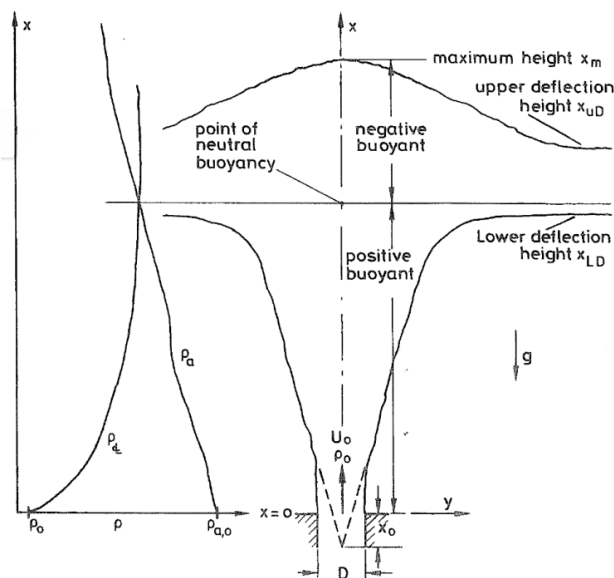
Στην περίπτωση των ανωστικών δεσμών, οι δυνάμεις ορμής επικρατούν στην περιοχή πλησίον της έκλυσης με αποτέλεσμα η δέσμη να συμπεριφέρεται ως μη ανωστική. Ακολουθεί μια ενδιάμεση περιοχή στην οποία η επίδραση των αρχικών δυνάμεων ορμής ελαττώνεται. Στην επόμενη και τελική περιοχή επικρατούν οι δυνάμεις άνωσης και η δέσμη συμπεριφέρεται ως απλό πλούμιο.

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα



Σχήμα 1: Αναπαράσταση ειδών δεσμών/πλουμιών σε ομοιογενές περιβάλλον: α) απλή δέσμη, β) απλό πλούμιο, γ) ανωστική δέσμη και δ) δέσμη αρνητικής άνωσης (Chen και Rodi, 1980)

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η έλκυση ανωστικής δέσμης σε περιβάλλον σταθερής διαστρωμάτωσης. Η δέσμη συμπεριφέρεται αρχικά όμοια με αυτήν σε ομοιογενές περιβάλλον (περίπτωση (c), Σχήμα 1). Ωστόσο, η διαφορά της πυκνότητας της δέσμης με αυτήν του περιβάλλοντος ελαττώνεται διαρκώς μέχρι το σημείο που οι δυο πυκνότητες λαμβάνουν την ίδια τιμή (σημείο ουδέτερης άνωσης). Από αυτό το σημείο και μετά, η άνωση είναι αρνητική και η δέσμη συμπεριφέρεται όμοια με τη δέσμη αρνητικής άνωσης (περίπτωση (d), Σχήμα 1). Η ροή επιβραδύνεται, φθάνει στο ανώτερο ύψος x_m και έπειτα στρέφεται προς τα κάτω με παράλληλη πλάγια επέκταση.



Σχήμα 2: Αναπαράσταση ανωστικής δέσμης σε περιβάλλον σταθερής διαστρωμάτωσης (Chen και Rodi, 1980)

Η κίνηση του ρευστού στις ανωστικές δέσμες επηρεάζεται κυρίως από αδρανειακές, ανωστικές και ιζώδεις δυνάμεις. Ο τοπικός χαρακτήρας της ροής προσδιορίζεται από το σχετικό μέγεθος αυτών των δυνάμεων. Ο συνολικός χαρακτήρας της ροής καθορίζεται από την ένταση αυτών των δυνάμεων στην πηγή και τις συνθήκες

περιβάλλοντος. Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις δυνάμεις και τις συνθήκες περιβάλλοντος είναι:

- Αριθμός Reynolds (λόγος αδρανειακών προς ιξωδών δυνάμεων)

$$Re = \frac{u_0 D}{\nu} \quad (1)$$

- Αριθμός Grashof (λόγος ανωστικών προς ιξωδών δυνάμεων)

$$G = \frac{g(\rho_a - \rho_o)D^3}{\rho_o \nu^2} \quad (2)$$

Στις απλές δέσμες (μη ανωστικές) μόνο ο αριθμός Reynolds έχει πρακτικό ενδιαφέρον ενώ αντίστοιχα στα απλά πλούμια μόνο ο αριθμός Grashof. Οι τυρβώδεις δέσμες και τα πλούμια έχουν μεγάλες τιμές αριθμού Reynolds και Grashof αντίστοιχα λόγω της αμελητέας επίδρασης των ιξωδών δυνάμεων. Ως εκ τούτου, η ροή δεν επηρεάζεται από τους αριθμούς Reynolds και Grashof υπό την προϋπόθεση ότι αυτοί είναι αρκετά μεγάλοι. Οι αριθμοί Reynolds και Grashof χαρακτηρίζουν εάν η ροή είναι τυρβώδης ή στρωτή, κι αν είναι αρχικά στρωτή, σε ποια απόσταση από την πηγή μπορεί να μεταπέσει σε τυρβώδη (ο αριθμός Grashof λαμβάνει τιμές της τάξεως 10^9 - 10^{10}).

Μια σημαντική παράμετρος των τυρβωδών ανωστικών δεσμών είναι ο αριθμός Froude ο οποίος στην πηγή και με την υπόθεση ομοιόμορφης κατανομής της ταχύτητας u_0 και της πυκνότητας ρ_o έχει την εξής μορφή:

$$Fr = \frac{u_0^2}{gD \frac{(\rho_a - \rho_o)}{\rho_o}} \quad (3)$$

Επίσης, η παράμετρος που χρησιμοποιείται για περιβάλλον με διαστρωμάτωση είναι:

$$S = -\frac{g}{\rho_{\alpha,o}} \frac{d\rho_\alpha}{dx} \quad (4)$$

Σε περιβάλλον σταθερής διαστρωμάτωσης η παράμετρος S είναι θετική ($S > 0$), σε ουδέτερο περιβάλλον μηδέν ($S = 0$) και σε ασταθή διαστρωμάτωση αρνητική ($S < 0$).

2.2.1 Κανόνες ομοιότητας και διαστατική ανάλυση

Τόσο οι ανωστικές όσο οι μη ανωστικές δέσμες τείνουν προς την αυτοομοιότητα (self-similar) σε συγκεκριμένες περιοχές της ροής. Ως εκ τούτου με βάση τους κανόνες ομοιότητας μπορούν να ληφθούν πληροφορίες για την γενική συμπεριφορά των δεσμών.

Κατά τους Chen και Rodi (1980) οι δισδιάστατες ανωστικές δέσμες (περιλαμβανομένων των αξονοσυμμετρικών) ή μια περιοχή τους, έχουν την ιδιότητα της αυτοομοιότητας όταν μια ταχύτητα, μια θερμοκρασία (ή συγκέντρωση) και μια

κλίμακα μήκους είναι επαρκείς για την απόδοση των χρονικά μέσων ποσοτήτων ως αδιάστατες συναρτήσεις μιας μόνο γεωμετρικής μεταβλητής.

2.2.1.1 Κατακόρυφες ανωστικές δέσμες σε ομοιόμορφο περιβάλλον

Η κατακόρυφη ανωστική δέσμη συμπεριφέρεται ως μη ανωστική δέσμη κοντά στην πηγή έκλυσης και ως πλούμιο σε μακρινότερη απόσταση. Μεταξύ της μιας περιοχής (στην οποία έχει συμπεριφορά αυτοομοιότητας) και της άλλης (με τη δική της συμπεριφορά αυτοομοιότητας) υπάρχει μια ενδιάμεση περιοχή στην οποία η δέσμη μεταπίπτει από την πρώτη συμπεριφορά στη δεύτερη. Η αξονική θέση της έναρξης της μεταβατικής περιοχής εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό Froude. Προφανώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός Froude, τόσο μεγαλύτερη η έκταση της πρώτης περιοχής. Οι Chen και Rodi (1980) οριοθέτησαν της 3 περιοχές με βάση πειραματικά δεδομένα εκλύσεων σε συνθήκες όπου $\frac{\rho_0}{\rho_\alpha} \approx 1$. Τα πειραματικά δεδομένα της ταχύτητας και θερμοκρασίας (ή συγκέντρωσης εφόσον στην πλειοψηφία τους ίσχυε ότι $\rho_\alpha/\rho_0 \cong 1$) των γραμμικών δεσμών σε καρτεσιανό σύστημα με άξονα τετμημένων την ποσότητα $x_1 = Fr^{-2/3} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/3} \frac{x}{D}$ και άξονα τεταγμένων την $U_1 = \frac{u_{cl}}{u_0} Fr^{1/3} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/3}$ ή $g_1 = C^* Fr^{1/3} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{2/3}$ (με $C^* = \frac{\rho_\alpha - \rho_{cl}}{\rho_\alpha - \rho_0} = \frac{c_{cl} - c_\alpha}{c_0 - c_\alpha} = \frac{T_{cl} - T_\alpha}{T_0 - T_\alpha}$) υπακούουν στις 3 διακεκριμένες περιοχές στις εξής συναρτήσεις:

$$\frac{u_{cl}}{u_0} = \begin{cases} 2,4 \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/2} \left(\frac{x}{D}\right)^{-1/2}, & \text{για } x_1 < 0,5 \text{ (μη ανωστική περιοχή - δέσμη)} \\ 2,85 Fr^{-1/3} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{5/12} \left(\frac{x}{D}\right)^{-1/4}, & \text{για } 0,5 \leq x_1 \leq 5 \text{ (μεταβατική περιοχή)} \\ 1,9 Fr^{-1/3} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{1/3}, & \text{για } 5 < x_1 \text{ (ανωστική περιοχή - πλούμιο)} \end{cases} \quad (5)$$

$$C^* = \begin{cases} 2 \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/2} \left(\frac{x}{D}\right)^{-1/2}, & \text{για } x_1 < 0,5 \text{ (μη ανωστική περιοχή - δέσμη)} \\ 1,65 Fr^{1/2} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/4} \left(\frac{x}{D}\right)^{-3/4}, & \text{για } 0,5 \leq x_1 \leq 5 \text{ (μεταβατική περιοχή)} \\ 2,4 Fr^{1/3} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/3} \left(\frac{x}{D}\right)^{-1}, & \text{για } 5 < x_1 \text{ (ανωστική περιοχή - πλούμιο)} \end{cases} \quad (6)$$

Αντίστοιχα, τα πειραματικά δεδομένα της ταχύτητας και θερμοκρασίας (ή συγκέντρωσης) των κυκλικών δεσμών με άξονα τετμημένων την ποσότητα $x_1 = Fr^{-1/2} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/4} \frac{x}{D}$ και άξονα τεταγμένων την $U_1 = \frac{u_{cl}}{u_0} Fr^{1/2} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/4}$ ή $g_1 = C^* Fr^{1/2} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{3/4}$ υπακούουν στις εξής συναρτήσεις (στην περίπτωση αξονοσυμμετρικών δεσμών, το δεξί μέλος πολλαπλασιάζεται με $\left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4}$):

$$\frac{u_{cl}}{u_0} = \begin{cases} 6,2 \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{1/2} \left(\frac{x}{D}\right)^{-1}, & \text{για } x_1 < 0,5 \text{ (μη ανωστική περιοχή - δέσμη)} \\ 7,26Fr^{-1/10} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{9/20} \left(\frac{x}{D}\right)^{-4/5}, & \text{για } 0,5 \leq x_1 \leq 5 \text{ (μεταβατική περιοχή)} \\ 3,5Fr^{-1/3} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{1/3} \left(\frac{x}{D}\right)^{-1/3}, & \text{για } 5 < x_1 \text{ (ανωστική περιοχή - πλούμιο)} \end{cases} \quad (7)$$

$$C^* = \begin{cases} 5 \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/2} \left(\frac{x}{D}\right)^{-1}, & \text{για } x_1 < 0,5 \text{ (μη ανωστική περιοχή - δέσμη)} \\ 0,44Fr^{1/8} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-7/16} \left(\frac{x}{D}\right)^{-5/4}, & \text{για } 0,5 \leq x_1 \leq 5 \text{ (μεταβατική περιοχή)} \\ 9,35Fr^{1/3} \left(\frac{\rho_0}{\rho_\alpha}\right)^{-1/3} \left(\frac{x}{D}\right)^{-5/3}, & \text{για } 5 < x_1 \text{ (ανωστική περιοχή - πλούμιο)} \end{cases} \quad (8)$$

Η ταχύτητα και της θερμοκρασία (ή αντίστοιχα συγκέντρωση) ακολουθεί κανονική κατανομή (Gaussian):

$$\frac{u}{u_{cl}} = e^{-k_u n^2} \quad (9)$$

$$\frac{T-T_a}{T_{cl}-T_a} \left(\text{ή } \frac{\rho-\rho_a}{\rho_{cl}-\rho_a} \right) = e^{-k_c n^2} \text{ με } n = y/x + x_0 \quad (10)$$

Οι Chen και Rodi (1980) πρότειναν βάσει πειραματικών δεδομένων τις ακόλουθες τιμές για τις σταθερές k_u και k_c στην περίπτωση δεσμών με μεγάλο αριθμό Fr και για $\frac{\rho_0}{\rho_\alpha} \approx 1$:

$$k_u = \begin{cases} 62, & \text{γραμμικές δέσμες} \\ 94, & \text{κυκλικές δέσμες} \end{cases} \quad (11)$$

$$k_c = \begin{cases} 35, & \text{γραμμικές δέσμες} \\ 57, & \text{κυκλικές δέσμες} \end{cases} \quad (12)$$

Οι περισσότερες μη ανωστικές δέσμες είναι συνήθως τυρβώδεις εκτός κι αν ο αριθμός Reynolds στην πηγή είναι πολύ μικρός. Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να ορίσουν μια «κρίσιμη» τιμή Reynolds δηλαδή τη μέγιστη τιμή στην οποία η δέσμη παραμένει στρωτή. Όπως αναφέρεται από στους Chen και Rodi (1980), ο Andrade όρισε τιμή ίση με 30 ενώ οι Sato και Sakaο περίπου 50 για γραμμικές δέσμες ενώ άλλοι ερευνητές όρισαν τιμή ίση με 300 για κυκλικές δέσμες ή ακόμα και 2.000.

2.2.1.2 Κατακόρυφες ανωστικές δέσμες σε περιβάλλον σταθερής διαστρωμάτωσης

Η σημαντικότερη παράμετρος σε περιβάλλον διαστρωμάτωσης είναι η απόσταση x_m (βλέπε Σχήμα 2) η οποία είναι το μέγιστο ύψος της ροής (η ταχύτητα της δέσμης μηδενίζεται). Η απόσταση x_m συνδέεται με τα μεγέθη x_{LD} και x_{UD} τα οποία οριοθετούν την περιοχή όπου η δέσμη στρέφεται προς τα κάτω και εκτείνεται πλαγίως. Σ' αυτήν την περιοχή η παράπλευρη και καθοδική ταχύτητα είναι σημαντικές ενώ παράλληλα δεν ισχύουν οι κατανομές ομοιότητας. Για αμιγώς ή

σχεδόν αμιγώς πλούμια (μικροί αριθμοί Froude) οι παράμετροι που καθορίζουν την ροή είναι το μέγεθος W_0 και η παράμετρος διαστρωμάτωσης S . Η διαστατική ανάλυση παρέχει την παρακάτω σχέση μεταξύ της παραμέτρου x_m και των 2 μεγεθών:

$$x_m \propto \left(\frac{W_0}{\rho_0}\right)^{1/(j+3)} S^{-3/2(j+3)} \quad (13)$$

με $W_0 = g(\rho_\alpha - \rho_0)u_0 D^{j+1}$ και $j=0$ ή 1 για γραμμικά ή αξονοσυμμετρικά πλούμια αντίστοιχα. Ο Briggs (1969) βρήκε τον παράγοντα αναλογίας για τη σχέση (13) ίσο με $5\pi^{-1/4}$.

2.2.1.3 Έκλυση δεσμών H_2

Η έκλυση δεσμών H_2 συγκαταλέγεται στις περιπτώσεις έκλυσης αερίου χαμηλότερης πυκνότητας από αυτήν του ατμοσφαιρικού αέρα όπου η υπόθεση Boussinesq δεν έχει ισχύ εφόσον ο λόγος πυκνοτήτων $\Delta\rho_0/\rho_\infty = (\rho_\infty - \rho_0)/\rho_\infty$, με ρ_0 : πυκνότητα στην πηγή και ρ_∞ : πυκνότητα αέρα, είναι αρκετά μεγάλη (η υπόθεση Boussinesq ισχύει στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν στις αμέσως προηγούμενες παραγράφους). Οι Crapper και Braines όπως αναφέρεται από τον El Amin (2009) συνέστησαν ως ανώτερο όριο εφαρμογής της υπόθεσης Boussinesq το όριο 0,05 για το λόγο πυκνοτήτων.

Για την περίπτωση λοιπόν αξονοσυμμετρικής «non-Boussinesq» ανωστικής δέσμης προκύπτουσας από την έκλυση H_2 κυκλικής διατομής σε μόνιμες συνθήκες ισχύουν οι εξισώσεις συνέχειας, ορμής και συγκέντρωσης (βλέπε Σχήμα 3):

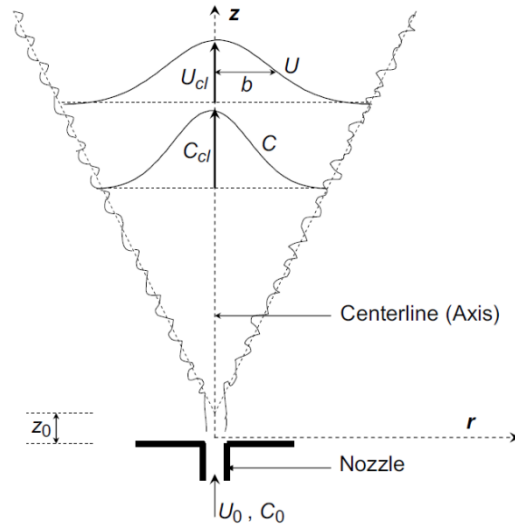
$$\frac{\partial(r\rho V)}{\partial r} + \frac{\partial(r\rho U)}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial(r\rho UV)}{\partial r} + \frac{\partial(r\rho U^2)}{\partial z} + \frac{\partial(r\rho \bar{u}\bar{v})}{\partial r} = gr(\rho - \rho_\infty) \quad (15)$$

$$\frac{\partial(r\rho VC)}{\partial r} + \frac{\partial(r\rho UC)}{\partial z} + \frac{\partial(r\rho \bar{v}\bar{c})}{\partial r} = 0 \quad (16)$$

με U : μέση ταχύτητα κατά τη διεύθυνση της έκλυσης, V : μέση ταχύτητα κάθετη στη διεύθυνση της έκλυσης, C : κλάσμα μάζας H_2 , \bar{u} και \bar{v} : διακυμάνσεις των διανυσμάτων της ταχύτητας στους άξονες r και z , \bar{c} : διακύμανση της συγκέντρωσης C και τέλος ρ : πυκνότητα του μίγματος.

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα



Σχήμα 3: Αναπαράσταση τυρβώδους δέσμης (El-Amin, 2009)

Οι εξισώσεις των κατανομών της ταχύτητας, πυκνότητας και κλάσματος μάζας είναι:

$$U(r, z) = U_{cl}(z)e^{-\frac{r^2}{b^2(z)}}, \text{ με } U(r, z) \text{ η μέση ταχύτητα στη δέσμη και } U_{cl}(r, z) \text{ η ταχύτητα στον άξονα συμμετρίας} \quad (17)$$

$$\rho_{\infty} - \rho(r, z) = (\rho_{\infty} - \rho_{cl}(z))e^{-\lambda^2 \frac{r^2}{b^2(z)}}, \text{ με } \rho(r, z) \text{ η μέση πυκνότητα στη δέσμη και } \rho_{cl}(r, z) \text{ η πυκνότητα στον άξονα συμμετρίας} \quad (18)$$

$$\rho(r, z)C(r, z) = \rho_{cl}(z)C_{cl}(z)e^{-\lambda^2 \frac{r^2}{b^2(z)}} \quad (19)$$

Ο παράγοντας λ ($\lambda = c_m/c_c$) ανάπτυξης/εξάπλωσης εκφράζει την διαφορά ρυθμού ανάπτυξης μεταξύ της κατανομής της ταχύτητας και αυτής της πυκνότητας (είναι γνωστό ότι $c_c \neq c_m$).

Το κλάσμα μάζας C σχετίζεται με την πυκνότητα:

$$\rho = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{\rho_0}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{\infty}}\right)\right]C + \left(\frac{1}{\rho_{\infty}}\right)} \quad (20)$$

Ενώ το κλάσμα mole X :

$$\rho = \rho_{\infty}(1 - X) + \rho_0 X \quad (21)$$

Το κλάσμα μάζας C συνδέεται με το κλάσμα mole X :

$$C = \frac{\rho_0 X}{\rho_{\infty}(1 - X) + \rho_0 X} = \frac{\omega X}{1 + (\omega - 1)X} \quad (22)$$

Εφόσον ισχύει επίσης $\rho C = \rho_0 X$, η σχέση (16) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή για το κλάσμα mole X :

$$\frac{\partial(rvX)}{\partial r} + \frac{\partial(rUX)}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial(r\rho\bar{v}c)}{\partial r} = 0 \quad \dot{\eta} \quad (23)$$

$$\frac{\partial(rvX)}{\partial r} + \frac{\partial(rUX)}{\partial z} + \frac{\partial(r\bar{v}x)}{\partial r} = 0 \quad \text{με } x \text{ η τυρβώδης διακύμανση του } X \quad (24)$$

Οι El-Amin και Kanayama (2009) ανέπτυξαν ένα ολοκληρωματικό μοντέλο για τις ροές μάζας, ορμής και συγκέντρωσης:

$$\frac{d}{dz} \int_0^\infty 2\pi r U(r, z) \rho(r, z) dr = 2\pi b \rho_\infty \alpha \left(\frac{\rho_{cl}(z)}{\rho_\infty} \right)^{1/2} U_{cl}(z) \quad (25)$$

$$\frac{d}{dz} \int_0^\infty 2\pi r U^2(r, z) \rho(r, z) dr = \int_0^\infty 2\pi r g (\rho_\infty - \rho(r, z)) U_{cl}(z) dr \quad (26)$$

$$\frac{d}{dz} \int_0^\infty 2\pi r U(r, z) \rho(r, z) C(r, z) dr = 0 \quad (27)$$

Η τελευταία εξίσωση μπορεί να πάρει την παρακάτω μορφή η οποία ισοδυναμεί με την εξίσωση ροής άνωσης:

$$\frac{d}{dz} \int_0^\infty 2\pi r U(r, z) (\rho_\infty - \rho(r, z)) dr = 0 \quad (28)$$

η οποία με τη χρήση των εξισώσεων (17), (18) και (19) παίρνει την μορφή:

$$\frac{d}{dz} \left(b^2 U_{cl}(z) \left(1 - \frac{\rho_{cl}(z)}{\rho_\infty} \right) \right) = 0 \quad (29)$$

Η ροή άνωσης F ορίζεται ως:

$$F = K b^2(z) U_{cl}(z) g \left(1 - \frac{\rho_{cl}(z)}{\rho_\infty} \right) \quad \text{με } K = \frac{\pi}{1 + \lambda^2} \quad (30)$$

Εφόσον η ροή άνωσης διατηρείται:

$$F = F_0 = K d^2 U_0 g \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_\infty} \right) = K d^2 U_0 g \frac{\Delta \rho_0}{\rho_\infty} \quad (31)$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (18), (19), (30) και (29) στις εξισώσεις (27) και (26):

$$\frac{d}{dz} (b^2(z) U_{cl}(z)) = 2ab U_{cl} \left(1 - \frac{F_0}{K g b^2(z) U_{cl}(z)} \right)^{1/2} \quad (32)$$

$$\frac{d}{dz}(b^2(z)U_{cl}^2(z)) = \frac{2F_0}{\lambda^2 K U_{cl}(z)} + \frac{2F_0}{(2 + \lambda^2)gK} \frac{dU_{cl}}{dz} \quad (33)$$

Με τη χρήση των παρακάτω αδιάστατων σχέσεων απαλείφεται ο όρος F_0 από τις σχέσεις (33) και (32):

$$\hat{b} = b \left(\frac{g^3}{F_0^2}\right)^{1/5}, \quad \hat{b} = b \left(\frac{g^3}{F_0^2}\right)^{1/5}, \quad \hat{u} = \frac{U_{cl}}{(gF_0)^{1/5}}, \quad \hat{z} = z \left(\frac{g^3}{F_0^2}\right)^{1/5}, \quad N = \hat{b}^2 \hat{u}, \quad M = \hat{b}^2 \hat{u}^2 \quad (34)$$

με \hat{b} , \hat{u} και \hat{z} η αδιάστατη ακτίνα, ταχύτητα στον άξονα και κάθετη συντεταγμένη της δέσμης και N και M η αδιάστατη μάζα και ορμή αντίστοιχα.

$$\frac{dN}{d\hat{z}} = 2aM^{1/2} \left(1 - \frac{1}{KN}\right)^{1/2} \quad (35)$$

$$\frac{dM}{d\hat{z}} = \left(\frac{1}{KN-A}\right) \left[\frac{2N}{\lambda^2 M} - 2\alpha A \frac{M^{3/2}}{N} \left(1 - \frac{1}{KN}\right)^{1/2}\right] \text{ με } A = 2/(2 + \lambda^2) \quad (36)$$

Αντίστοιχα, οι αρχικές συνθήκες παίρνουν τη μορφή:

$$N_0 = \frac{1}{[K(\rho_\infty - \rho_0)/\rho_\infty]}, \quad M_0 = \frac{(U_0^2/gb_0)^{2/5}}{[K(\rho_\infty - \rho_0)/\rho_\infty]^{6/5}} \quad (37)$$

Επίσης, εισάγοντας τον όρο z/d στις σχέσεις (34) λαμβάνονται τελικά οι σχέσεις για την αδιάστατη ταχύτητα στον άξονα συμμετρίας και το πλάτος της δέσμης:

$$\frac{z}{d} = \frac{\hat{z}}{\hat{b}_0} = \frac{\hat{z}\sqrt{M_0}}{N_0}, \quad \frac{z}{d} = \frac{\hat{z}}{\hat{b}_0} = \frac{\hat{z}\sqrt{M_0}}{N_0}, \quad \frac{U_{cl}}{U_0} = \frac{\hat{u}}{\hat{u}_0} = \frac{MN_0}{M_0N} \quad \text{και} \quad \frac{b}{d} = \frac{\hat{b}}{\hat{b}_0} = \frac{N}{N_0} \sqrt{\frac{M_0}{M}} \quad (38)$$

Ο συντελεστής συμπαράσυρσης a λαμβάνεται ως μεταβλητή και όχι ως σταθερά. Ο συντελεστής αυξάνεται καθώς η δέσμη εγκαταλείπει της περιοχή που κυριαρχεί η ορμή και εισέρχεται στην περιοχή που κυριαρχεί η άνωση και υπολογίζεται από την:

$$\alpha = \frac{E}{2\pi U_{cl} b} \quad (39)$$

Ωστόσο έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι ο συντελεστής a προσεγγίζει την οριακή τιμή 0,082 στην περίπτωση αμιγώς ανωστικών δεσμών (πλούμια). Ο τοπικός ρυθμός συμπαράσυρσης δίνεται από τη σχέση:

$$E = E_{mom} + E_{buoy} \quad (40)$$

με E_{mom} η συνιστώσα λόγω της ορμής της δέσμης και E_{buoy} αυτή λόγω άνωσης:

$$E_{mom} = 0,282 \left(\frac{\pi d^2 \rho_0 U_0^2}{4\rho_\infty}\right)^{1/2} \quad (41)$$

$$E_{buoy} = \frac{2\pi U_{cl} b a_2}{Fr_1} \quad (42)$$

με Fr_1 ο τοπικός αριθμός Froude:

$$Fr_1 = \frac{U_{cl}^2 \rho_o}{gd(\rho_\infty - \rho_{cl})} \quad (43)$$

Ο τοπικός αριθμός Froude είναι μεγάλος στην περιοχή που κυριαρχεί η ορμή και ως εκ τούτου η συνιστώσα E_{buoy} αγνοείται. Στην περιοχή που κυριαρχεί η άνωση ο αριθμός Fr_1 λαμβάνει μικρές τιμές και γι' αυτό η συνιστώσα E_{buoy} λαμβάνεται υπ' όψιν. Οι Houf και Schefer (2008) προσδιόρισαν τη σχέση υπολογισμού του παράγοντα a_2 βάσει πειραματικών δεδομένων για κάθετες δέσμες H_2 ως:

$$\alpha_2 = \begin{cases} 17,313 - 0,11665Fr + 2,0771 \cdot 10^{-4}Fr, & Fr < 268 \\ 0,97, & Fr \geq 268 \end{cases} \quad (44)$$

όπου ο αριθμός Froude ορίστηκε ως $Fr = \sqrt{\rho_o u_o^2 / gD (\rho_\infty - \rho_o)}$.

Επιλύοντας τις εξισώσεις (35) και (36) χρησιμοποιώντας τις αρχικές συνθήκες όπως ορίστηκαν παραπάνω, είναι δυνατό να υπολογιστούν αριθμητικά η ταχύτητα στον άξονα συμμετρίας και η ακτινική έκταση της δέσμης σε κάθε σημείο του άξονα συμμετρίας καθώς επίσης και η αξονική πυκνότητα και το κλάσμα μάζας με βάση τους παραπάνω ορισμούς.

2.3 Αερισμός

Αερισμός ονομάζεται η εναλλαγή του αέρα ενός χώρου με φυσικά ή τεχνητά μέσα προκειμένου να αντικατασταθεί ο περιεχόμενος αέρας με καθαρό. Ο αερισμός έχει τις παρακάτω ιδιότητες (Παπαμανώλης, 1992 και Hall και Greeno, 2007):

- Παρέχει φρέσκο αέρα (κοινή απαίτηση: περίπου 0,1 έως 0,2 lt/s ανά άτομο).
- Διατηρεί την απαιτούμενη συγκέντρωση σε O_2 στο χώρο (περίπου 21%).
- Απομακρύνει τους αέριους ρύπους (ιδιαίτερη σημασία έχει η διατήρηση του CO_2 σε επίπεδο συγκέντρωσης μέχρι 0,1% ενώ συγκέντρωση CO_2 ίση με 2% δεν είναι επιτρεπτή).
- Με τον αερισμό λαμβάνει χώρα ανταλλαγή ενέργειας με θετικές ή αρνητικές επιπτώσεις στο ενεργειακό ισοζύγιο του χώρου. Συγκεκριμένα, μεταβάλλει τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα σε υγρασία (τα επιτρεπόμενα όρια είναι μεταξύ 30% έως 70%).
- Παρέχει αίσθηση φρεσκάδας (επαρκής ταχύτητα αέρα στο χώρο θεωρείται από 0,15 έως 0,5 m/s).
- Επηρεάζει την εξέλιξη πυρκαγιάς και την κυκλοφορία καπνού.

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

- Επηρεάζει τον έλεγχο θορύβου.

Είναι φανερό ότι ο αερισμός επηρεάζει τη διαμόρφωση του εσωτερικού περιβάλλοντος ενός χώρου. Οι συνέπειες του αερισμού δεν είναι πάντα ευεργετικές, ωστόσο είναι κοινή συνείδηση ότι η παρουσία αερισμού σε έναν χώρο είναι απαραίτητη. Τα είδη του αερισμού που εφαρμόζονται είναι (Παπαμανώλης, 1992):

- Φυσικός αερισμός (natural ventilation): πραγματοποιείται χωρίς την παρέμβαση μηχανικών συστημάτων.
- Φυσικός ελεγχόμενος αερισμός: αυτόματα συστήματα μέτρησης (συνήθως της θερμοκρασίας ή συγκέντρωσης των ρύπων) παρεμβαίνουν και ελέγχουν την ποσότητα του εναλλασσόμενου αέρα.
- Μηχανικός αερισμός (mechanical ventilation) με ανεμιστήρες εισαγωγής ή απαγωγής του αέρα.
- Μηχανικός αερισμός με ανεμιστήρες εισαγωγής και απαγωγής του αέρα.

Η εισαγωγή και απαγωγή αέρα μπορεί να γίνει με διάφορους συνδυασμούς των ειδών αερισμού όπως με τη χρήση: α) φυσικού αερισμού μόνο, β) φυσικού αερισμού για την εισαγωγή και μηχανικού αερισμού για την απαγωγή αέρα, γ) μηχανικού αερισμού για την εισαγωγή και φυσικού αερισμού για την απαγωγή αέρα ή τέλος δ) μηχανικού αερισμού μόνο (Vitooraporn, 2005-2006).

Οι απαιτήσεις σε αερισμό στα κτίρια εξαρτώνται από το είδος της χρήσης και τη δραστηριότητα στο χώρο. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τυπικές απαιτήσεις αερισμού, σε αριθμό εναλλαγών του αέρα του χώρου στη μονάδα του χρόνου (ACH), για διάφορα είδη κλειστών χώρων.

Σ' αυτήν την παράγραφο παρουσιάζεται κυρίως ο φυσικός αερισμός και οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του καθώς σημαντικό μέρος της εργασίας αναφέρεται σε υπολογιστικές μελέτες της απομάκρυνσης του εκλυόμενου H_2 σε κλειστό χώρο με τη χρήση φυσικού αερισμού.

Πίνακας 1: Οδηγίες απαίτησης αερισμού κλειστών χώρων (Hall και Greeno, 2007)

Room/building/accommodation	Air changes per hour
Assembly/entrance halls	3-6
Bathrooms (public)	6*
Boiler plant rooms	10-30 [†]
Canteens	8-12
Cinema/theatre	6-10
Classrooms	3-4
Dance halls	10-12
Dining hall/restaurants	10-15
Domestic habitable rooms	approx. 1*
Factories/garages/industrial units	6-10
Factories - fabric processing	10-20
Factories (open plan/spacious)	1-4
Factories with unhealthy fumes	20-30
Foundries	10-15
Hospital wards	6-10
Hospital operating theatres	10-20
Kitchens (commercial)	20-60*
Laboratories	6-12
Laundries	10-15
Lavatories (public)	6-12*
Libraries	2-4
Lobbies/corridors	3-4
Offices	2-6
Smoking rooms	10-15
Warehousing	1-2

Notes:

* For domestic applications see pages 160 and 161.

[†] 18 air changes per hour is generally acceptable, plus an allowance of 0.5 l/s (1.8 m³/h) per kW boiler rating for combustion air. Double the combustion allowance for gas boilers with a diverter flue.

See also: BS 5925: Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation.

2.3.1 Φυσικός αερισμός

Ο φυσικός αερισμός άρχισε περίπου από το 1920 να αποτελεί μέρος του σχεδιασμού των κτιρίων. Η χρήση συστημάτων κλιματισμού από το 1940 και μετά περιορίσε σε κάποιο βαθμό την εφαρμογή του φυσικού αερισμού, ωστόσο μετά την ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του '70 το ενδιαφέρον αναζωπυρώθηκε (Παπαμανώλης, 1992).

Ο αερισμός προκύπτει σαν αποτέλεσμα της ροής δια μέσου ανοιγμάτων σε δομικά στοιχεία. Ο αερισμός λαμβάνει χώρα:

- Στα προβλεφθέντα ανοίγματα αερισμού (air inlets) όπως παράθυρα, οπές, ανοίγματα αεραγωγών.
- Στις ρωγμές ή ακόμα μικρότερα ανοίγματα λόγω του πορώδους των δομικών υλικών. Σε αυτήν την περίπτωση ο αερισμός είναι σε μεγάλο βαθμό τυχαίος και απρόβλεπτος και καλείται ελεύθερος αερισμός ή αεροπερατότητα (infiltration).

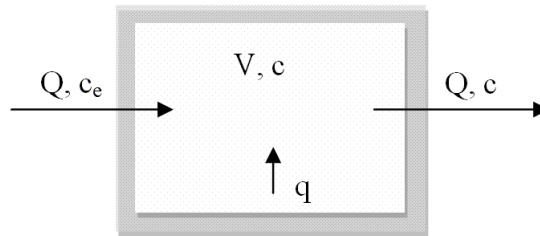
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του αερισμού και της αεροπερατότητας είναι η μέθοδος αερίων δεικτών (tracer gas method) και η

εφαρμογή πίεσης (pressurization method) με συνήθεις μονάδες μέτρησης kg/h, m³/h και ο ACH.

Ιακή και αναγκαία συνθήκη για τη ροή αέρα στο χώρο είναι η ύπαρξη διαφοράς πίεσης. Στο φυσικό αερισμό η επίδραση του ανέμου στο κέλυφος του κλειστού χώρου και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του κλειστού χώρου και του περιβάλλοντος προκαλούν διαφορές πιέσεων εκατέρωθεν των ανοιγμάτων και κατά συνέπεια ροή δια μέσου αυτών. Ο φυσικός αερισμός λοιπόν εξαρτάται άμεσα από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες.

2.3.1.1 Υπολογισμός συγκέντρωσης αερίων ρύπων συναρτήσει του αερισμού: Μοντέλο μονής ζώνης (single-zone model)

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης αερίου ρύπου σε ένα χώρο συναρτήσει του αερισμού υποθέτοντας μοντέλο μονής ζώνης (single-zone model), θεωρείται κλειστός χώρος όγκου V με παροχή αερισμού και ρύπου Q και q αντίστοιχα (Awbi, 2005):



Σχήμα 4: Αναπαράσταση κλειστού χώρου με αερισμό και παραγωγή ρύπου – Μοντέλο μονής ζώνης

$$Vdc = (q + Qc_e - Qc)dt \quad (45)$$

Υποθέτοντας τέλεια ανάμιξη και απουσία διαφοράς πυκνότητας στον χώρο, η εξίσωση (45) μετά από ολοκλήρωση δίνει τη συγκέντρωση του ρύπου συναρτήσει του χρόνου t :

$$c = \left(\frac{Qc_e + q}{Q + q} \right) \left[1 - e^{-\frac{(Q+q)}{V}t} \right] + c_0 e^{-\frac{(Q+q)}{V}t} \quad (46)$$

Η εξίσωση (46) έχει γενική μορφή και μπορεί να πάρει τις κάτωθι μορφές ανάλογα με τις συνθήκες στο χώρο και στο περιβάλλον:

1. $c = \left(\frac{Qc_e + q}{Q + q} \right) \left[1 - e^{-\frac{(Q+q)}{V}t} \right]$, όταν η αρχική συγκέντρωση ρύπου είναι μηδέν ($c_0=0$).
2. $c = \left(\frac{q}{Q + q} \right) \left[1 - e^{-\frac{(Q+q)}{V}t} \right]$, όταν η αρχική συγκέντρωση ρύπου είναι μηδέν ($c_0=0$) και η συγκέντρωση ρύπου στον περιβάλλοντα αέρα είναι μηδέν ($c_e=0$).

3. $c = c_0 e^{-Nt}$, όταν η συγκέντρωση ρύπου στον περιβάλλοντα αέρα είναι μηδέν ($c_e=0$) και δεν υπάρχει παραγωγή ρύπου στον χώρο, όπου N είναι ο αριθμός εναλλαγών αέρα (ACH) είτε σε s^{-1} είτε σε h^{-1} .
4. Σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης ($t \rightarrow \infty$) η τελική συγκέντρωση είναι: $c_\infty = \frac{Qc_e+q}{Q+q}$. Η εξίσωση δείχνει ότι η τελική συγκέντρωση c_∞ είναι ανεξάρτητη του όγκου του χώρου V . Ωστόσο, ο όγκος V επηρεάζει τον ρυθμό με τον οποίο η συγκέντρωση προσεγγίζει την τιμή c_∞ .

Το μοντέλο μονής ζώνης έχει πρακτική σημασία όταν υπάρχει πλήρης ανάμιξη του εσωτερικού με τον εισερχόμενο αέρα. Ωστόσο αυτό είναι πρακτικά απίθανο. Αντίθετα, συχνά εμφανίζεται διαφορετικός βαθμός αερισμού σε διάφορα τμήματα του χώρου. Σε αυτήν την περίπτωση ένα μοντέλο πολλαπλών ζωνών (multi-zone model) είναι καλύτερο για την περιγραφή του φαινομένου.

2.3.1.2 Υπολογισμός συγκέντρωσης αερίων ρύπων συναρτήσε του αερισμού: Μοντέλα πολλαπλών ζωνών (multi-zone model)

Στα μοντέλα πολλαπλών ζωνών το κτίριο χωρίζεται σε μια σειρά διασυνδεδεμένων ζωνών με την υπόθεση ότι σε κάθε από τις ζώνες ο αέρας είναι πλήρως αναμεμειγμένος. Έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα τέτοιου είδους όπως αυτά των Allard και Herrlin (1989), Etheride και Alexander (1980), Feustel και Reynor-Hoosen (1990), Herrlin (1985), Liddament και Allen (1983), Walton (1984, 1989) (όπως αναφέρονται στο ASHRAE Handbook – Fundamentals, 2005). Όλα τα μοντέλα βασίζονται στο ισοζύγιο μάζας σε κάθε μια από τις ζώνες του κτιρίου. Τα ισοζύγια χρησιμοποιούνται για την εύρεση της στατικής πίεσης στο κτίριο με την απαίτηση ότι σε κάθε ζώνη η εισροή βρίσκεται σε ισορροπία με την εκροή. Είναι απαραίτητη η εισαγωγή των θέσεων των ανοιγμάτων του αερισμού και των σχέσεων που περιγράφουν τον αερισμό σε αυτά, οι τιμές για τους συντελεστές C_p , οι θερμοκρασίες σε κάθε ζώνη και οι πιθανές παροχές μηχανικού αερισμού. Τέτοιου είδους λεπτομερών δεδομένων είναι συχνά δύσκολο να οριστούν και συνήθως χρησιμοποιούνται δεδομένα από την βιβλιογραφία. Τα μοντέλα προσδιορίζουν όχι μόνο τις παροχές αερισμού του κτιρίου αλλά και τις παροχές και διαφορές πίεσης μεταξύ των ζωνών πράγμα απαραίτητο για τον υπολογισμό της μεταφοράς κάποιου ρύπου δια μέσω των ζωνών. Έχουν το πλεονέκτημα της εφαρμογής σε πολύπλοκες γεωμετρίες κτιρίων με τη χρήση υπολογιστών. Ωστόσο ο προσδιορισμός έγκυρων δεδομένων είναι δύσκολος. Γι' αυτό το λόγο τα μοντέλα πολλαπλών ζωνών χρησιμοποιούνται περισσότερο για να οριστούν τα όρια μια λύσης παρά για την εύρεση της λύσης. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo σε συνδυασμό με τη χρήση κάποιου από τα μοντέλα πολλαπλών ζωνών είναι μια πολύ χρήσιμη μέθοδος για τον ορισμό των ορίων της λύσης εάν μπορούν να οριστούν οι κατανομές πιθανοτήτων για τις παραμέτρους που υπάρχει αβεβαιότητα.

2.3.1.3 Αποτελεσματικότητα αερισμού

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος αερισμού στην απομάκρυνση ρύπων ή θερμότητας από τον χώρο εκτιμάται με διάφορες παραμέτρους όπως:

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

1. Τοπική αποτελεσματικότητα αερισμού στην απομάκρυνση ρύπων: $\varepsilon_p = \frac{c - c_e}{c_p - c_e}$, όπου c_p είναι η τοπική συγκέντρωση ρύπου, c_e είναι η συγκέντρωση ρύπου του εξωτερικού εισερχόμενου αέρα και c η συγκέντρωση ρύπου του εξερχόμενου αέρα.
2. Ολική αποτελεσματικότητα αερισμού στην απομάκρυνση ρύπων: $\bar{\varepsilon} = \frac{c - c_e}{\bar{c} - c_e}$, όπου \bar{c} είναι η μέση συγκέντρωση ρύπου.

Σε μόνιμες συνθήκες, η συγκέντρωση ρύπου του εξερχόμενου αέρα προκύπτει από τη σχέση: $c = q/Q$, όπου q (m^3/s) είναι ο ρυθμός έκλυσης του ρύπου στον χώρο και Q (m^3/s) είναι ο ρυθμός εισερχόμενου αέρα.

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος αερισμού στην απομάκρυνση ενός ρύπου σε ένα σημείο του χώρου με την πάροδο του χρόνου καθορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

3. $\varepsilon_a = \frac{c_o - c_t}{c_o - c_e}$, όπου c_o είναι η αρχική συγκέντρωση του ρύπου σε ένα σημείο και c_t η συγκέντρωση του ρύπου στο ίδιο σημείο με την πάροδο χρόνου t .

2.3.1.4 Ροή μέσω ανοιγμάτων

Γενικά, ο ρυθμός ροής αέρα σε έναν κλειστό χώρο μέσω ανοιγμάτων εξαρτάται από α) το μέγεθος και την κατανομή των οδών ροής β) τα χαρακτηριστικά της ροής στις οδούς γ) τη διαφορά πίεσης κατά μήκος των οδών. Για την εκτίμηση της ροής αέρα και οι 3 προαναφερθέντες παράγοντες είναι σημαντικοί. Η βασική αρχή για την εκτίμηση της ροής είναι το ισοζύγιο μάζας του αέρα σε όλο το χώρο. Παρόλο που η ροή είναι αρκετά πολύπλοκη, μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση ενός εκ των 2 εξισώσεων, που αναφέρονται παρακάτω, βάσει του είδους του ανοίγματος.

2.3.1.4.1 Μεγάλα ανοίγματα

Για ανοίγματα σχετικά μεγάλου μεγέθους όπως αεραγωγοί (vents) και μεγάλες ρωγμές (cracks) η ροή τείνει να είναι τυρβώδης υπό συνήθεις πιέσεις. Σε αυτήν την περίπτωση ο ρυθμός ροής είναι ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας της διαφοράς πίεσης κατά μήκος του ανοίγματος και υπολογίζεται από την σχέση:

$$Q = C_d A \sqrt{2\Delta P / \rho_0} \quad (47)$$

Στην περίπτωση ανοίγματος με αιχμηρές ακμές, ο συντελεστής παροχής C_d είναι σχεδόν ανεξάρτητος του αριθμού Reynolds και έχει τιμή ίση με 0,61. Ωστόσο, για τα ανοίγματα των περισσότερων κτιρίων ο συντελεστής μπορεί να λάβει διαφορετική τιμή ανάλογα με τη γεωμετρία των ανοιγμάτων και την διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Κατά τον κώδικα BS 5925 (BS 5925, 1991) η σχέση (47) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανοίγματα μέχρι 10 mm. Η ενεργός επιφάνεια $C_d A$ μπορεί να ληφθεί από πίνακες όπως αυτές στις Οδηγίες ASHRAE (ASHRAE, 2005).

2.3.1.4.2 Μικρά ανοίγματα

Για ιδιαίτερος στενά ανοίγματα (ρωγμές) με βαθιές οδούς ροής, η ροή είναι ουσιαστικά στρωτή ή τυρβώδης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο ρυθμός ροής δίνεται από την εξίσωση Couette:

$$Q = \left(\frac{bh^3}{12\mu L} \right) \Delta P \quad (48)$$

Στην περίπτωση ευρύτερων ρωγμών η ροή δεν είναι ούτε στρωτή ούτε τυρβώδης αλλά ενδιάμεσης κατάστασης. Γι' αυτό το λόγο είναι δυνατό να συνδυαστούν οι εξισώσεις (47) και (48) σε μία εξίσωση εκθετικής μορφής:

$$Q = kL(\Delta P)^n \quad (49)$$

Η παραπάνω εξίσωση καλείται «εξίσωση ροής διαμέσου ρωγμής» (crack flow equation). Ο συντελεστής k εξαρτάται από τη γεωμετρία της ρωγμής ενώ ο εκθέτης n εξαρτάται από το είδος της ροής και παίρνει την τιμή 0,5 για τυρβώδη ροή και 1,0 για στρωτή. Στην πράξη ο εκθέτης έχει τιμή μεταξύ 0,6 και 0,7 για ρωγμές ή τυχαία ανοίγματα. Επίσης, έχει προταθεί η παρακάτω μορφή εξίσωσης ως ακριβέστερη της εξίσωσης (49):

$$\Delta p = \alpha Q + \beta Q^2 \quad (50)$$

2.3.1.5 Κινητήριοι μηχανισμοί αερισμού

2.3.1.5.1 Διαφορά πίεσης λόγω ανέμου

Η διαφορά πίεσης κατά μήκος ενός ανοίγματος ή ρωγμής είναι η κινητήρια δύναμη αερισμού. Η διαφορά πίεσης προκαλείται συνήθως από την επίδραση του ανέμου και την διαφορά θερμοκρασίας (πίεση θερμοσιφωνισμού – stack pressure) και από την χρήση οποιαδήποτε μηχανικού μέσου για αερισμό. Η μέση πίεση του ανέμου σε θέση ανάντη της επιφάνειας του κτιρίου υπολογίζεται από τη σχέση (Vitooraporn, 2005-2006):

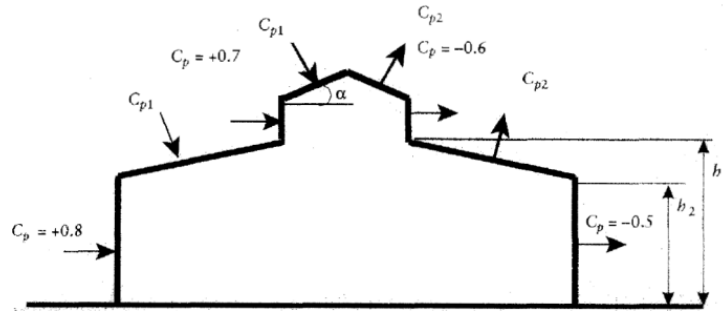
$$P_w = 0,5C_p\rho_0u_H^2 + P_0 \quad (51)$$

Όπου P_0 είναι πίεση του αδιατάρακτου αέρα, ρ_0 η πυκνότητα του αέρα και u_H η ταχύτητα του ανέμου στο μέγιστο σημείο της ανάντη επιφάνειας του κτιρίου. Ο συντελεστής στατικής πίεσης C_p λαμβάνεται συνήθως από μετρήσεις σε αεροσήραγγα (wind tunnel) ή από μετρήσεις σε πραγματικά κτίρια. Η τιμή του προσδιορίζεται από: α) την γεωμετρία του κτιρίου, β) την ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου ως προς το κτίριο γ) την θέση του κτιρίου σε σχέση με άλλα κτίρια και δ) την τραχύτητα του εδάφους. Γενικά για κτίριο ορθογώνιου σχήματος, το C_p κυμαίνεται από 0,6 έως 0,8 για τοίχους ανάντη ανέμου και από 0,6 έως -0,4 για τοίχους κατάντη ανέμου (βλέπε Σχήμα 5). Η παρακάτω σχέση προέκυψε από τη βάση δεδομένων των Swami

και Chandra (όπως παρατίθεται από τους Goodfellow και Tahti, 2001, p. 576) και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης τιμής του C_p σε μία επιφάνεια κτιρίου:

$$NC_p = \ln \left[\begin{array}{l} 1,248 - 0,703 \sin\left(\frac{a}{2}\right) - 1,175 \sin^2(a) + 0,131 \sin^3(2aG) + \\ 0,769 \cos\left(\frac{a}{2}\right) + 0,07G^2 \sin^2\left(\frac{a}{2}\right) + 0,717 \cos^2\left(\frac{a}{2}\right) \end{array} \right] \quad (52)$$

Όπου NC_p : κανονικοποιημένος συντελεστής C_p , a : γωνία σε βαθμούς ° μεταξύ της κατεύθυνσης του ανέμου και της καθέτου του υπό εξέταση τοίχου και G : φυσικός λογάριθμος του λόγου του πλάτους του υπό εξέταση τοίχου προς το πλάτος παρακείμενου τοίχου.



Σχήμα 5: Παράδειγμα τιμών C_p σε τυπικό βιομηχανικό κτίριο

Κατά τις Οδηγίες ASHRAE, η ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται βάσει μιας ταχύτητας μετρούμενης σε μετεωρολογικό σταθμό u_{met} από τη σχέση:

$$u_H = u_{met} (\delta_{met} / H_{met})^{a_{met}} (H / \delta)^{\alpha} \quad (53)$$

όπου δ είναι το πάχος του οριακού στρώματος του ανέμου και ο εκθέτης α υπολογίζεται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους πλησίον του κτιρίου και a_{met} , δ_{met} οι ίδιες παράμετροι υπολογισμένες από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2). Τυπικές τιμές για μετεωρολογικούς σταθμούς, συνήθως σε επίπεδη και ανοιχτή περιοχή, είναι $a_{met}=0,14$ και $\delta_{met}=270 \text{ m}$. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι με την εξίσωση (53) υπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H το οποίο βρίσκεται πάνω από το μέσο ύψος των εμποδίων όπως κτίρια και βλάστηση. Σε ύψη χαμηλότερα από αυτό το μέσο ύψος, όπως π.χ. στις οροφές κτιρίων πυκνοκατοικημένης περιοχής η ταχύτητα του ανέμου u_H εξαρτάται από την πολεοδομική διάταξη και ως εκ τούτου η εξίσωση είναι λιγότερο αξιόπιστη.

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

Πίνακας 2: Τιμές παραμέτρων a και δ (ASHRAE, 2005)

Terrain Category	Description	Exponent a	Layer Thickness δ , m
1	Large city centers, in which at least 50% of buildings are higher than 21.3 m, over a distance of at least 0.8 km or 10 times the height of the structure upwind, whichever is greater	0.33	460
2	Urban and suburban areas, wooded areas, or other terrain with numerous closely spaced obstructions having the size of single-family dwellings or larger, over a distance of at least 460 m or 10 times the height of the structure upwind, whichever is greater	0.22	370
3	Open terrain with scattered obstructions having heights generally less than 9.1 m, including flat open country typical of meteorological station surroundings	0.14	270
4	Flat, unobstructed areas exposed to wind flowing over water for at least 1.6 km, over a distance of 460 m or 10 times the height of the structure inland, whichever is greater	0.10	210

Μια άλλη σχέση υπολογισμού της ταχύτητας ανέμου u_H είναι η ακόλουθη:

$$u_H = u_M K_H H^a \quad (54)$$

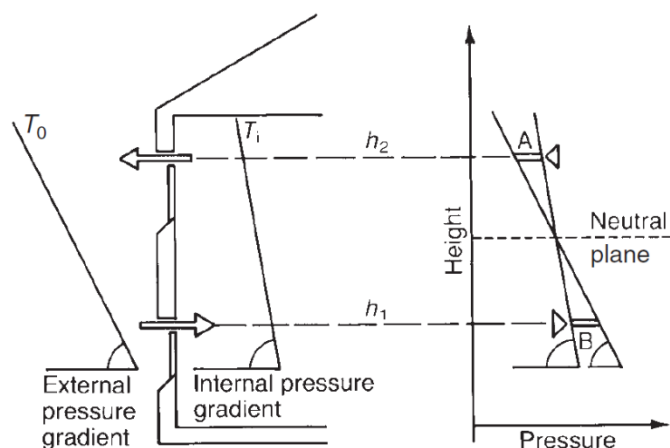
όπου u_M η μέση ταχύτητα σε ύψος 10 m σε ανοιχτό χώρο, u_H ταχύτητα σε ύψος H και K_H και a παράμετροι εξαρτώμενοι από την τοπογραφία της περιοχής. Τιμές για τις παραμέτρους K_H και a λαμβάνονται από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3: Τιμές για τις παραμέτρους K_H και a (Chartered Institution of Building Services Engineers CIBSE cited in Vitooraporn, 2005-2006, p. 4)

Τοπογραφία	K_H	a
Ανοιχτή, επίπεδη περιοχή	0,68	0,17
Περιοχή με διάσπαρτα εμπόδια	0,52	0,20
Αστική περιοχή	0,35	0,25
Κέντρο πόλεως	0,21	0,33

2.3.1.5.2 Διαφορά πίεσης λόγω άνωσης (διαφορά πυκνότητας)

Ένας άλλος μηχανισμός φυσικού αερισμού είναι η διαφορά πυκνότητας μεταξύ του εσωτερικού με τον εξωτερικό αέρα η οποία δημιουργείται συνήθως λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Η διαφορά πυκνότητας προκαλεί βαθμίδες πίεσης στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο καθώς επίσης και μεταξύ τους.



Σχήμα 6: Αερισμός χώρου με 2 κάθετα ανοίγματα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (Anubi, 2005)

Όταν ο εσωτερικός αέρας είναι θερμότερος από τον εξωτερικό, ο αέρας εισέρχεται στο χώρο διαμέσου των ανοιγμάτων που βρίσκονται κοντά στο έδαφος ενώ ο θερμότερος εσωτερικός αέρας εξέρχεται από τα ανοίγματα που βρίσκονται κοντά στην οροφή. Αντίστροφη ροή εμφανίζεται όταν ο περιβάλλοντος αέρας είναι θερμότερος του εσωτερικού. Το ύψος μετάβασης της εισροής του περιβάλλοντος αέρα σε εκροή του αέρα από τον χώρο καλείται ουδέτερο επίπεδο (neutral plane). Στο ουδέτερο επίπεδο (βλέπε Σχήμα 6) η εσωτερική πίεση ισούται με την εξωτερική. Η θέση του ουδέτερου επιπέδου είναι συνάρτηση της συνολικής κατανομής και των χαρακτηριστικών της ροής των ανοιγμάτων.

Η πίεση λόγω άνωσης (p_s , stack pressure) εκφράζεται συνήθως σε σχέση με τη θέση του κατώτερου ανοίγματος ή ενός σημείου αναφοράς του χώρου και δίνεται από την σχέση:

$$p_s = p_0 - \rho g z \quad (55)$$

Η βαθμίδα πίεσης καθ' ύψος δίνεται από την σχέση:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g = -\rho_0 g \frac{T_0}{T} \quad (56)$$

Από την σχέση (56) είναι εμφανές ότι η πίεση μειώνεται καθ' ύψος. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (56), η πίεση λόγω διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ 2 κάθετων ανοιγμάτων απέχοντα κατά H (βλέπε Σχήμα 6) δίνεται από τη σχέση:

$$p_s = -\rho_0 g H \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \quad (57)$$

Βάσει της σχέσης (57), διαφορά θερμοκρασίας κατά 20 K μεταξύ περιβάλλοντος και εσωτερικού χώρου με 2 ανοίγματα απέχοντα 5 m προκαλεί διαφορά πίεσης 4.3 Pa η οποία είναι συγκρίσιμη με την διαφορά πίεσης που προκαλεί άνεμος ταχύτητας 5 m/s.

2.3.1.6 Υπολογισμός συνολικής πίεσης και παροχής αερισμού

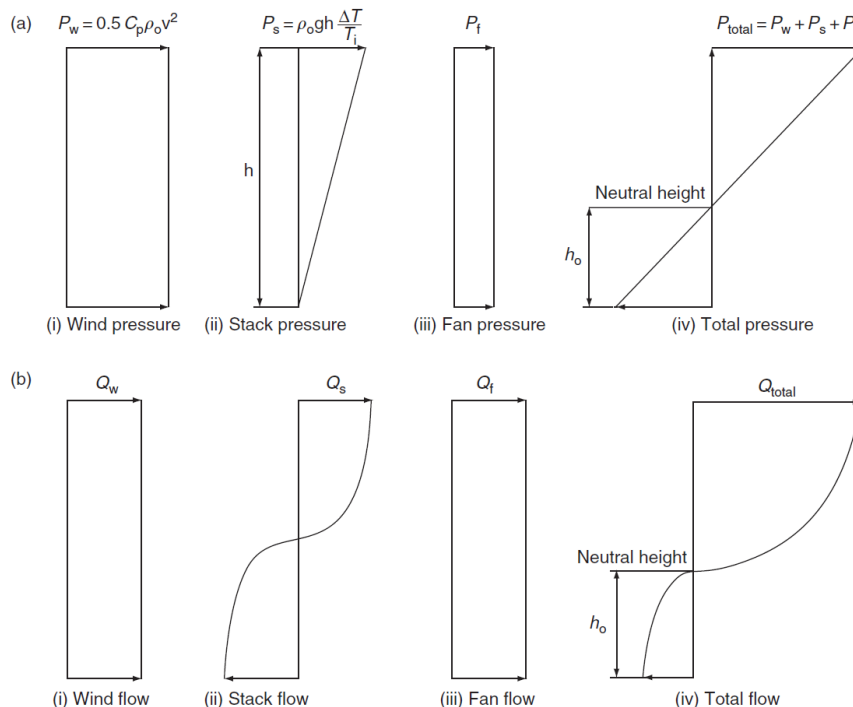
Η συνολική πίεση που επιδρά σε ένα άνοιγμα ή στο σύνολο του χώρου είναι το άθροισμα των πιέσεων λόγω ανέμου, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και μηχανικού αερισμού (πίεση ανεμιστήρα). Οι πιέσεις λόγω ανέμου, διαφοράς θερμοκρασίας και ανεμιστήρα και οι προκύπτουσες παροχές αέρα παρουσιάζονται ποσοτικά στο Σχήμα 7. Στην περίπτωση ύπαρξης καμινάδας θεωρείται ότι αυτή έχει παρόμοια επίδραση με αυτήν μηχανικού αερισμού ανεμιστήρα απαγωγής αέρα. Επειδή η ροή μέσω ανοίγματος είναι ανάλογη του όρου $(\Delta p)^n$ (βλέπε εξίσωση (49)) η συνολική ροή μέσω ανοίγματος προσεγγίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_{tot} = [Q_w^{1/n} + Q_s^{1/n} + Q_{fu}^{1/n}]^n \quad (58)$$

με Q_{fu} : παροχή ασταθούς μηχανικού αερισμού δηλαδή είτε μόνο απαγωγής είτε εισαγωγής αέρα, Q_w : παροχή λόγω ανέμου και Q_s : παροχή λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.

Η τιμή n συνήθως κυμαίνεται από 0,5 έως 1,0 αλλά η τιμή 0,67 είναι συνήθως μια καλή προσέγγιση για τις περισσότερες περιπτώσεις αερισμού. Όταν χρησιμοποιείται ευσταθής μηχανικός αερισμός όπως σε μονάδες ανάκτησης θερμότητας (με μηχανικό αερισμό εισαγωγής και ισοδύναμο αερισμό απαγωγής) η επιπλέον παροχή αέρα δεν επηρεάζει τη συνολική πίεση στο χώρο. Σε αυτήν την περίπτωση η σχέση (58) λαμβάνει τη μορφή:

$$Q_{tot} = Q_{fb} + [Q_w^{1/n} + Q_s^{1/n}]^n \quad (59)$$



Σχήμα 7: α) πιέσεις και β) προκύπτουσες παροχές αέρα στο χώρο λόγω επίδρασης ανέμου, διαφοράς θερμοκρασίας και μηχανικού αερισμού (Anubi, 2005)

Η παραπάνω γενική μέθοδος υπολογισμού του συνολικού αερισμού υποθέτει ότι η εσωτερική πίεση του χώρου επηρεάζεται ισότιμα από το θερμοσιφωνισμό και τον άνεμο πράγμα το οποίο δεν ισχύει πάντα. Η εσωτερική πίεση είναι αποτέλεσμα της επί μέρους πρόσθεσης της πίεσης λόγω ανέμου και θερμοσιφωνισμού (βλέπε εξισώσεις (51) και (57)) και λόγω της μορφής των εξισώσεων η συνολική πίεση μπορεί να προκύψει μόνο με επαναληπτική μέθοδο. Προς αποφυγή τέτοιου είδους επίλυσης χρησιμοποιείται η γενική μέθοδος υπολογισμού συνολικού αερισμού (σχέσεις (58) και (59)). Στην περίπτωση απουσίας μηχανικού αερισμού έχουν προταθεί από τους Walker και Wilson (Walker και Wilson, 1993 όπως παρατίθετο από τον Awbi, 2005, σελ. 106) 4 διαφορετικές προσεγγίσεις:

1. Απλή γραμμική μέθοδος: $Q_{tot} = Q_w + Q_s$ (60)

2. Μέθοδος τετραγώνου: $Q_{tot} = [Q_w^2 + Q_s^2]^{1/2}$ (61)

3. Απλή μέθοδος πρόσθεσης πιέσεων: $Q_{tot} = [Q_w^{1/n} + Q_s^{1/n}]^n$ (62)

4. Μέθοδος αλληλεπίδρασης μεταξύ θερμοσιφωνισμού και ανέμου (μέθοδος αλληλεπίδρασης ή Alberta Infiltration Method): $Q_{tot} = [Q_w^{1/n} + Q_s^{1/n} + B(Q_s Q_w)^{1/2n}]^n$ όπου ο όρος $B(Q_s Q_w)^{1/2n}$ είναι ο όρος αλληλεπίδρασης με $B \approx 0,33$. (63)

Ο όρος αυτός εξαφανίζεται όταν ο άνεμος ή ο θερμοσιφωνισμός κυριαρχούν ενώ λαμβάνει τη μέγιστη τιμή όταν αυτοί οι 2 όροι είναι ισότιμοι ($B = (2^{1/2n} - 2)$).

Οι Walker και Wilson (Walker και Wilson, 1993 όπως παρατίθετο από τον Awbi, 2005, σελ. 106) συμπέραναν ότι ενώ η εξίσωση (61) δεν υπολογίζει την αλληλεπίδραση ανέμου και θερμοσιφωνισμού παράγει αποτελέσματα παρόμοια με αυτά της εξίσωσης (63). Επίσης βρέθηκε ότι η εξίσωση (60) μπορεί να υπερεκτιμήσει τον αερισμό έως και κατά 50%. Με βάση τα παραπάνω οι Walker και Wilson συνέστησαν τη χρήση της εξίσωσης (61) λόγω της απλότητας και αξιοπιστίας για την εκτίμηση της παροχής αερισμού λόγω ανέμου σε συνδυασμό με τη διαφορά θερμοκρασίας.

Υπάρχουν απλοποιημένες μέθοδοι βασισμένες σε εμπειρικά δεδομένα οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα (όπως στις οδηγίες για την εφαρμογή ATEX) για τον υπολογισμό της παροχής αερισμού σε κλειστούς χώρους μονής ζώνης όπως οικίες και μικρού μεγέθους βιομηχανικά ή εμπορικά κτίρια. Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότερες από αυτές.

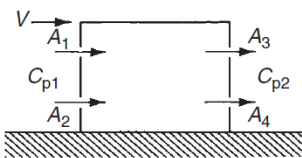
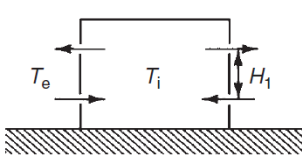
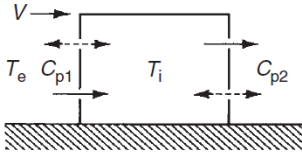
2.3.1.6.1 Μέθοδος British Standards

Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος. Θεωρείται δισδιάστατη ροή σε ένα κτίριο. Ο κανονισμός BS 5925 (BS 5925, 1991) περιέχει πίνακες με εξισώσεις για τον υπολογισμό της παροχής αερισμού λόγω ανέμου, διαφοράς θερμοκρασίας και συνδυασμό των 2 για ανοίγματα σε αντιμέτωπους τοίχους και για ανοίγματα που βρίσκονται στον ίδιο τοίχο. Ο Πίνακας 4 και ο Πίνακας 5 παρουσιάζουν σχηματικά

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

τα χαρακτηριστικά των αναμενόμενων αερισμών για διάφορες διατάξεις αερισμού και τις αντίστοιχες εξισώσεις για τον υπολογισμό των παροχών αερισμού κατά περίπτωση. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η επίδραση της γωνίας του παραθύρου στην τιμή $J(\theta)$ της εξίσωσης (c) του Πίνακα 2.

Πίνακας 4: Εξισώσεις υπολογισμού παροχής εγκάρσιου αερισμού (Anbi, 2005)

Conditions	Schematic representation	Formula
(a) Wind only		$Q_w = C_d A_w V (\Delta C_p)^{1/2}$ $\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$
(b) Temperature difference only		$Q_b = C_d A_b \left(\frac{2 \Delta \theta g H_1}{\bar{T}} \right)^{1/2}$ $\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2}$ $\bar{T} = \frac{1}{2} (T_e + T_i)$
(c) Wind and temperature difference together		$Q = Q_b$ <p style="text-align: center;">for $\frac{V}{\sqrt{(\Delta T)}} < 0.26 \left(\frac{A_b}{A_w} \right)^{1/2} \left(\frac{H_1}{\Delta C_p} \right)^{1/2}$</p> $Q = Q_w$ <p style="text-align: center;">for $\frac{V}{\sqrt{(\Delta T)}} > 0.26 \left(\frac{A_b}{A_w} \right)^{1/2} \left(\frac{H_1}{\Delta C_p} \right)^{1/2}$</p> $\Delta T = T_i - T_e$

Για τον υπολογισμό της παροχής αερισμού μόνο λόγω ανέμου (περίπτωση α), Πίνακας 4) λαμβάνονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$Q_1 = C_d u \sum_{i=1}^2 A_i = C_d \left(\frac{2(P_1 - P_I)}{\rho_1} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^2 A_i \quad (64)$$

Όπου P_I η πίεση στο χώρο, P_1 και ρ_1 η πίεση και η πυκνότητα του εισερχόμενου αέρα και A_i η επιφάνεια ανοίγματος (βλέπε σχήμα περίπτωσης α), Πίνακας 4). Με τη σχέση (64) υπολογίζεται η παροχή εισερχόμενου αέρα με την υπόθεση ότι η πτώση πίεσης κατά μήκος όλων των ανοιγμάτων που βρίσκονται στην ίδια πλευρά του κτιρίου είναι η ίδια. Ομοίως για τον υπολογισμό του εξερχόμενου αέρα:

$$Q_2 = C_d u \sum_{i=3}^4 A_i = C_d \left(\frac{2(P_I - P_2)}{\rho_2} \right)^{1/2} \sum_{i=3}^4 A_i \quad (65)$$

Λύνοντας την εξίσωση (64) ως προς P_I :

$$P_I = P_1 - \frac{Q_1^2 \rho_1}{2C_d^2 (\sum_{i=1}^2 A_i)^2} \quad (66)$$

Αντικαθιστώντας το P_I (σχέση (66)) στην σχέση (65) και θεωρώντας ότι $Q_1 = Q_2 = Q$, το ισοζύγιο μάζας σε μόνιμες συνθήκες παίρνει τη μορφή:

$$P_1 - P_2 = \frac{Q^2}{2C_d^2} \left[\frac{\rho_2}{(\sum_{i=3}^4 A_i)^2} + \frac{\rho_1}{(\sum_{i=1}^2 A_i)^2} \right] \quad (67)$$

Από την εξίσωση (51) έχουμε:

$$C_{p1} = (P_1 - P_0)/0,5\rho_0 u_H^2 \quad (68)$$

$$C_{p2} = (P_2 - P_0)/0,5\rho_0 u_H^2 \quad (69)$$

Από τις εξισώσεις (68) και (69) λαμβάνεται η εξίσωση για την διαφορά πίεσης P_1-P_2 :

$$P_1 - P_2 = (C_{p1} - C_{p2})0,5\rho_0 u_H^2 \quad (70)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (70) στην εξίσωση (67) και θεωρώντας ότι $\rho_1=\rho_2=\rho_0$, $\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(\sum_{i=1}^2 A_i)^2} + \frac{1}{(\sum_{i=3}^4 A_i)^2}$ και $\Delta C_p = C_{p1} - C_{p2}$ λαμβάνεται τελικά η εξίσωση α) (Πίνακας 4):

$$Q = C_d A_w u_H (\Delta C_p)^{1/2} \quad (71)$$

Για τον υπολογισμό της παροχής αερισμού μόνο λόγω διαφοράς θερμοκρασίας (περίπτωση β), Πίνακας 5) λαμβάνονται οι παρακάτω σχέσεις (βλέπε Σχήμα 8):

$$P_{01} = P_{02} + g\rho_0 z \quad (72)$$

$$P_{11} = P_{12} + g\rho_1 z \quad (73)$$

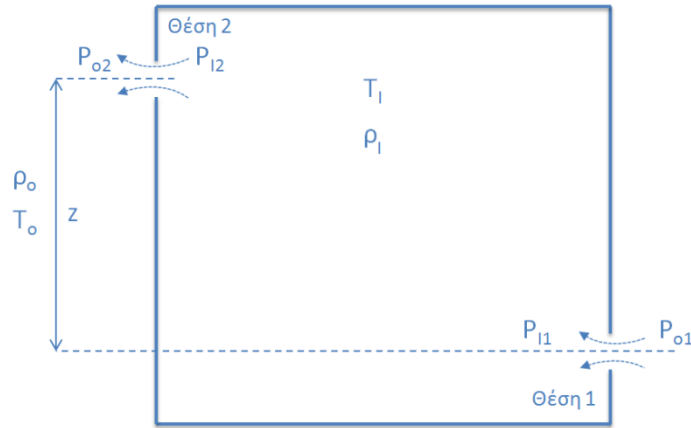
Όπου ρ_0 και ρ_1 είναι οι μέσες πυκνότητες του εξωτερικού και εσωτερικού αέρα αντίστοιχα.

Αφαιρώντας την εξίσωση (73) από την εξίσωση (72):

$$P_{01} - P_{11} = gz(\rho_0 - \rho_1) - (P_{12} - P_{02}) = gz\Delta\rho - (P_{12} - P_{02}) \quad (74)$$

Θεωρώντας ισοζύγιο μάζας σε μόνιμες συνθήκες ($\rho_0 Q_1 = \rho_1 Q_2$) και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (64) και (65):

$$\rho_o C_d A_1 \left[\frac{2(P_{o1} - P_{I1})}{\rho_o} \right]^{0,5} = \rho_1 C_d A_2 \left[\frac{2(P_{I2} - P_{o2})}{\rho_1} \right]^{0,5} \quad (75)$$



Σχήμα 8: Σχηματική αναπαράσταση χώρου με 2 ανοίγματα

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (75) στην εξίσωση (74), λαμβάνεται η παρακάτω σχέση:

$$P_{o1} - P_{I1} = \frac{gz\Delta\rho}{1 + \frac{\rho_o A_1^2}{\rho_1 A_2^2}} \quad (76)$$

Για τον υπολογισμό της παροχής εισερχόμενου αέρα στο χώρο Q_s λαμβάνεται η σχέση:

$$Q_s = C_d A_1 \left(\frac{2(P_{o1} - P_{I1})}{\rho_o} \right)^{0,5} \quad (77)$$

Η εξίσωση (77) με τη χρήση της εξίσωσης (76) για την διαφορά πίεσης $P_{o1} - P_{I1}$ παίρνει τη μορφή:

$$Q_s = C_d A_1 A_2 \left[2gz \frac{\rho_1 \Delta\rho}{\rho_o (\rho_1 A_2^2 + \rho_o A_1^2)} \right]^{1/2} \quad (78)$$

Υποθέτοντας ότι οι μέσες πυκνότητες του εξωτερικού και εσωτερικού αέρα είναι ίσες ($\rho_o = \rho_1$), η σχέση (78) παίρνει τη μορφή:

$$Q_s = C_d A_1 A_2 \left[2gz \frac{\Delta\rho}{\rho (A_2^2 + A_1^2)} \right]^{1/2} \quad (79)$$

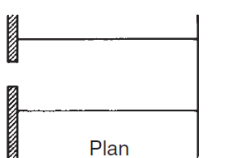
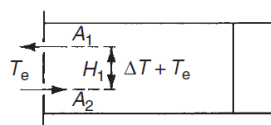
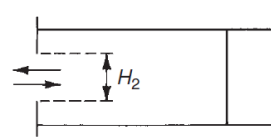
Τέλος, υποθέτοντας ότι $\Delta\rho/\rho = \Delta T/\bar{T}$, όπου \bar{T} : η μέση θερμοκρασία μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού αέρα και ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ

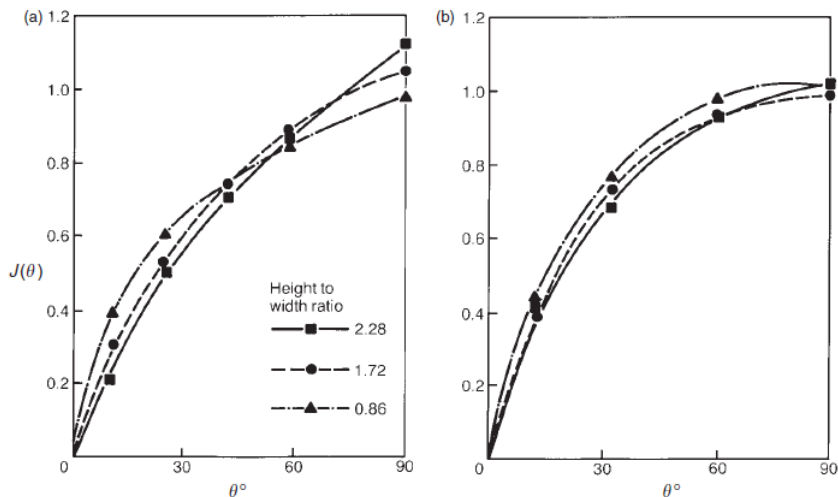
Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

εσωτερικού και εξωτερικού αέρα, λαμβάνεται η παρακάτω σχέση η οποία είναι η ίδια με την σχέση β) (Πίνακας 5):

$$Q_s = C_d \frac{A_1 A_2}{(A_1^2 + A_2^2)^{1/2}} \left(2gz \frac{\Delta T}{\bar{T}} \right)^{1/2} \quad (80)$$

Πίνακας 5: Εξισώσεις υπολογισμού παροχής αερισμού από άνοιγμα σε έναν τοίχο (Anbi, 2005)

Conditions	Schematic representation	Formula
(a) Due to wind	 <p style="text-align: center;">Plan</p>	$Q = 0.025 AV$
(b) Due to temperature difference with two openings		$Q = C_d A \left[\frac{\epsilon \sqrt{2}}{(1 + \epsilon)(1 + \epsilon^2)^{1/2}} \right] \left(\frac{\Delta T g H_1}{\bar{T}} \right)^{1/2}$ $\epsilon = \frac{A_1}{A_2}; \quad A = A_1 + A_2$
(c) Due to temperature difference with one opening		$Q = C_d \frac{A}{3} \left(\frac{\Delta T g H_2}{\bar{T}} \right)^{1/2}$ If an opening light is present $Q = C_d \frac{A}{3} J(\theta) \left(\frac{\Delta T g H_2}{\bar{T}} \right)^{1/2}$ where $J(\theta)$ is given in Figure 3.6



Σχήμα 9: Επίδραση του ανοίγματος παραθύρου: α) παράθυρα με πλάγια παραθυρόφυλλα β) κεντρικά αρθρωτά παράθυρα αερισμού (Anbi, 2005)

2.3.1.6.2 Μέθοδος ASHRAE

Χρησιμοποιείται μια εμπειρική τετραγωνική εξίσωση (εξίσωση (81)) η οποία συνδυάζει την ροή αέρα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και ανέμου για τον υπολογισμό της παροχής αερισμού σε όλο το χώρο. Βασίζεται στη συνολική ενεργή

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

επιφάνεια αερισμού A_{ef} ενώ οι τιμές των σταθερών λαμβάνονται από βάση δεδομένων μετρήσεων αερισμού.

$$Q = A_{ef} \sqrt{(a\Delta T + bu_{avg}^2)} \quad (81)$$

Όπου A_{ef} η συνολική ενεργός επιφάνεια αερισμού του κτιρίου (cm^2), a η σταθερά θερμοσιφωνισμού ($\text{m}^6 \text{h}^{-2} \text{cm}^{-4} \text{K}^{-1}$), b η σταθερά ανέμου ($\text{m}^4 \text{s}^2 \text{h}^{-2} \text{cm}^{-4}$), ΔT η μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού χώρου και περιβάλλοντος (K) και u_{avg} η μέση ταχύτητα ανέμου (m s^{-1}) και Q η παροχή αερισμού σε $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$. Η τιμή του a εξαρτάται από το ύψος του κτιρίου και κυμαίνεται από 0,00188 για κτίριο ενός ορόφου έως 0,00376 για κτίριο τριών ορόφων. Η τιμή του b εξαρτάται από το ύψος του κτιρίου και από την κατηγορία θωράκισης του κτιρίου έναντι ανέμου (wind shielding). Τιμές για το b λαμβάνονται από πίνακες.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι κατά τις Οδηγίες ASHRAE (ASHRAE, 2005) για τον υπολογισμό του αερισμού μόνο λόγω διαφοράς θερμοκρασίας γίνεται χρήση της παραμέτρου του ουδέτερου επιπέδου (neutral plane) και προτείνεται η παρακάτω σχέση:

$$Q_s = C_d A (2g\Delta H_{NPL} \frac{T_i - T_o}{T_i})^{1/2} \quad (82)$$

Όπου ΔH_{NPL} το ύψος από το μέσο του κατώτατου ανοίγματος μέχρι το ουδέτερο επίπεδο NPL. Η εξίσωση (82) εφαρμόζεται όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου είναι μεγαλύτερη από αυτήν του εξωτερικού ($T_i > T_o$). Στην αντίθετη περίπτωση η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

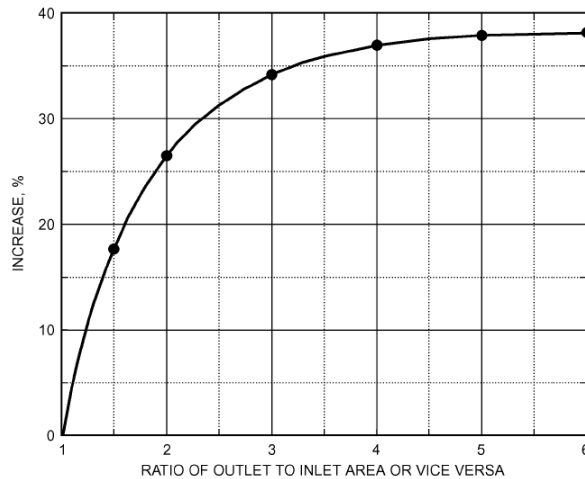
$$Q_s = C_d A (2g\Delta H_{NPL} \frac{T_o - T_i}{T_o})^{1/2} \quad (83)$$

Εάν ο χώρος έχει παραπάνω από 1 άνοιγμα, οι επιφάνειες των ανοιγμάτων εισαγωγής και απαγωγής αέρα θεωρούνται ίσες. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η δυσκολία εκτίμησης του ΔH_{NPL} . Ωστόσο, εάν ένα άνοιγμα ή μια πόρτα καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας αερισμού (90%), τότε το ουδέτερο επίπεδο NPL θεωρείται ότι βρίσκεται στο μέσο του ανοίγματος και το ΔH_{NPL} λαμβάνεται ίσο με το μισό του ύψους αυτού του ανοίγματος. Σε αυτήν την περίπτωση η ροή σε αυτό το άνοιγμα είναι δικατευθυνόμενη και ο συντελεστής C_d υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_d = 0,40 + 0,0045|T_i - T_o| \quad (84)$$

Εαν υπάρχουν άλλα ανοίγματα στο χώρο, η ροή στο παραπάνω άνοιγμα θα είναι μονοκατευθυνόμενη. Σε αυτήν την περίπτωση τιμή ίση με 0,65 προτείνεται για τον συντελεστή C_d . Μέγιστη ροή στη μονάδα επιφάνειας των ανοιγμάτων επιτυγχάνεται όταν τα ανοίγματα εισαγωγής και απαγωγής αέρα έχουν την ίδια επιφάνεια. Οι εξισώσεις (83) και (84) (84)(84)(84)(84) βασίζονται σε αυτήν την ισότητα. Αύξηση του ανοίγματος απαγωγής αέρα ως προς το άνοιγμα εισαγωγής (και ταυτόχρονα) αυξάνει

τον αερισμό αλλά όχι ανάλογα με την αύξηση της επιφάνειας. Όταν τα ανοίγματα δεν έχουν την ίδια επιφάνεια, τότε στην εξίσωση (83) χρησιμοποιείται η επιφάνεια του μικρότερου ανοίγματος και προστίθεται ένα ποσοστό επί της υπολογιζόμενης ογκομετρικής παροχής αέρα Q_s (m³/s) βάσει του παρακάτω σχήματος.

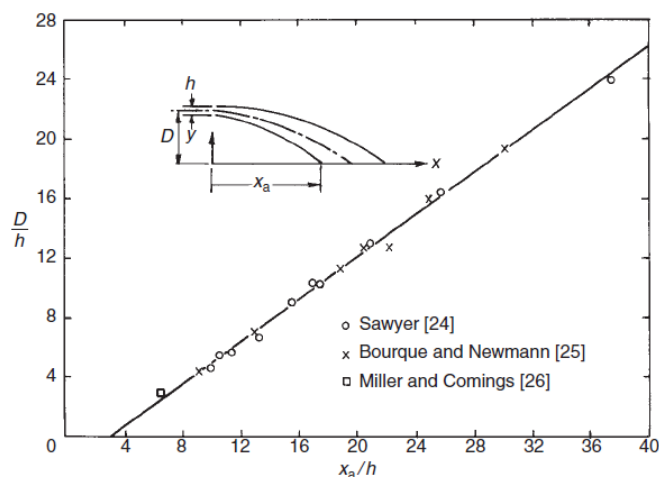


Σχήμα 10: Αύξηση του αερισμού λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας ενός ανοίγματος έναντι του άλλου (ASHRAE, 2005)

2.4 Το φαινόμενο Coanda

Η επίδραση μιας στερεής επιφάνειας στα χαρακτηριστικά της δέσμης είναι ένα φαινόμενο που έχει μελετηθεί στο παρελθόν τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά για δέσμες αέρα στον σχεδιασμό αερισμού κτιρίων. Η γεινίαση μιας επιφάνειας στη μια πλευρά μιας δέσμης παρεμποδίζει τη συμπαράσυρση του περιβάλλοντος αέρα από αυτήν την πλευρά. Αυτό με τη σειρά του δημιουργεί διαφορά πίεσης της δέσμης με συνέπεια την κύρτωσή της προς την στερεή επιφάνεια ελαττώνοντας περισσότερο της συμπαράσυρση αέρα από αυτήν την πλευρά της δέσμης. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως «φαινόμενο Coanda». Η κυρτότητα της δέσμης αυξάνεται έως ότου αυτή προσκόλληθεί στην επιφάνεια. Η προσκόλληση της δέσμης εμφανίζεται μόνο όταν η απόσταση αυτής από την επιφάνεια είναι μικρότερη από μια δεδομένη τιμή, D_c . Όταν η απόσταση είναι μεγαλύτερη από την τιμή D_c , τότε η δέσμη συμπεριφέρεται ως ελεύθερη. Ο Farquhanson (Awbi, 2005) βρήκε ότι η κρίσιμη απόσταση D_c για αξονοσυμμετρική ισόθερμη δέσμη είναι $D_c = 6\sqrt{A_0}$, όπου A_0 η επιφάνεια της δέσμης. Το μήκος της περιοχής προσκόλλησης x_a γραμμικής ισόθερμης δέσμης μελετήθηκε πειραματικά και θεωρητικά από τον Sawyer (Awbi, 2005). Στο Σχήμα 11 φαίνεται η επίδραση της απόστασης της δέσμης D από την στερεή επιφάνεια στην απόσταση της περιοχής προσκόλλησης x_a . Τα αποτελέσματα του Sawyer, καθώς και αυτά των Bourque και Newmann, Miller και Comings (Awbi, 2005) μπορούν να περιγραφούν από την παρακάτω εξίσωση για το εύρος τιμών D/h μεταξύ 3 και 37:

$$\frac{x_a}{h} = 1,37 \frac{D}{h} + 3,0 \quad (85)$$



Σχήμα 11: Επίδραση της απόστασης γραμμική δέσμης από στερεή επιφάνεια στο μήκος της περιοχής προσκόλλησης x_a (Anbi, 2005)

Ο τρόπος επίδρασης αυτού του φαινομένου στην έκταση του αναφλέξιμου νέφους H_2 και CH_4 μελετήθηκε υπολογιστικά πρόσφατα από τους Hourri και συν. (2009) και αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου.

2.5 Βασικές ιδιότητες υδρογόνου

Σε αυτήν την παράγραφο αναφέρονται οι βασικές ιδιότητες του H_2 . Η παράγραφος αποτελείται από 2 ενότητες. Στην πρώτη ενότητα αναφέρονται οι βασικές φυσικές ιδιότητες του H_2 ενώ στην δεύτερη ενότητα παρατίθενται οι χημικές. Επιχειρήθηκε ο συσχετισμός των ιδιοτήτων του H_2 με θέματα ασφάλειας και η σύγκρισή τους με αυτές συμβατικών καυσίμων. Οι πληροφορίες για τις ιδιότητες H_2 που αναφέρονται εδώ αντλήθηκαν κυρίως από 2 πηγές, την «Biennial Report on Hydrogen Safety» (HySafe, 2007) και τις σημειώσεις του μεταπτυχιακού Hydrogen Safety Engineering του πανεπιστημίου Ulster.

Το H_2 είναι το πρώτο στοιχείο του περιοδικού πίνακα με ατομικό αριθμό 1. Είναι το πιο ελαφρύ και άφθονο στοιχείο καταλαμβάνοντας το 75% όλης την ύλης. Το H_2 απαντάται ως ελεύθερο στοιχείο στην ατμόσφαιρα σε ποσοστό μικρότερο του 1 ppm κατ' όγκο. Το πιο διαδομένο ισότοπο H_2 στη φύση είναι το πρώτιο ή ελαφρύ υδρογόνο (1H , με ατομική μάζα 1,007822) το οποίο αποτελεί το 99,98% των ατόμων υδρογόνου και αποτελείται από 1 πρωτόνιο και 1 ηλεκτρόνιο. Σε ποσοστό 0,02% απαντάται το δευτέριο ή βαρύ υδρογόνο (2D) το οποίο αποτελείται από 1 πρωτόνιο, 1 νετρόνιο και 1 ηλεκτρόνιο. Τέλος το τρίτο ισότοπο καλείται τρίτιο (3T), αποτελείται από 1 πρωτόνιο, 2 νετρόνια και 1 ηλεκτρόνιο. Το τρίτιο είναι ραδιενεργό με χρόνο ημίσειας ζωής 12,3 χρόνια.

2.5.1 Φυσικές ιδιότητες υδρογόνου

Το H_2 μπορεί να θεωρηθεί τέλειο αέριο σε ευρεία κλίμακα θερμοκρασιών ακόμη και σε υψηλές πιέσεις. Στις συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο, μη τοξικό και μη διαβρωτικό. Είναι ανωστικό σε θερμοκρασίες άνω

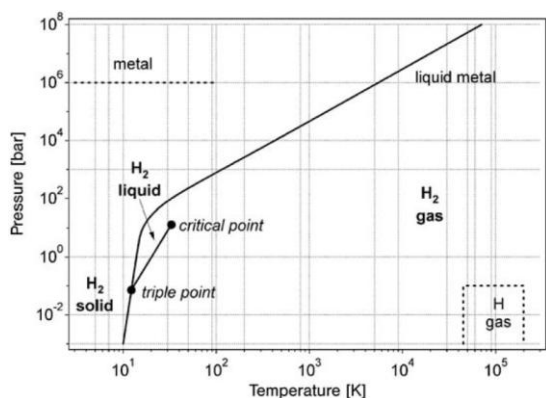
των 22 K, δηλαδή σχεδόν σε όλο το εύρος θερμοκρασιών που βρίσκεται σε αέρια μορφή.

Το H₂ έχει μεγάλη διαχυτότητα και ταχύτητα άνωσης και γι αυτό αναμιγνύεται πολύ γρήγορα με τον περιβάλλοντα αέρα κατά την έκλυσή του. Η ταχύτητα διάχυσης είναι ανάλογη του συντελεστή διαχυτότητας και μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία βάσει της σχέσης $T^{3/2}$. Η διάχυση σε πολύ-συστατικά μίγματα ακολουθεί συνήθως την εξίσωση Stefan-Maxwell. Ο ρυθμός διάχυσης του H₂ στον αέρα είναι μεγαλύτερος κατά 4 φορές περίπου από τον αντίστοιχο ρυθμό διάχυσης του αέρα στον αέρα. Η ταχύτητα ανόδου υπό την επίδραση ανωστικών δυνάμεων εξαρτάται από τη διαφορά πυκνοτήτων μεταξύ H₂ και αέρα καθώς επίσης από δυνάμεις ώσης και τριβής. Επίσης, το μέγεθος και το σχήμα του ανερχόμενου όγκου αερίου και η ατμοσφαιρική τύρβη επηρεάζουν την ταχύτητα ανόδου. Τυπικές τιμές σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι από 1,2 έως 9 m/s. Η θετική άνοση του H₂ είναι ευνοϊκή για θέματα ασφαλείας σε ανοιχτούς χώρους. Αντιθέτως, μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνες συνθήκες σε κλειστούς ή μερικώς κλειστούς χώρους όπου το H₂ μπορεί να συσσωρευτεί π.χ. κάτω από την οροφή. Η διάχυση και η ταχύτητα άνωσης λοιπόν επηρεάζουν τον ρυθμό ανάμιξης του H₂ με τον αέρα. Η ταχεία ανάμιξη του H₂ με τον αέρα οδηγεί πολύ γρήγορα σε αναφλέξιμο νέφος αλλά στη συνέχεια για τον ίδιο λόγο αραιώνεται ταχέως συνήθως σε μίγμα συγκέντρωσης μικρότερης από το κατώτατο όριο αναφλεξιμότητάς του. Ως εκ τούτου, εκτιμάται ότι σε μία τυπική έκρηξη H₂ σε ανοιχτό χώρο μόνο ένα ποσοστό του μίγματος θα πάρει μέρος εκλύοντας στην πραγματικότητα ένα μικρό ποσοστό της διαθέσιμης ενέργειας.

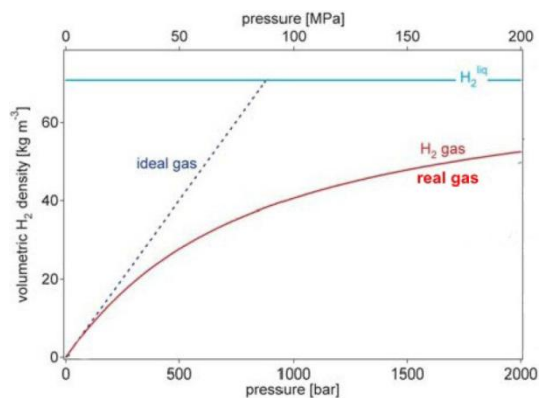
Λόγω του μικρού μεγέθους, μοριακού βάρους και χαμηλού ιξώδους, το H₂ έχει την τάση διαρροής με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτήν άλλων αερίων. Διάχυση σε μικρό ποσοστό είναι πιθανή ακόμα και δια μέσου άθικτων υλικών, ιδιαίτερα οργανικών, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση H₂ σε κλειστούς χώρους. Ο ρυθμός διαρροής είναι κατά 40 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του H₂O και κατά 10 φορές από αυτόν του N₂. Η προσθήκη οσμηρών ή χρωστικών ουσιών θα μπορούσε να διευκολύνει την ανίχνευση μικρών ποσοτήτων διαρροής, ωστόσο αυτό δεν είναι εφαρμόσιμο στις περισσότερες περιπτώσεις ενώ είναι αδύνατο στις εφαρμογές υδροποιημένου υδρογόνου (LH₂).

Το αέριο H₂, διαλυμένο σε υγρά, μπορεί να διαπεράσει παρακείμενα υλικά δοχείων αποθήκευσης. Σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, το H₂ προσβάλλει το μαλακό χάλυβα προκαλώντας εξανθράκωση και ευθραυστοποίηση (embrittlement). Αυτή η ιδιότητα του H₂ εγείρει σοβαρές ανησυχίες σε θέματα σχετικά με την αποθήκευση και μεταφορά αερίου H₂ υπό υψηλές πιέσεις. Η επιλογή λοιπόν των υλικών πρέπει να είναι κατάλληλη π.χ. ειδικά κράματα χάλυβα.

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα



Σχήμα 12: Διάγραμμα φάσης H₂ (Zuttel και συν., 2008, p.76)



Σχήμα 13: Πυκνότητα υγροποιημένου (21.2 K) και αερίου (298.15 K) H₂ συναρτήσει της πίεσης (Hydrogen Safety Engineering)

Το H₂ υπάρχει σε 2 μορφές, το όρθο και πάρα H₂ των οποίων το ποσοστό συμμετοχής εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Το H₂ σε θερμοκρασία δωματίου αποτελείται κατά 75% από το όρθο και κατά 25% από το πάρα. Σε θερμοκρασίες μικρότερες των 80 K το πάρα-H₂ είναι πιο σταθερό. Στους 20 K, οι συγκεντρώσεις σε θερμοκρασιακή ισορροπία είναι 99,821% σε πάρα-H₂ και 0,179% σε όρθο-H₂. Οι περισσότερες φυσικές ιδιότητες δεν διαφέρουν σημαντικά ως προς τις 2 μορφές H₂. Ωστόσο η πιο σημαντική διαφορά είναι η μεγάλη ενεργειακή διαφορά η οποία έχει σαν αποτέλεσμα οι 2 μορφές να διαφέρουν στις τιμές ειδικής θερμότητας και θερμικής αγωγιμότητας. Η παρουσία πεδίου ακτινοβολίας προκαλεί τον σχηματισμό ελεύθερων ατόμων υδρογόνου και ιόντων οι οποίοι δρουν σαν καταλύτες πριν τον ανασυνδυασμό (recombination). Ο ανασυνδυασμός με την σειρά του παράγει παραπάνω όρθο-H₂.

Το φαινόμενο Thompson-Joule είναι θετικό για το H₂ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 193 K, την θερμοκρασία αναστροφής. Αυτό συνεπάγεται ότι η θερμοκρασία του αερίου H₂ αυξάνεται κατά την αποσυμπίεσή του κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει όμως σε ανάφλεξη. Παραδειγματος χάρη, η θερμοκρασία μπορεί να μεταβληθεί κατά 6 K αν λάβει χώρα ακαριαία πτώση πίεσης από 20 MPa σε ατμοσφαιρική. Ωστόσο η πιθανότητα αυτανάφλεξης από αυτό το φαινόμενο είναι μικρή. Είναι πιθανότερο να συμβεί έκρηξη λόγω ηλεκτροστατικής φόρτισης σωματιδίων σκόνης κατά τη διάρκεια αποσυμπίεσης ή αυτανάφλεξη σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το υγροποιημένο H₂ (LH₂) έχει το πλεονέκτημα της υψηλής καθαρότητας και οικονομικότερης αποθήκευσης εις βάρος όμως της σημαντικής ενεργειακής κατανάλωσης για την παραγωγή του, η οποία κατέχει περίπου το 1/3 της θερμότητας καύσης. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η αναπόφευκτη απώλεια από εξάτμιση (boil off) η οποία είναι τυπική για την διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών στην δεξαμενή. Ο ρυθμός εξάτμισης ενισχύεται όταν αποθηκεύεται το όρθο-H₂. Η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την μετατροπή του όρθο σε πάρα στους 20 K είναι μεγάλη (670 kJ/kg) σε σχέση με την τιμή λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης στην ίδια θερμοκρασία (446 kJ/kg) γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν στο σχεδιασμό του κύκλου H₂ για την απομάκρυνση της θερμότητας μετατροπής με ασφαλή τρόπο.

Λόγω του κρίσιμου σημείου του H_2 , το LH_2 μπορεί να αποθηκευτεί σε χαμηλές θερμοκρασίες και ήπιες πιέσεις. Τυπικές συνθήκες αποθήκευσης του LH_2 είναι 21,2 K σε ατμοσφαιρική πίεση. Εάν, σε κλειστό σύστημα, οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας υπερβούν αυτές του κρίσιμου σημείου (βλέπε Σχήμα 12) οι συνέπειες μπορεί να είναι καταστροφικές. Η πίεση στο κλειστό σύστημα μπορεί να αυξηθεί ακόμα και πάνω από 1000 bar σε θερμοκρασία δωματίου.

Για ανοιχτές λίμνες υδροποιημένου υδρογόνου (LH_2 pool), πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι το ψυχρό H_2 έχει μεγαλύτερη τάση για σχηματισμό αναφλέξιμου μίγματος με τον αέρα. Σε κλειστούς χώρους, η αύξηση του όγκου κατά 845 φορές λόγω της θέρμανσης του LH_2 στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μεταβολή των τοπικών συνθηκών του περιβάλλοντος. Σε έναν κλειστό χώρο, η τελική πίεση μπορεί να φτάσει και τα 172 MPa η οποία δημιουργεί σαφώς υπερπίεσεις και μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε ρήξη (bursting).

Περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας από το σημείο βρασμού μπορεί να οδηγήσει σε μίγματα υγρού και στερεού ή τήγματος H_2 . Το τήγμα έχει το πλεονέκτημα της υψηλότερης πυκνότητας και παράτασης του χρόνου αποθήκευσης του κρυογενικού ρευστού καθώς το στερεό τήκεται και απορροφά θερμότητα. Υπάρχει ωστόσο κίνδυνος εισρόφησης αέρα λόγω την μείωσης της πίεσης του ρευστού ακόμα και κάτω από την ατμοσφαιρική. Τέλος στο τριπλό σημείο (θερμοκρασία 13,8 K και πίεση 7,2 kPa) ενυπάρχουν και οι 3 φάσεις σε ισορροπία (Σχήμα 12).

Εάν το H_2 (ή οποιοδήποτε ρευστό) διατηρηθεί πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία του και εφαρμοστεί πίεση δημιουργείται το λεγόμενο υπερκρίσιμο H_2 . Το υπερκρίσιμο H_2 θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως αέριο επειδή είναι συμπιεστό, ως υγρό επειδή έχει συγκρίσιμη πυκνότητα με τα κοινά ρευστά και επίσης υπάρχει μία ενδιάμεση μεταβατική κατάσταση η οποία χαρακτηρίζεται από ισχυρές διακυμάνσεις δομής οι οποίες προκαλούν ασυνήθιστες ιδιότητες ρευστού κοντά στο κρίσιμο σημείο. Υπάρχει επίσης σημαντική εξάρτηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του κρυογενικού H_2 με τη θερμοκρασία και πίεση στην υπερκρίσιμη κατάσταση. Το υπερκρίσιμο H_2 μπορεί να μεταπηδήσει από τυρβώδη σε στρωτή ροή λόγω της εξάρτησης του ιξώδους από την θερμοκρασία.

2.5.2 Χημικές ιδιότητες υδρογόνου

Το H_2 αντιδρά και με μη μεταλλικά στοιχεία (υψηλή ηλεκτραρνητικότητα) και με μεταλλικά (χαμηλή ηλεκτραρνητικότητα) για να σχηματίσει είτε ιοντικούς είτε ομοιοπολικούς δεσμούς. Η ηλεκτραρνητικότητα του H_2 είναι 2,20 (κλίμακα Pauling).

Ως καύσιμο (ή ακριβέστερα ως φορέας ενέργειας) θεωρείται καθαρή και περιβαλλοντικά ευνοϊκή μορφή ενέργειας. Η ενεργειακή πυκνότητα του H_2 βάσει του βάρους του είναι πολύ υψηλή: 1 kg H_2 περιέχει 132,5 MJ η οποία είναι περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του φυσικού αερίου. Το ενεργειακό περιεχόμενο του H_2 συνήθως εκφράζεται ως κατώτερη θερμογόνος δύναμη (242 kJ/mol) ή ως ανώτερη θερμογόνος δύναμη (286 kJ/mol). Η διαφορά μεταξύ των 2 αυτών τιμών είναι μεγάλη (15,6%) συγκριτικά με άλλα καύσιμα λόγω της θερμότητας που

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

απελευθερώνεται κατά την συμπύκνωση των υδρατμών (οι οποίοι μπορούν να δεσμευτούν σε στρόβιλο αλλά όχι σε ενεργειακή συστοιχία – fuel cell).

Μίγμα H₂-αέρα σε στοιχειομετρική αναλογία περιέχει 29,5% H₂ κατ' όγκο και φυσικά κατά την καύση του αποδίδεται η μέγιστη δυνατή ενέργεια. Το προϊόν καύσης του H₂ είναι υδρατμοί. Η φλόγα κατά την καύση του H₂ είναι μη-φωτεινή, σχεδόν άορατη, κυανόχρους. Η μέγιστη θερμοκρασία φλόγας προαναμεμειγμένου στοιχειομετρικού μίγματος H₂-αέρα είναι 2.403 K.

Η κλίμακα αναφλεξιμότητας του H₂ είναι ευρεία και σε θερμοκρασία δωματίου ίση με 4% έως 75% κατ' όγκο στον αέρα και μέχρι 95% στο O₂. Το κατώτατο όριο αναφλεξιμότητας (LFL limit) καθώς είναι το ελάχιστο ποσοστό συγκέντρωσης H₂ που μπορεί να αναφλεγεί είναι συνήθως το πιο σημαντικό όριο που λαμβάνεται υπ' όψιν σε μελέτες ασφάλειας. Η κλίμακα αναφλεξιμότητας διευρύνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Επί παραδείγματι, στους 100 °C το LFL όριο είναι 3%. Η επίδραση της θερμοκρασίας στο κατώτατο όριο αναφλεξιμότητας εκφράζεται από την τροποποιημένη σχέση Burgess-Wheeler σε ατμοσφαιρική πίεση:

$$c_{LFL} = c_{LFL}(300K) - \frac{3,14}{\Delta H_C} (T - 300) = 4,0 - 0,013(T - 300) \quad (86)$$

Όπου ΔH_C είναι η θερμότητα καύσης του H₂ και T η θερμοκρασία εκφρασμένη σε K. Η αντίστοιχη εξίσωση για τον υπολογισμό του ανώτατου ορίου αναφλεξιμότητας (UFL limit) είναι (Eichert, 1992):

$$c_{UFL} = 74,0 - 0,026(T - 300) \quad (87)$$

Η οποία ισχύει για το θερμοκρασιακό εύρος 150-300 K. Δεν υπάρχουν ακόμα πειραματικά δεδομένα για την επίδραση της υγρασίας στα όρια αναφλεξιμότητας. Το H₂ έχει επίσης το χαρακτηριστικό της διαφορετικής τιμής του LFL σε σχέση με τον προσανατολισμό μετάδοσης της φλόγας. Τιμή LFL ίση με 7,2% ισχύει για φλόγες μεταδιδόμενες οριζόντια, ενώ για κατιούσα φλόγα η τιμή αυξάνεται στα 8,5-9,5%. Για τον προσδιορισμό του LFL και UFL μιγμάτων συνήθως εφαρμόζεται ο κανόνας Le Chatelier:

$$\frac{1}{L_m} = \sum \frac{y_i}{L_i} \quad (88)$$

Όπου y_i είναι το κλάσμα όγκου και L_i το όριο αναφλεξιμότητας του συστατικού i . Ο κανόνας Le Chatelier είναι ακριβής για μίγματα H₂-CO αλλά εμφανίζει αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα ως και 35% για μίγματα CH₄-C₃H₈ και CH₄-C₂H₆. Στο εγχειρίδιο της GEXCON αναφέρεται ότι ο κανόνας δεν είναι ακριβής για το H₂.

Η πιθανότητα έκρηξης αναφλέξιμου μίγματος H₂-αέρα είναι μεγάλη. Η θερμοκρασία αυτανάφλεξης, η οποία είναι η ελάχιστη θερμοκρασία θερμής επιφάνειας η οποία μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη ενός μίγματος, είναι για το H₂ 858 K. Είναι σχετικά υψηλή αλλά μπορεί να ελαττωθεί παρουσία καταλυτικών επιφανειών. Το αέριο H₂ δεν έχει σημείο εξάτμισης (flash point) αφού είναι ήδη αέριο σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

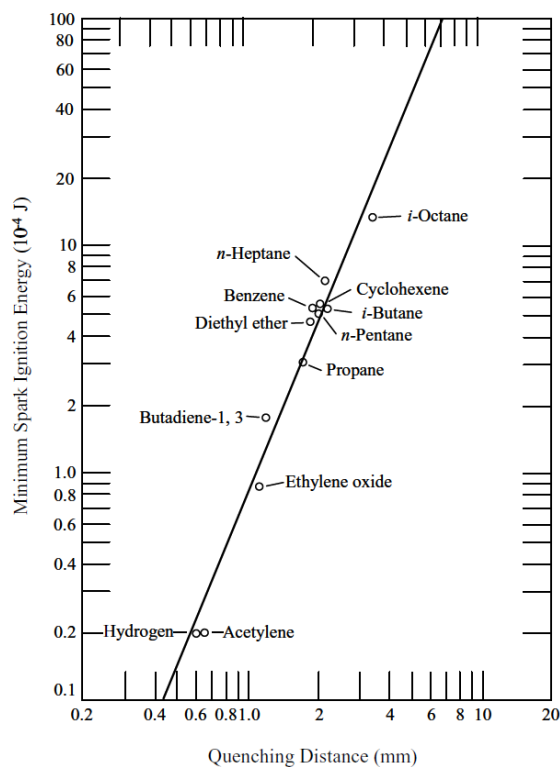
Αυτό σημαίνει ότι το κρυογενικό H_2 θα εξατμιστεί σε όλες τις θερμοκρασίες μεγαλύτερες του σημείου βρασμού του (20 K).

Η ελάχιστη ενέργεια έναυσης (η απαιτούμενη ενέργεια για την έναυση του πιο ευκόλως αναφλέξιμου μίγματος H_2 -αέρα, όπου συνήθως δεν είναι το στοιχειομετρικό μίγμα) είναι 0,2 mJ η οποία είναι πολύ χαμηλότερη από αυτήν των μιγμάτων υδρογονανθράκων με τον αέρα. Ένας ασθενής σπινθήρας ή μια ηλεκτροστατική φόρτιση προκαλούμενη από την ροή H_2 υπό πίεση ή από ανθρώπινη πηγή (~10 mJ) είναι επαρκής για την έναυση του H_2 . Η ελάχιστη ενέργεια έναυσης μπορεί να ελαττωθεί είτε με αύξηση της θερμοκρασίας, της πίεσης ή της περιεκτικότητας του μίγματος σε O_2 . Η θερμοκρασία έναυσης θερμής δέσμης (hot air jet ignition temperature) είναι η χαμηλότερη για το H_2 σε σχέση με όλους τους υδρογονάνθρακες και ελαττώνεται περαιτέρω με αύξηση της διαμέτρου της δέσμης. Εξαρτάται επίσης από τη ταχύτητα της δέσμης και την σύσταση του μίγματος.

Το μέγιστο ασφαλές πειραματικό κενό (maximum experimental safe gap) μεταξύ 2 επιπέδων πλακών, το οποίο επιτρέπει την μετάδοση της φλόγας, είναι για το H_2 0,08 mm. Το κενό σβέσης (quenching gap) στον αέρα είναι η απόσταση ανάμεσα σε 2 επίπεδες πλάκες όπου η έναυση ενός αναφλέξιμου μίγματος καταστέλλεται. Αντιστοιχεί στην μικρότερη διάμετρο σωλήνα διάμεσου του οποίου μια φλόγα μπορεί να διαδοθεί. Αέρια που καίγονται ταχύτερα έχουν μικρότερα κενά σβέσης. Το H_2 έχει κενό σβέσης 0,64 mm. Λόγω των υψηλών πιέσεων έκρηξης το μέγιστο πειραματικό κενό είναι πάντα μικρότερο από το κενό σβέσης.

Η ταχύτητα καύσης ενός αναφλέξιμου μίγματος αερίων, η οποία διαφέρει από την ταχύτητα φλόγας, είναι ενδεικτική της ταχύτητας με την οποία ένα επίπεδο κύμα καύσης προωθείται στο στάσιμο αναφλέξιμο μίγμα και εξαρτάται από την θερμοκρασία, πίεση και συγκέντρωση του αναφλέξιμου αερίου στον αέρα. Η ταχύτητα καύσης του H_2 στον αέρα σε στοιχειομετρική αναλογία και συνθήκες περιβάλλοντος είναι 2,55 m/s και αγγίζει το μέγιστο (3,2 m/s) σε συγκέντρωση 40,1% η οποία μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω σε 11,75 m/s σε καθαρό O_2 . Σε σχέση με τα μίγματα υδρογονανθράκων στον αέρα, η τιμή είναι μεγαλύτερη λόγω της ταχύτερης χημικής κινητικής της αντίδρασης και της μεγάλης διαχυτότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα καύσης τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα μετάβασης από την κατάκαυση (deflagration) στην κατάρρηξη (detonation) το γνωστό φαινόμενο DDT (Deflagration to Detonation Transition). Εν αντιθέσει, η ταχύτητα φλόγας, η οποία υπολογίζεται βάσει ακίνητου παρατηρητή, είναι πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα καύσης λόγω της εκτόνωσης των προϊόντων καύσης, ασταθειών και τυρβώδους παραμόρφωσης της φλόγας. Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα μιας φλόγας κατάκαυσης υπολογίζεται από την ταχύτητα του ήχου του άκαυστου μίγματος αερίων, η οποία είναι 975 m/s για στοιχειομετρικό μίγμα H_2 -αέρα. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι το H_2 έχει πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα τυρβώδους σβέσης σε σύγκριση με τους υδρογονάνθρακες. Αυτό επιτρέπει τις τυρβώδεις φλόγες H_2 να εμφανίζονται σε ευρύτερες ταχύτητες από αυτές που θα μπορούσαν να συντηρήσουν τυρβώδεις φλόγες υδρογονανθράκων στον αέρα.

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα



Σχήμα 14: Σχέση ελάχιστης ενέργειας έναυσης από σπινθήρα με την διάμετρο σβέσης (Lam, 2006)

Η κλίμακα κατάρρηξης είναι συνήθως 18-59 % H₂ κατ' όγκο, ωστόσο εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος. Στη ρωσική πειραματική εγκατάσταση RUT, την μεγαλύτερη του είδους της, παρατηρήθηκε μικρότερο κατώτατο όριο κατάρρηξης (12,5%). Παρουσία μόνο O₂, η κλίμακα διευρύνεται σε 15 έως 90%. Η ταχύτητα κατάρρηξης στον αέρα αγγίζει υπερηχητικές ταχύτητες της τάξεως των 2.000 m/s ενώ παρουσία μόνο O₂ η ταχύτητα φτάνει τα 3.500 m/s. Η ενέργεια που απαιτείται για την έναυση της κατάρρηξης είναι 10 kJ. Γενικά, η απαίτηση τέτοιας υψηλής ενεργειακής πηγής καθιστά την κατάρρηξη του H₂ λιγότερο εύκολη από την κατάκαυσή του. Το H₂ έχει, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μεγάλη ταχύτητα καύσης. Γι αυτό το λόγο είναι δυνατό μία κατάκαυση H₂ να μεταβεί σε κατάρρηξη. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η μετάβαση, πρέπει το νέφος H₂-αέρα να έχει συγκέντρωση μεγαλύτερη από 18% στον αέρα και επιπλέον πρέπει να υπάρχει κάποια επιφάνεια ανάκλασης του ωστικού κύματος (π.χ. τοίχος σε κλειστό χώρο) που θα προκαλέσει αύξηση της πίεσης και κατ' επέκτασιν αύξηση της ταχύτητας καύσης πάνω από την ηχητική στον αέρα (πάνω από 350 m/s).

Το μέγεθος του κελιού κατάρρηξης (detonation cell - λ) είναι μέτρο της δραστηριότητας, μικρότερο μέγεθος καταδεικνύει δραστικότερο μίγμα και μπορεί να μετρηθεί πειραματικά. Επίσης είναι ενδεικτικό για τη μετάβαση από κατάκαυση σε κατάρρηξη. Το H₂ έχει μέγεθος κελιού ίσο με 15 mm και είναι ιδιαίτερος δραστικό ενώ το μεθάνιο έχει περίπου μέγεθος 330 mm και είναι το λιγότερο δραστικό από τα γνωστά καύσιμα. Το μέγεθος του κελιού αυξάνεται για συγκεντρώσεις που αποκλίνουν της στοιχειομετρικής συγκέντρωσης. Στο τέλος της δεκαετίας 1970 αναγνωρίστηκε η χρησιμότητα των μετρήσεων του μεγέθους του κελιού κατάρρηξης. Το πρώτο βήμα ήταν η εύρεση της σχέσης μεταξύ του μεγέθους του κελιού με την κρίσιμη διάμετρο

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

σωλήνα (critical tube diameter - d_c) ίση με $d_c = 13 \cdot \lambda$. Η κρίσιμη διάμετρος σωλήνα είναι η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος προκειμένου το κύμα κατάρρηξης να εξέλθει του σωλήνα και η κατάρρηξη να αναπτυχθεί σε ελεύθερο νέφος. Είναι μέτρο της ελάχιστης διάστασης ελεύθερου νέφους που μπορεί να προκαλέσει κατάρρηξη και συνήθως είναι μεγαλύτερο κατά 10 έως 30 φορές του μεγέθους του κελιού κατάρρηξης.

Πίνακας 6: Ιδιότητες έναυσης και καύσης μιγμάτων διαφόρων καυσίμων με αέρα στους 25 °C και 101,3 kPa (ISO/TR 15916)

Καύσιμο	Κατώτατο όριο αναφλεξιμότητας	Κατώτατο όριο κατάρρηξης (% κατ' όγκο)	Στοιχειομετρικό μίγμα (% κατ' όγκο)	Ανώτατο όριο κατάρρηξης (% κατ' όγκο)	Ανώτατο όριο αναφλεξιμότητας (% κατ' όγκο)	Ελάχιστη ενέργεια έναυσης (mJ)	Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (°C)	Ταχύτητα στρωτής καύσης (cm/s)
Υδρογόνο (H ₂)	4,0	18,3	29,5	59,0	75,0	0,017	585	270
Μεθανόλη (CH ₃ OH)	6,0	-	12,3	-	36,5	0,174	385	48
Μεθάνιο (CH ₄)	5,3	6,3	9,5	13,5	17,0	0,274	537	37
Προπάνιο (C ₃ H ₈)	1,7	3,1	4,0	9,2	10,9	0,240	450	47
Βενζίνη (C ₈ H ₁₈)	1,0	1,1	1,9	3,3	6,0	0,240	215	30

Η απόσταση από την οποία το μέτωπο της φλόγας στο σημείο έναυσης αναπτύσσεται σε κατάρρηξη επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, όπως θερμοκρασία, πίεση, σύσταση μίγματος, γεωμετρία χώρου (παρουσία εμποδίων) και ένταση της πηγής έναυσης.

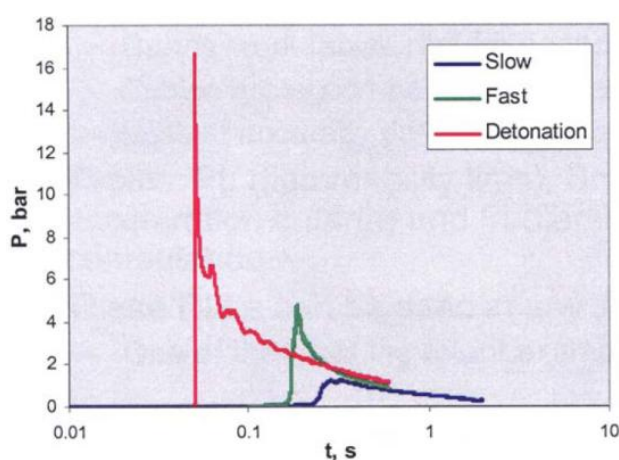
Έκρηξη μίγματος H₂-αέρα προκαλεί τον σχηματισμό ωστικού κύματος, το οποίο εξαρτάται από το είδος της καύσης. Η μέγιστη τιμή υπερπίεσεων στην περίπτωση κατάκαυσης ελεύθερου μίγματος H₂-αέρα είναι της τάξεως των 10 kPa. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι υπερπίεση της τάξεως των 7 kPa θεωρείται επικίνδυνη αφού σε τέτοιες συνθήκες οι άνθρωποι μπορεί να σωριαστούν στο έδαφος. Βλάβες ή ρήξη τυμπάνου ωτός μπορεί να προκληθούν από 35 kPa ενώ η τιμή των 240 kPa θεωρείται ως τιμή κατωφλίου θανατηφόρων περιστατικών.

Η θερμική ενέργεια που ακτινοβολείται από την φλόγα αντιστοιχεί στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη. Μπορεί να ελαττωθεί λόγω απορρόφησης από την υγρασία του περιβάλλοντος. Η εκλυόμενη ακτινοβολία φλόγας H₂ είναι χαμηλή (συντελεστής εκπομπής $\epsilon < 0,1$) εν αντιθέσει με τις φλόγες των υδρογονανθράκων (συντελεστής $\epsilon \sim 1$).



Σχήμα 15: Αόρατη φλόγα H₂ (College of Desert - Manual, 2001)

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα είναι η μη ορατότητα της φλόγας H₂-αέρα ακόμα και σε σκοτεινό χώρο (ειτός κι αν υπάρχουν ρύποι στον αέρα) με συνέπεια να είναι δύσκολη η αναγνώριση και ο εντοπισμός της. Από την άλλη, πλεονέκτημα των φλογών H₂-αέρα είναι η απουσία καπνού (με την υπόθεση ότι δεν καίγεται παράλληλα κάποιο άλλο υλικό) η οποία είναι πολύ σημαντική ιδιαίτερα στους κλειστούς χώρους.

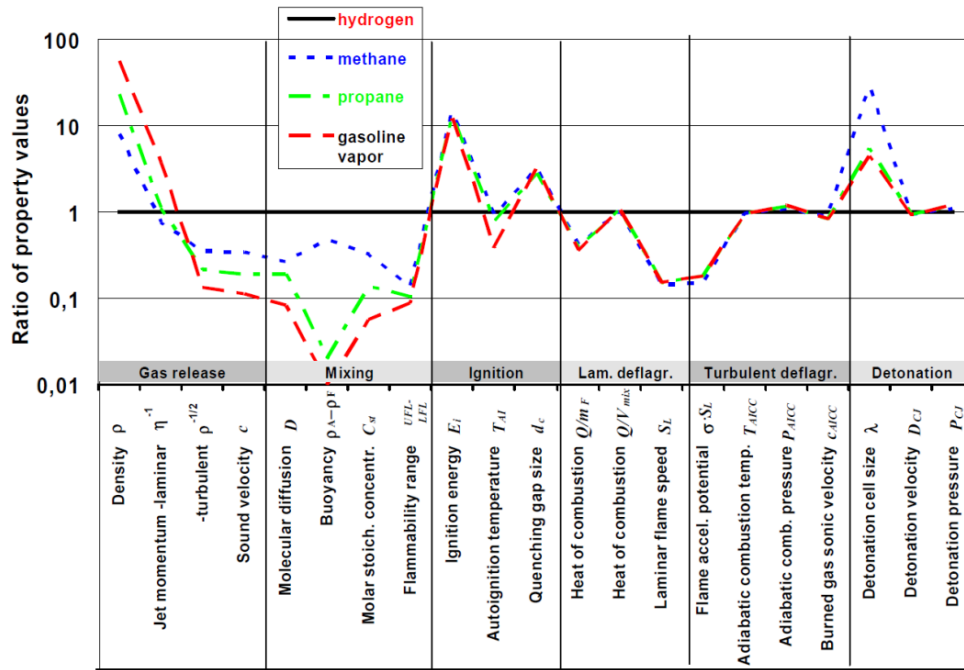


Σχήμα 16: Πιέσεις προκαλούμενες από διάφορα είδη καύσης H₂ (BRHS, 2007)

Σε πολλές πειραματικές μελέτες έκλυσης και διασποράς, χρησιμοποιείται He αντί του H₂ για θέματα ασφαλείας. Το He έχει σχεδόν διπλάσια πυκνότητα (0,1662 kg/m³ σε συνθήκες STP) από αυτήν του H₂, ο συντελεστής μοριακής διαχυτότητάς του είναι περίπου 10% μικρότερος (6,299·10⁻⁵ m²/s σε συνθήκες STP) και το ιξώδες του κατά 120% μεγαλύτερο. Οι Swain και συν. (1999) χρησιμοποίησαν πειραματικά δεδομένα He για την αξιολόγηση ενός κώδικα CFD και συνέκριναν τα αριθμητικά αποτελέσματα με αυτά χρησιμοποιώντας H₂ καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι το He μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του H₂ χωρίς μεγάλες αποκλίσεις.

Στο Σχήμα 17 παρουσιάζονται οι ιδιότητες σχετικές με θέματα ασφάλειας του μεθανίου (κυρίως συστατικό φυσικού αερίου), προπανίου και ατμών βενζίνης σε σύγκριση με αυτές του H₂. Οι ιδιότητες ομαδοποιήθηκαν σε 6 κατηγορίες. Κάθε κατηγορία αντιστοιχεί σε μία φάση που δύναται να εμφανιστεί σε πιθανό σενάριο ατυχήματος: (1) έκλυση, (2) διασπορά και ανάμιξη με τον αέρα, (3) έναυση, (4) αρχική βραδεία στρωτή κατάκαυση, (5) ταχεία τυρβώδης κατάκαυση, (6) κατάρρευση. Οι ιδιότητες των υδρογονανθράκων είναι κανονικοποιημένες με την αντίστοιχη του H₂.

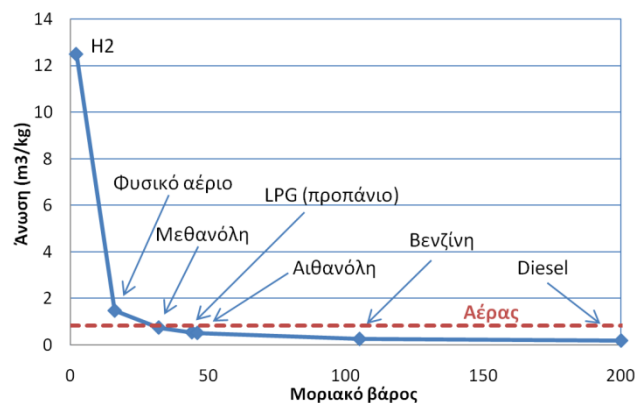
Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα



Σχήμα 17: Σύγκριση ιδιοτήτων (σχετικών με θέματα ασφάλειας) H_2 με αυτές των υδρογονανθράκων (Breitung, 2005)

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 17, οι κυριότερες ιδιότητες του H_2 που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής για θέματα ασφάλειας και που το διαφοροποιούν από τα υπόλοιπα συμβατικά καύσιμα είναι: τα ευρύτερα όρια αναφλεξιμότητας, η πολύ χαμηλή ελάχιστη ενέργεια έναυσης, το μικρότερο μέγιστο ασφαλές πειραματικό κενό, η μεγαλύτερη θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας, η μεγαλύτερη ταχύτητα στρωτής καύσης και η υψηλή διαχυτότά του.

Ωστόσο το H_2 έχει υψηλότερη θερμοκρασία αυτανάφλεξης ενώ η βασικότερη ιδιότητά του που λειτουργεί ευνοϊκά σε θέματα ασφάλειας σε ανοιχτούς χώρους ή χώρους μερικώς κλειστούς (όπου το H_2 δεν μπορεί να συσσωρευτεί) είναι η χαμηλή πυκνότητά του (βλέπε Σχήμα 18). Το H_2 , με πυκνότητα $0,0838 \text{ kg/m}^3$ σε συνθήκες NTP είναι πολύ πιο ελαφρύ από τον αέρα ($1,204 \text{ kg/m}^3$) με συνέπεια να διαφεύγει ταχέως προς τα πάνω πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει με τους βαρύτερους υδρογονάνθρακες.



Σχήμα 18: Το H_2 είναι πολύ πιο ανωστικό από τον αέρα και άλλα καύσιμα (California Energy Commission, 2004)

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

Συμπερασματικά, το H₂ δεν θεωρείται πιο επικίνδυνος φορέας ενέργειας από τα συμβατικά καύσιμα, ωστόσο συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο (Breitung, 2005). Πρέπει λοιπόν να μελετηθεί ιδιαίτερος ούτως ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα προκειμένου να αναπτυχθούν με ασφάλεια οι σχετικές τεχνολογίες. Για την αποδοχή του H₂ ως φορέα ενέργειας, τα επίπεδα ασφάλειας πρέπει να είναι τουλάχιστον συγκρίσιμα με αυτά των συμβατικών καυσίμων.

Πίνακας 7: Εκλυόμενη ενέργεια μετά την έναυση ομοιογενούς μίγματος καυσίμου/αέρα σε υποθετικό χώρο στάθμευσης 85 m³ (California Energy Commission, 2004)

	Εκλυόμενη ενέργεια (kJ)	
	Υδρογόνο	Μεθάνιο
Έναυση μίγματος LFL	33	145
Έναυση στοιχειομετρικού μίγματος	240	275

Ιδιότητες	Υδρογόνο	Φυσικό αέριο (μεθάνιο)	
Μοριακό βάρος	2,016	16,04	→ Το H ₂ έχει μεγαλύτερη τάση διαρροής
Πυκνότητα σε NPT (kg/m ³)	0,08	0,68	→ Το διαρρέον H ₂ έχει μεγαλύτερη ανωστική τάση και διαχέεται ταχύτερα με αποτέλεσμα τη γρήγορη μείωση της συγκέντρωσης κάτω από το LFL
Συντελεστής διάχυσης σε NPT (cm ² /s)	0,61	0,16	
LFL-UFL στον αέρα (% vol.)	4,1-75	5,0-15	→ Οι διαρροές H ₂ σε κλειστούς χώρους έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα έναυσης
Ελάχιστη ενέργεια έναυσης (mJ)	0,02	0,29	→ Οι διαρροές κρυογενικού H ₂ απάγονται ταχύτερα σε συγκεντρώσεις μικρότερες του LFL
Θερμοκρασία βρασμού σε 1 atm (°C)	-253	-162	→ Η εκλυόμενη ενέργεια καύσης H ₂ /αέρα σε κλειστό χώρο είναι μικρότερη
Θερμότητα εξάτμισης (kJ/kg)	446	509	
Ογκομετρική Κατώτατη θερμογόνος δύναμη (kJ/m ³)	9.600	34.000	→ Η έναυση H ₂ /αέρα είναι πιθανότερη να οδηγήσει σε έκρηξη
Ταχύτητα καύσης (m/s)	3,0	0,36	→ Δύσκολη ανίχνευση διαρροής H ₂ και μεθανίου εκτός κι αν χρησιμοποιηθούν οσμηρές ουσίες
Ανίχνευση διαρροής	Δύσκολη	Δύσκολη	
Ανίχνευση φλόγας	Δύσκολη	Μέτρια	→ Οι φλόγες H ₂ δεν είναι ορατές και για αυτό ανιχνεύονται πιο δύσκολα

Σχήμα 19: Σύγκριση των ιδιοτήτων H₂ και μεθανίου σχετικά με θέματα ασφάλειας (California Energy Commission, 2004)

Στους επόμενους πίνακες (Πίνακας 8 και Πίνακας 9) παρουσιάζονται οι θερμοφυσικές, χημικές και ιδιότητες καύσης αερίου, υγρού, τήγματος και στερεού πάρα-H₂ και οι ιδιότητες του κοινού H₂ σε διάφορες συνθήκες.

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

Πίνακας 8: Θερμοφυσικές, χημικές και ιδιότητες καύσης αερίου, υγρού, τήγματος και στερεού πάρα- H_2 (NASA, 1997)

Molecular Weight	2.01594	
NORMAL TEMPERATURE AND PRESSURE (NTP) ^b		
Density of GH ₂	83.764 g/m ³	0.00523 lb _m /ft ³
Density of air (for comparison)	1.198 g/m ³	0.0749 lb _m /ft ³
Specific heat at constant pressure, C _p	14.89 kJ/kg·K	3.559 Btu/lb _m ·°R
Specific heat ratio, $\gamma = C_p/C_v$	1.383	
Enthalpy	4097.7 kJ/kg	1762.8 Btu/lb _m
Internal Energy	2888.0 kJ/kg	1242.5 Btu/lb _m
Entropy	64.44 kJ/kg·K	15.40 Btu/lb _m ·°R
Velocity of sound (adiabatic)	1294 m/s	4246 ft/s
Viscosity	8.81 μ Pa·s	0.00881 centipoise
Thermal conductivity, k	19.14 μ W/m·K	0.111 Btu/ft·h·°R
Dielectric constant, ϵ	1.00026	
Compressibility factor, Z	1.0006	
Index of refraction	1.00012	
CRITICAL POINT		
Temperature	32.976 K	-400.6 °F
Pressure	1,292.8 kPa abs	187.5 psia
Density	31.43 kg/m ³	1.96 lb _m /ft ³
Specific heat at saturation, C _G	(very large)	
Specific heat at constant pressure, C _p	(very large)	
Specific heat ratio, $\gamma = C_p/C_v$	(large)	
Enthalpy	38.49 kJ/kg	16.56 Btu/lb _m
Internal Energy	2.83 kJ/kg	1.22 Btu/lb _m
Entropy	17.6 kJ/kg·K	4.20 Btu/lb _m ·°R
Velocity of sound	350 m/s	1148 ft/s
Viscosity	3.5 μ Pa·s	0.0035 centipoise
Thermal conductivity, k	(anomalously large)	
Dielectric constant, ϵ	1.098	
Compressibility factor, Z	0.3025	
NORMAL BOILING POINT (NBP)		
Normal Boiling Temperature (NBT)	20.268 K	-423.2 °F
Pressure	101.3 kPa	14.696 psia
Density		
of vapor	1.338 kg/m ³	0.0835 lb _m /ft ³
of liquid	70.78 kg/m ³	4.42 lb _m /ft ³
Heat of vaporization	445.6 kJ/kg	191.7 Btu/lb _m
Specific heat at saturation, C _G		
of vapor	-16.51 kJ/kg·K	-3.95 Btu/lb _m ·°R
of liquid	9.38 kJ/kg·K	2.24 Btu/lb _m ·°R

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

Specific heat at constant pressure, C_p		
of vapor	12.15 kJ/kg·K	2.904 Btu/lb _m ·°R
of liquid	9.688 kJ/kg·K	2.315 Btu/lb _m ·°R
Specific heat ratio, $\gamma = C_p/C_v$		
of vapor	1.869	
of liquid	1.688	
Enthalpy		
of vapor	189.3 kJ/kg	81.5 Btu/lb _m
of liquid	-256.3 kJ/kg	-110.2 Btu/lb _m
Internal energy		
of vapor	113.6 kJ/kg	48.87 Btu/lb _m
of liquid	-257.7 kJ/kg	-110.9 Btu/lb _m
Entropy		
of vapor	29.97 kJ/kg·K	7.162 Btu/lb _m ·°R
of liquid	7.976 kJ/kg·K	1.906 Btu/lb _m ·°R
Velocity of sound (adiabatic)		
of vapor	355 m/s	1165 ft/s
of liquid	1093 m/s	3586 ft/s
Viscosity		
of vapor	1.1 μPa·s	0.0011 centipoise
of liquid	13.2 μPa·s	0.0132 centipoise
Thermal conductivity, k		
of vapor	1.69 μW/m·K	0.00977 Btu/ft·h·°R
of liquid	9.9 μW/m·K	0.0572 Btu/ft·h·°R
Dielectric constant, ϵ		
of vapor	1.0040	
of liquid	1.230	
Compressibility factor, Z		
of vapor	0.9061	
of liquid	0.01712	
Surface tension of liquid	0.00193 N/m	1.1x10 ⁻⁵ lb _f /ln
Index of refraction of liquid	1.110	
TRIPLE POINT		
Temperature	13.803 K	-434.8 °F
Pressure	7.04 kPa abs	1.02 psia
Density		
of vapor	0.1258 kg/m ³	0.00784 lb _m /ft ³
of liquid	77.03 kg/m ³	4.81 lb _m /ft ³
of solid	86.50 kg/m ³	5.40 lb _m /ft ³
Heat of fusion	58.29 kJ/kg	25.08 Btu/lb _m
Heat of vaporization	449.17 kJ/kg	193.2 Btu/lb _m
Heat of sublimation	507.39 kJ/kg	218.3 Btu/lb _m
Specific heat at saturation, C_g		
of vapor	-23.28 kJ/kg·K	-5.57 Btu/lb _m ·°R
of liquid	6.87 kJ/kg·K	1.64 Btu/lb _m ·°R
of solid	2.84 kJ/kg·K	0.679 Btu/lb _m ·°R
Specific heat at constant pressure, C_p		
of vapor	10.52 kJ/kg·K	2.513 Btu/lb _m ·°R
of liquid	6.513 kJ/kg·K	1.557 Btu/lb _m ·°R
Specific heat ratio, $\gamma = C_p/C_v$		
of vapor	1.693	
of liquid	1.382	
Enthalpy		
of vapor	140.3 kJ/kg	60.4 Btu/lb _m
of liquid	-308.9 kJ/kg	-132.9 Btu/lb _m
of solid	-367.2 kJ/kg	-158.0 Btu/lb _m
Internal energy		
of vapor	84.23 kJ/kg	36.24 Btu/lb _m
of liquid	-309.0 kJ/kg	-132.9 Btu/lb _m
of solid	-367.3 kJ/kg	-158.0 Btu/lb _m
Entropy		
of vapor	37.52 kJ/kg·K	8.967 Btu/lb _m ·°R
of liquid	20.16 kJ/kg·K	1.186 Btu/lb _m ·°R
of solid	0.739 kJ/kg·K	0.177 Btu/lb _m ·°R
Velocity of sound		
of vapor	305 m/s	1001 ft/s
of liquid	1273 m/s	4177 ft/s
Viscosity		
of vapor	0.74 μPa·s	0.00074 centipoise
of liquid	26.0 μPa·s	0.026 centipoise
Thermal conductivity, k		
of vapor	1.24 μW/m·K	0.00717 Btu/ft·h·°R
of liquid	7.3 μW/m·K	0.0422 Btu/ft·h·°R
of solid	90 μW/m·K	0.52 Btu/ft·h·°R
Dielectric constant, ϵ		
of vapor	1.00038	
of liquid	1.252	
of solid	1.286	
Compressibility factor, Z		
of vapor	0.9850	
of liquid	0.001606	
Density of slush (50% by mass solid)	81.50 kg/m ³	5.09 lb _m /ft ³
Density of slush (50% by volume solid)	81.77 kg/m ³	5.11 lb _m /ft ³

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

Gaseous, Liquefied, Slush, and Solid Para-hydrogen ^a THER PROPERTIES			
Equivalent vol solid @ TP/vol liquid @ NBT	0.8181		
Equivalent vol gas @ NTP/vol liquid @ NBT	845.1		
Pressure required to maintain NBP liquid density in NTP GH ₂ (fixed volume, no venting)	172 MPa	25,000 psi	
Joule-Thomson inversion temperature	193 K	-112 °F	
Heat of combustion (low)	119.93 kJ/g	51,573 Btu/lb _m	
Heat of combustion (high)	141.86 kJ/g	61,003 Btu/lb _m	
Limits of flammability in NTP air	4.0 to 75.0 vol %		
Limits of flammability in NTP oxygen	4.1 to 94.0 vol %		
Limits of detonability in NTP air	18.3 to 59.0 vol %		
Limits of detonability in NTP oxygen	15 to 90 vol %		
Stoichiometric composition in air	29.53 vol %		
Minimum energy for ignition in air	0.017 mJ	1.6x10 ⁻⁸ Btu	
Autoignition temperature	858 K	1085 °F	
Hot air-jet ignition temperature	943 K	1238 °F	
Flame temperature in air	2318 K	3713 °F	
Thermal energy radiated from flame to surroundings	17 to 25%		
Burning velocity in NTP air	265 to 325 cm/s	104 to 128 in/s	
Detonation velocity in NTP air	1.48 to 2.15 km/s	4856 to 7054 ft/s	
Diffusion coefficient in NTP air	0.61 cm ² /s	0.095 in ² /s	
Diffusion velocity in NTP air	< 2.0 cm/s	0.79 in/s	
Buoyant velocity in NTP air	1.2 to 9 m/s	3.9 to 30 ft/s	
Maximum experimental safe gap in NTP air	0.008 cm	0.003 in.	
Quenching gap in NTP air	0.064 cm	0.025 in.	
Detonation induction distance in NTP air	L/D ₈ 100		
Limiting oxygen index	5.0 vol %		
Vaporization rates (steady state) of liquid pools without burning	2.5 to 5.0 cm/s	1 to 2 in/s	
Burning rates of spilled liquid pools	0.5 to 1.1 mm/s	0.02 to 0.04 in/s	
Energy of explosion (theoretical explosive yield)			
≈24 (g TNT)/(g H ₂)	≈24 (lb _m TNT)/(lb _m H ₂)		
0.17 (g TNT)/(kJ H ₂)	4.0x10 ⁻⁴ (lb _m TNT)/(Btu H ₂)		
2.02 (kg TNT)/m ³ NTP GH ₂)	0.126 lb _m TNT)/(ft ³ NTP GH ₂)		
1.71 (g TNT)/(cm ³ NBP LH ₂)	107.3(lb _m TNT)/(ft ³ NBP LH ₂)		

^a McCarty, R. D., J. Hord, and H. M. Roder, *Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data)*, NBS Monograph 168, National Bureau of Standards, Boulder, CO (1981).
^b NTP = 293 K (68 °F) and 101.3 kPa (14.69 psia)

NOTE: Temperature dependent ortho-para changes continue to influence properties in the solid state. Several properties (such as specific heat, thermal conductivity, and thermal diffusivity) are highly sensitive to actual ortho-para composition.

Πίνακας 9: Ιδιότητες κοινού H₂ σε ορισμένες συνθήκες (NASA, 1997)

Properties	Triple Point			Normal Boiling Point		Critical Point	STP	NTP
	Solid	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor			
Temperature ^a , °F (K)	-434.55 (13.957)	-434.55 (13.957)	-434.55 (13.957)	-422.97 (20.390)	-422.97 (20.390)	-399.93 (33.190)	32.000 (273.15)	68.000 (293.15)
Pressure (inches Hg) (mm Hg)	2.147 (54.04)	2.147 (54.04)	2.147 (54.04)	30.19 (760.0)	30.19 (760.0)	391.9 (9865)	30.19 (760.0)	30.19 (760.0)
Density, lb/ft ³ (mol/cm ³)	5.409 (0.04301)	4.817 (0.03830)	8.099x10 ⁻³ (0.0644x10 ⁻³)	4.427 (0.0352)	83.05x10 ⁻³ (0.6604x10 ⁻³)	1.879 (0.01494)	5.609x10 ⁻³ (0.0446x10 ⁻³)	5.225x10 ⁻³ (0.04155x10 ⁻³)
Specific volume, ft ³ /lb (cm ³ /mol)	0.1849 (23.25)	0.2076 (26.11)	123.5 (15.530)	0.2259 (28.41)	12.05 (1514)	0.5322 (66.93)	178.3 (22.420)	191.38 (24.070)
Compressibility factor, Z = PV/RT	----	0.001621	0.9635	0.01698	0.9051	0.3191	1.00042	1.00049
Heats of fusion and vaporization, Btu/lb (J/mol)	24.99 (117.1)	194.4 (911.3)	----	191.9 (899.1)	----	0 (0)	----	----
Specific heat, Btu/lb·°R (J/g·K)								
At saturation, C _g	0.6794 (2.842)	1.642 (6.870)	-5.565 (-23.28)	2.242 (9.380)	-3.946 (-16.51)	very large	----	----
At constant pressure, C _p	----	1.569 (6.563)	2.516 (10.526)	2.336 (9.772)	2.917 (12.20)	very large	3.390 (14.18)	3.425 (14.33)
At constant volume, C _v	----	1.130 (4.727)	1.484 (6.211)	1.375 (5.754)	1.565 (6.548)	2.336 (9.772)	2.407 (10.07)	2.419 (10.12)
Specific heat ratio, γ = C _p /C _v	----	1.388	1.695	1.698	1.863	large	1.408	1.416

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

Enthalpy Btu/lb (J/mol)	68.63 (321.6)	93.62 (438.7)	288.1 (1350)	117.0 (548.3)	308.9 (1447)	248.4 (1164)	1654 (7749)	1776 (8324)
Internal energy, Btu/lb (J/mol)	67.84 (317.9)	92.83 (435.0)	263.5 (1235)	116.5 (545.7)	276.2 (1294)	----	1169 (5477)	1256 (5885)
Entropy, Btu/hr·R (J/mol K)	2.41 (20.3)	3.40 (28.7)	11.1 (93.6)	4.14 (34.92)	9.36 (78.94)	6.47 (54.57)	16.5 (139.6)	16.8 (141.6)
Velocity of sound, ft/s (m/s)	----	4206 (1282)	1007 (307)	3612 (1101)	1171 (357)	----	4088 (1246)	4246 (1294)
Viscosity, centipoise (μPa·s)	----	0.026 (26)	0.00074 (0.74)	0.0132 (13.2)	0.0011 (1.1)	0.0035 (3.5)	0.00839 (8.39)	0.00881 (8.81)
Thermal conductivity, k Btu/ft·h·°R (μW/m·K)	0.52 (90)	0.042 (7.3)	0.0072 (1.24)	0.057 (9.9)	0.0098 (1.69)	anomalously large	0.098 (17.40)	0.106 (18.38)
Prandtl no.	----	2.34	0.630	1.30	0.798	----	0.682	0.688
Dielectric constant, ε	1.287	1.253	1.00039	1.231	1.0040	1.0937	1.000271	1.000253
Index of refraction	1.134	1.119	1.000196	1.1093	1.0020	1.0458	1.000136	1.000126
Surface tension, lbf/in (N/m)	----	0.0171x10 ⁻³ (3.00x10 ⁻³)	----	0.0111x10 ⁻³ (1.94x10 ⁻³)	----	0 (0)	----	----
Equivalent volume per volume of liquid at NBT	0.8184	0.9190	546.3	1.000	53.30	2.357	789.3	847.1

^a These temperatures are based on the IPTS-1968 temperature scale.

^b McCarty, R. D., J. Hord, and H. M. Roder. *Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data)*, NBS Monograph 168, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, (1981).

NOTE: Dashes indicate not applicable.

2.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

ASHRAE Handbook of Fundamental, (2005), “Fundamentals, Chapter 27: Ventilation and Infiltration”, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, SI Edition, Atlanta, GA

Awbi, H., (2005), “Ventilation of buildings” 2nd edition, Spon Press, Taylor and Francis Group

Baraldi, D., Papanikolaou, E., Heitsch, M., Moretto, P., Cant, S., Roekaerts, D., Dorfeev, S., Koutchourko, A., Middha, P., Tchouvelve, A., Ledin, S., Wen, J., Venetsanos, A., Molkov, V., (2010), “Gap analysis of CFD modelling of accidental hydrogen release and combustion”, JRC, Institute for Energy, Netherlands

Birch A.D., Brown D.R., Dodson M.G. and Swaffield F., (1984), “The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas”, Combustion Science and Technology, Vol. 36, pp. 249-261

Birch A.D., Hughes D.J. and Swaffield F., (1987), “Velocity decay of high pressure jets”, Combustion Science and Technology, Vol. 52, pp. 161-171

Breitung W., (2005), “Analysis methodology for hydrogen behaviour in accident scenarios”, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Briggs G. A., (1969), “Plume rise”, TID 25075, Clearinghouse of federal scientific and technical information, Springfield, Va.

BS 5925, (1991), “Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation”, British Standards Institution, London

California Energy Commission, (2004), “Failure modes and effects analysis for hydrogen fueling options – Technical Consultant Report”, CEC-600-2005-001,

Chen C. J. and Rodi W., (1980), “Vertical turbulent buoyant jets – A Review of experimental data”, Pergamon Press

Cheng, Z., Agranat V.M. and Tchouvelev A.V., (2005), “Vertical turbulent buoyant helium jet – CFD modeling and validation”, 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

College of the Desert and SunLine Transit Agency, (2001), “Manual: Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, Module 1: Hydrogen properties”, https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/h2_manual.html

Goodfellow H. and Tahti E., (2001), “Industrial ventilation design guidebook”, Academic Press

El-Amin M.F., (2009), “Non-Boussinesq turbulent buoyant jet resulting from hydrogen leakage in air”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 7873-7882

El-Amin M.F. and Kanayama H. (2009), “Integral solutions for selected turbulent quantities of small-scale hydrogen leakage: A non-buoyant jet or momentum-dominated buoyant jet regime”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 1607-1612

Ewan B.C.R. and Moodie K., (1986), “Structure and velocity measurements in under-expanded jets”, Combustion Science and Technology, Vol. 45, pp. 275-288

Hall F. and Greeno R., (2007), “Building services handbook”, Elsevier Limited, 4th edition

Houf W.G. and Schefer R.W., (2008), “Analytical and experimental investigation of small-scale unintended releases of hydrogen”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 1435-1444

HySafe, (2008), “Deliverable D113: Guidance for using hydrogen in confined spaces – Results from InsHyde”, Version 0.6_04, available at: www.hysafe.org

HySafe, (2007), “BRHS: Biennial Report on Hydrogen Safety, Chapter I: Hydrogen Fundamentals”
http://www.hysafe.org/download/1196/BRHS_Chap1_V1p2.pdf

ISO/TR 15916, (2004), “Technical Report: Basic considerations for the safety of hydrogen systems”, 1st edition

Law C.K., (2006), “Combustion Physocs”, Princeton University, Cambridge University Press, pp. 306

Molkov V., (2007), “Hydrogen safety research: State-of-the-art”, Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Edinburgh, UK

NASA, (1997), “Safety standard for hydrogen and hydrogen systems: Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage and transportation”, NSS 1740.16, Washington DC 20546

Schefer R.W., Houf W.G., Williams T.C., Bourne B. and Colton J., (2007), “Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 2081-2093

Swain M.R., Grilliot E.S. and Swain M.N., (1999), “Experimental verification of a hydrogen risk assessment method”, American Chemical Society, Chemical Health and Safety, May/June 1999, pp. 28-32

Swain M.R., Grilliot E.S. and Swain M.N., (1998), “Risks incurred by hydrogen escaping from containers and conduits”, Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-25315

Vitooraporn C., (2005-2006), Natural Ventilation in building, ASHRAE Thailand Chapter, ASHRAE Journal

Zuttel A., Borgschulte A. and Schlapbach L., (2008), “Hydrogen as a Future Energy Carrier”, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Παπαμανώλης Ν., (1992), “Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση στην κατεύθυνση βέλτιστης αξιοποίησης του φυσικού αερισμού των κτιρίων στο σχεδιασμό”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα αρχιτεκτόνων Πολυτεχνικής Σχολής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ)

Σημειώσεις του μεταπτυχιακού Hydrogen Safety Engineering, (2007), University of Ulster, Faculty of Art, Hydrogen Safety Engineering and Research Centre (HYSAFER Centre), <http://prospectus.ulster.ac.uk/course/?id=7761>

Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα

Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

Λίστα Συμβόλων

Χαρακτήρες κεφαλαίων

A	Επιφάνεια ανοίγματος	m^3
C	Συγκέντρωση κατ' όγκο	v/v
C_d	Συντελεστής παροχής	
CH_4	Μεθάνιο	
D	Διάμετρος	m
He	Ήλιο	
H_2	Υδρογόνο	
L_j	Χαρακτηριστικός αδιάστατος λόγος σχηματισμού δέσμης πλήρους άνωσης	
P	Πίεση	atm
Q	Ογκομετρική παροχή	m^3/s
Re	Αριθμός Reynolds ($Re_0 = \frac{\rho_{αερίου} \cdot U_{εκλ} \cdot D_{εκλ}}{\mu_{αερίου}}$)	
Ri	Αριθμός Richardson ($Ri_0 = \frac{(\rho_{αέρα} - \rho_{αερίου}) \cdot g \cdot D_{έκλυσης}}{\rho_{αερίου} \cdot U_{έκλυσης}^2}$)	
R_p	Λόγος πυκνοτήτων	
T	Θερμοκρασία	K
U	Ταχύτητα	m/s
X	Απόσταση από την έκλυση	m

Χαρακτήρες μικρών γραμμάτων

g	Επιτάχυνση βαρύτητας	m/s^2
j	Δέσμη (jet)	
q	Κλάσμα μάζας	

Δείκτες

atm ή a	Ατμοσφαιρικές συνθήκες
B	Κάτω (bottom)
eq	Ισοδύναμος (equivalent)
fic	Φαινόμενη (fictitious)

i	Έσω (in)
j	Συνθήκες στη δέσμη (jet)
noz	Συνθήκες στο ακροφύσιο (nozzle)
o	Έξω (out)
T	Πάνω (top)
t ₀	Αρχικές συνθήκες στο δοχείο
t	Συνθήκες στο δοχείο (tank)

Ελληνικοί χαρακτήρες

γ	Λόγος θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση προς αυτήν υπό σταθερό όγκο (=c _p /c _v)	
δ	Κλάσμα πυκνότητας H ₂ προς αέρα	
μ	Δυναμικό ιξώδες	kg/m·s
ο	Συνθήκες στο σημείο έκλυσης	
ρ	Πυκνότητα	kg/m ³

Συντομογραφίες

ACH	Air Chnages per hour	h ⁻¹
BOS	Background Oriented Schlieren	
HSL	Health and Safety Laboratory	
LEL	Lower Explosive Limit	
NTP	Normal Temperature and Pressure (T=20°C and P=1atm)	
SCFM	Standard Cubic Feet per Minute	ft ³ /min

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο επιχειρείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των πειραμάτων έκλυσης και διασποράς H₂. Τα πειράματα τα οποία μελετήθηκαν υπολογιστικά στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται λεπτομερώς σε αυτό το κεφάλαιο. Το κεφάλαιο χωρίστηκε σε δυο μέρη. Το πρώτο, αναφέρεται σε πειράματα H₂ σε ανοιχτούς χώρους, το δε δεύτερο σε κλειστούς και αυτό έγινε γιατί ο περιβάλλον χώρος επηρεάζει σημαντικά την χωρική και χρονική κατανομή του H₂ όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2. Μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στα πειράματα του 2^{ου} μέρους (κλειστού χώρου) επειδή μελετήθηκαν υπολογιστικά κυρίως σενάρια έκλυσης και διασποράς H₂ σε κλειστούς χώρους. Το κάθε μέρος χωρίστηκε με τη σειρά του σε πειράματα παρουσία και απουσία εμποδίων. Στο τέλος του κάθε μέρους παρατίθεται ένας συμπιεστικός πίνακας με τις πιο σημαντικές πληροφορίες των συνθηκών έκλυσης των πειραμάτων καθώς και κάποιες παρατηρήσεις με την πρόθεση να δώσουν στον αναγνώστη μια γενική εικόνα της ερευνητικής προσπάθειας για την κατανόηση των φυσικών φαινομένων που απαντώνται κατά την έκλυση και διασπορά H₂ σε πειραματικό επίπεδο. Στους πίνακες αναφέρονται επίσης οι αδιάστατοι αριθμοί Reynolds (*Re*) και Richardson (*Ri*) οι οποίοι υπολογίστηκαν για κάθε πείραμα. Ο αριθμός *Re* καθορίζει το είδος της ροής, στρωτή (*Re* <<) ή τυρβώδης (*Re* >>). Ωστόσο, στην περίπτωση τυρβωδών ανωστικών εκλύσεων ο αριθμός *Ri* είναι η σημαντικότερη παράμετρος αφού αυτός καθορίζει κατά πόσο η έκλυση επηρεάζεται από την άνωση ή σε ποια απόσταση από την έκλυση η άνωση παίζει σημαντικό ρόλο.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι κατά τους Chen και Rodi (1980) στην περιοχή όπου ισχύει $Ri^{2/3} \left(\frac{\rho_o}{\rho_a}\right)^{1/3} \frac{x}{D} < 0,5$ η άνωση δεν παίζει ρόλο και ο παράγοντας που επηρεάζει την ροή είναι η ορμή της δέσμης, ενώ στην περιοχή όπου ισχύει $Ri^{2/3} \left(\frac{\rho_o}{\rho_a}\right)^{1/3} \frac{x}{D} > 5$ η άνωση επηρεάζει σημαντικά την ροή και η επίδραση της ορμής είναι αμελητέα.

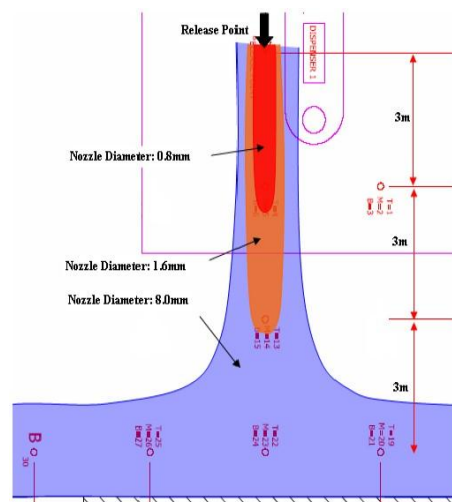
Τα πειράματα που παρουσιάζονται είναι είτε μικρής κλίμακας είτε μεγάλης (πραγματικής). Στα πειράματα μικρής κλίμακας οι μετρήσεις λαμβάνονταν συνήθως κοντά στην πηγή ενώ στα πειράματα μεγάλης κλίμακας το ενδιαφέρον μετατοπιζόταν στον περιβάλλοντα χώρο όπου λαμβάνει χώρα η ανάμιξη του H₂ με τον αέρα. Εκτός από τα πειράματα H₂ συμπεριλήφθησαν σε αυτό το κεφάλαιο και πειράματα He. Το He έχει παρόμοιο μοριακό βάρος με αυτό του H₂ με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ομοιότητες κατά την έκλυση και διασπορά του. Πολλοί πειραματιστές εξάλλου, επιλέγουν τη χρήση He αντί H₂ για λόγους ασφάλειας επειδή το He δεν αναφλέγεται. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το H₂ είναι κατά 8% πιο ανωστικό από το He (η σχετική άνωση ως προς τον αέρα είναι 93% για το H₂ και 86% για το He) και ως εκ τούτου έχει την τάση να ανέρχεται πιο γρήγορα. Επίσης η διαχυτότητα στον αέρα για το H₂ είναι 0,759 cm²/s και για το He 0,697 cm²/s σε συνθήκες NTP ενώ η πυκνότητα του He είναι σχεδόν διπλάσια από αυτήν του H₂. Πειράματα λοιπόν με He μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την συμπεριφορά του H₂ κατά την έκλυση και διασπορά του αλλά δεν μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τα πειράματα με H₂.

3.2 Πειράματα σε ανοιχτούς χώρους

3.2.1 Πειράματα παρουσία εμποδίων

3.2.1.1 Πειράματα σε σταθμό ανεφοδιασμού H₂ πραγματικής κλίμακας

Οι Tanaka και συν. (2005) παρουσίασαν πειράματα έκλυσης H₂ από τον διανομέα σταθμού ανεφοδιασμού πραγματικής κλίμακας. Μελετήθηκαν τρεις διάμετροι έκλυσης (0,8 mm, 1,6 mm και 8 mm) από δοχείο χωρητικότητας 250 l και πίεσης 40 MPa (Σχήμα 1). Η έκλυση ήταν οριζόντια και η μέγιστη έκταση του αναφλέξιμου νέφους ήταν 6 m στην περίπτωση διαμέτρου έως και 1,6 mm ενώ έφτασε τον συνοριακό τοίχο του σταθμού στην περίπτωση διαμέτρου 8 mm. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά ενός απλοποιημένου μοντέλου διασποράς και ήταν ικανοποιητικά για τις εκλύσεις διαμέτρου μέχρι 1,6 mm ενώ τα αποτελέσματα του μοντέλου ήταν μεγαλύτερα από τα πειραματικά στην περιοχή κοντά της έκλυσης διαμέτρου 8 mm.



Σχήμα 1: Μέγιστη έκταση αναφλέξιμου νέφους εκλύσεων H₂ από τον διανομέα σταθμού ανεφοδιασμού (Tanaka και συν., 2005)

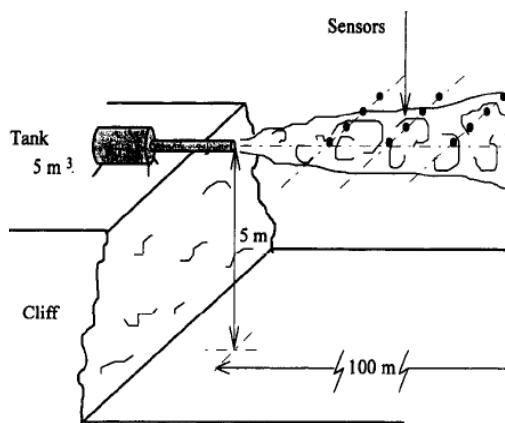
3.2.2 Πειράματα απουσία εμποδίων

3.2.2.1 Έκλυση H₂ από αγωγό χαμηλής πίεσης και μελέτη της επίδρασης ανέμου

Οι Mattei και συν. (2009) μελέτησαν εκλύσεις H₂ από αγωγό χαμηλής πίεσης και παρουσίασαν την επίδραση της έντασης και κατεύθυνσης του ανέμου στο πεδίο συγκέντρωσης με την προοπτική να χρησιμοποιήσουν τα αποτελέσματα σαν βάση δεδομένων για μελέτες ασφάλειας και αποσόβησης πυρκαγιών. Απέδειξαν ότι το πεδίο συγκέντρωσης επηρεάζεται από την ένταση του ανέμου όταν η ταχύτητα της δέσμης H₂ είναι συγκρίσιμη με αυτήν του ανέμου.

3.2.2.2 Χαρακτηρισμός του πεδίου συγκέντρωσης υπερκρίσιμων δεσμών H₂ και CH₄

Τα πειράματα έλαβαν χώρα στο INERIS από τους Ruffin και συν. (1996) στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος EMERGE. Η πειραματική διάταξη περιελάμβανε ένα δοχείο όγκου 5 m³ και έναν οριζόντιο αγωγό έκλυσης με ακροφύσιο μεταβαλλόμενης διαμέτρου από 25 mm μέχρι 150 mm.



Σχήμα 2: Διάταξη πειραμάτων (Ruffin και συν., 1996)

Το δοχείο τοποθετήθηκε σε ύψος 5 m από το έδαφος προκειμένου να θεωρηθεί αμελητέα η επίδραση του εδάφους στις μετρήσεις. Οι ανιχνευτές συγκέντρωσης τοποθετήθηκαν στην υποηχητική περιοχή και κάθετα προς την έκλυση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Τα πειράματα είχαν σκοπό να περιγράψουν τυχαίες εκλύσεις βιομηχανικής κλίμακας. Στην περίπτωση υποκρίσιμων δεσμών (subcritical jets) το πεδίο συγκέντρωσης μπορεί να περιγραφεί ως μια ζώνη ψευδο-αυτοδιατήρησης (pseudo-self-preservation).

Η μείωση κατά μήκος του άξονα έκλυσης είναι μία υπερβολική συνάρτηση της απόστασης από το σημείο έκλυσης και εξαρτάται ισχυρά από το λόγο (R_p) της πυκνότητας του εκλυόμενου αερίου (ρ_j) προς αυτήν του περιβάλλοντος αέρα (ρ_a) και από την διάμετρο έκλυσης (D_j). Η ισοδύναμη διάμετρος έκλυσης ορίζεται συνήθως από την σχέση: $D_{eq} = D_j \cdot \sqrt{R_p}$. Η σχέση της συγκέντρωσης κατά μήκος του άξονα έκλυσης είναι:

$$\frac{C}{C_j} = \frac{1}{B} \frac{D_j}{X - X_c} \sqrt{R_p} = \frac{1}{B} \frac{D_{eq}}{X - X_c}, (C_j = 1) \quad (1)$$

όπου X_c είναι η ιδεατή τετμημένη της συνάρτησης μείωσης της συγκέντρωσης και X είναι η απόσταση από την έκλυση. Η ισοδύναμη διάμετρος D_{eq} μπορεί να ερμηνευτεί ως η διάμετρος μιας δέσμης πυκνότητας ρ_a με την ιδιότητα να έχει την ίδια βαθμωτή ροή με τη δέσμη πυκνότητας ρ_j εκλυόμενης από διάμετρο D_j (δηλαδή $C_a \cdot \rho_j \cdot U_j \cdot C_j \cdot$

$D_j^2 = \rho_a \cdot U_{fic} \cdot C_j \cdot D_{eq}^2$). Για την περίπτωση υπερκρίσιμων δεσμών οι Birch και συν. (1984) όρισαν μία ιδεατή δέσμη ξεκινώντας από την περιοχή μετά την εκτόνωση της πραγματικής δέσμης και πρότειναν την παρακάτω εξίσωση λαμβάνοντας υπ' όψιν την αρχή διατήρησης μάζας (η μέθοδος των Birch και συν. (1984) αναφέρεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 5):

$$\frac{D_{fic}}{D_j} = \frac{D_{fic}}{D_{noz}} = \sqrt{C_d \cdot \frac{P_{to}}{P_{atm}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma+1/2(\gamma+1)} \cdot \left(\frac{T_{atm}}{T_{to}}\right)^{1/2}} \quad (2)$$

Οι Birch και συν. (1984) απέδειξαν πειραματικά ότι η φαινόμενη διάμετρος D_{fic} μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της αξονικής συγκέντρωσης με παράμετρο τον λόγο P_{to}/P_{atm} . Στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν υπερκρίσιμες δέσμες CH_4 και C_2H_4 ενώ η πίεση του δοχείου P_{to} ήταν σταθερή. Στα πειράματα των Ruffin και συν. (1984) χρησιμοποιήθηκε H_2 και CH_4 η δε πίεση P_t ήταν χρονικά μεταβαλλόμενη με αρχική τιμή $P_{to}=40 \text{ bar}$. Μετρήσεις της πίεσης στο δοχείο P_t έλαβαν χώρα καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Οι Ruffin και συν. (1984) απέδειξαν πειραματικά ότι η εξίσωση (1) ισχύει για τις συνθήκες των πειραμάτων τους εφόσον η φαινόμενη διάμετρος D_{fic} αντικατασταθεί από την ισοδύναμη διάμετρο D_{eq} (όπου $D_{eq} = D_{fic} \cdot (\rho_{fic}/\rho_a)^{1/2}$). Τέλος, πειράματα εκρήξεων έλαβαν χώρα στις συνθήκες που περιγράφησαν παραπάνω. Τα πειράματα έδειξαν ότι οι υπερπίεσεις που προκύπτουν από την κατάκαυση (deflagration) εξαρτώνται σημαντικά από το σημείο ανάφλεξης (ignition point).

3.2.2.3 Έκλυση H_2 , μέτρηση πεδίου συγκέντρωσης και σύγκρισή του με αποτελέσματα ολοκληρωματικών μοντέλων

Οι Ganci και συν. (2009) παρουσίασαν πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης H_2 συναρτήσει της απόστασης από την πηγή (κατά μήκος και καθ' ύψος του άξονα συμμετρίας) με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες αξιολόγησης μοντέλων CFD. Η έκλυση πραγματοποιήθηκε από ακροφύσιο 11 mm η δε πίεση στο δοχείο αποθήκευσης H_2 ήταν 1 MPa. Ελήφθησαν επίσης μετρήσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών όπως ένταση και διεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία και πίεση κοντά στο ακροφύσιο. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των ολοκληρωματικών μοντέλων (integral models) Effects 4.0 και Phast 6.3 τα οποία είναι τα πιο δημοφιλή μοντέλα για μελέτες εκτίμησης βιομηχανικών κινδύνων. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπ' όψιν την επίδραση του ανέμου μόνο όταν η έκλυση έχει τον ίδιο προσανατολισμό. Τα αποτελέσματα συγκέντρωσης H_2 με τη χρήση των μοντέλων ήταν μεγαλύτερα από τα πειραματικά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση των πραγματικών συνεπειών μιας απροσχεδίαστης έκλυσης.

3.2.2.4 Μεγάλης πίεσης έκλυση H_2 στην ατμόσφαιρα

Περίπου 60 πειράματα H_2 οριζόντιας έκλυσης έγιναν από το HSL (Shirvill και συν., 2005) σε διάφορες πιέσεις (από 5 barg έως και 150 barg) και διαμέτρους έκλυσης (από 1 mm έως και 12 mm). Έλαβαν χώρα μετρήσεις της συγκέντρωσης H_2 κατά μήκος του άξονα έκλυσης (σε απόσταση από 3 m έως 11 m) καθώς και μετρήσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν η συλλογή δεδομένων για μελέτες αξιολόγησης υπολογισμών CFD. Αξιοσημείωτο είναι ότι το H_2 σε καμία από

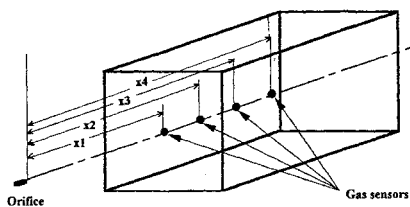
τις εκλύσεις που μελετήθηκαν δεν αυτοανεφλέγει μολονότι έχει τη φήμη εύκολης αυτανάφλεξης.



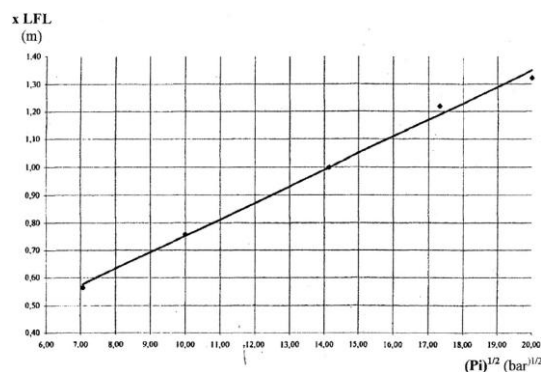
Σχήμα 3: Πειραματική διάταξη (Shirvill και συν., 2005)

3.2.2.5 Έκλυση H₂ και μέτρηση προκύπτοντος πεδίου συγκέντρωσης

Τα πειράματα έλαβαν χώρα στο INERIS, ένα δημόσιο ερευνητικό φορέα με έδρα το Verneuil-en-Halatte (Oise) της Γαλλίας από τον Chaîneaux (1999). Οι μετρήσεις συγκέντρωσης H₂ στον αέρα έγιναν επί του οριζόντιου άξονα έκλυσης και σχετικά κοντά σ' αυτήν. Η έκλυση H₂ πραγματοποιήθηκε από κυκλικό ακροφύσιο (διαμέτρου 0,5 mm) που ήταν συνδεδεμένο με δοχείο όγκου 19 lt μέσω αγωγού διαμέτρου 1,6 mm. Οι πιέσεις αποθήκευσης που εξετάστηκαν ήταν 50, 100, 200 και 400 bar. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η πειραματική διάταξη, η θέση των 4 ταχείας απόκρισης καταλυτικών ανιχνευτών και το ακροφύσιο έκλυσης. Ο Chaîneaux (1999) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι για κάθε αρχική πίεση η μεταβολή του αντιστρόφου της συγκέντρωσης H₂ συναρτῆσει της απόστασης από το σημείο έκλυσης είναι γραμμική. Επίσης, για το εύρος των πιέσεων που εξετάστηκαν πειραματικά, βρέθηκε ότι η μέγιστη απόσταση της συγκέντρωσης H₂ ίσης με το κατώτατο όριο αναφλεξιμότητάς του - LFL (4% κατ' όγκο) - είναι μία γραμμική συνάρτηση ως προς την τετραγωνική ρίζα της πίεσης αποθήκευσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 4: Πειραματική διάταξη (Chaîneaux, 1999)



Σχήμα 5: Μεταβολή μέγιστης απόστασης συγκέντρωσης H₂ ίσης με LFL συναρτῆσει της τετραγωνικής ρίζας της πίεσης αποθήκευσης (HySafe report, 2004b)

3.2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων σε ανοιχτούς χώρους

Αναφορά (έτος)	Αέριο	Ογκομετρικός ρυθμός έκλυσης (l/s ή NI/s)	H ₂ (ισοδύναμος) ρυθμός μάζας έκλυσης (g/s)	Ταχύτητα εξόδου (m/s)	Re ₀	Ri ₀	Στόχος	Παρατηρήσεις
Mattei (2009)	H ₂	6,85, 19,2, 32,6	0,58, 1,64, 2,78	ηχητική	3,19E4	1,97E-7	Μελέτη εκλύσεων H ₂ από αγωγό χαμηλής πίεσης και επίδραση ανέμου στο πεδίο συγκέντρωσης.	Το πεδίο συγκέντρωσης επηρεάζεται από την ένταση του ανέμου όταν η ταχύτητα της δέσμης H ₂ είναι συγκρίσιμη με αυτήν του ανέμου.
Chaîneaux (1999)	H ₂	6,45, 12,9, 25,8, 38,7, 51,6	0,55, 1,1, 2,2, 3,3, 4,4	ηχητική	6,38E3	3,91E-8	Μέτρηση προκύπτοντος πεδίου συγκέντρωσης.	Για κάθε αρχική πίεση η μεταβολή του αντιστρόφου της συγκέντρωσης H ₂ συναρτήσει της απόστασης από το σημείο έκλυσης είναι γραμμική.
Ruffin (1996)	H ₂ και CH ₄	α) H ₂ : 1,3E4, 5,22E4, 1,17E5, 2,09E5, 4,7E5 β) CH ₄ : 4,52E3, 1,81E4, 4E4, 7,2E4, 1,62E5	α) H ₂ : 1.11E3, 4.45E3, 10E3, 17,8E3, 40E2 β) CH ₄ : 3E3, 12,2E3, 27,6E3, 49E3, 11E4	α) H ₂ : ηχητική β) CH ₄ : ηχητική	α) H ₂ : 3,19E5, 6,38E5, 9,57E5, 1,28E6, 1,91E6 β) CH ₄ : 5,67E5, 1,13E6, 1,7E6, 2,26E6, 3,4E6	α) H ₂ : 1,95E-6, 3,91E-6, 5,87E-6, 7,83E-6, 1,17E-5 β) CH ₄ : 1E-6, 2E-6, 3E-6, 4E-6, 6E-6	Πειραματική διερεύνηση πεδίου συγκέντρωσης υπερκρίσιμων δεσμών H ₂ και CH ₄ (μετρήσεις συγκεντρώσεων στην υποχητική περιοχή)	Ο ρυθμός μείωσης της κατά βάρος συγκέντρωσης κατά μήκος του άξονα υπερκρίσιμης δέσμης ισούται με αυτόν μιας υποκρίσιμης, αν σταθμιστεί από μία ισοδύναμη διάμετρο η οποία λαμβάνει υπ' όψιν την πίεση και την πυκνότητα στην περιοχή της έκλυσης
Ganci (2009)	H ₂	6,92E2 και 4,81E2	59 και 41	ηχητική	1,405E5	8,61E-7	Μετρήσεις συγκέντρωσης H ₂ συναρτήσει της απόστασης από την πηγή με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες αξιολόγησης μοντέλων CFD	Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά ολοκληρωματικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα με τη χρήση των μοντέλων ήταν μεγαλύτερα από τα πειραματικά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση των πραγματικών συνεπειών μιας απροσχεδιαστικής έκλυσης.
Tanaka (2005)	H ₂	1,332E2, 5,325E2 και 1,331E4	11,37, 45,4 και 1.135	ηχητική	1,02E4, 2,04E4, 1,022E5	6,262E-8, 1,25E-7, 6,26E-7	Μελέτη πειραμάτων έκλυσης H ₂ από διανομέα σταθμού ανεφοδιασμού πραγματικής κλίμακας	Έκταση αναφλέξιμου νέφους 6 m για διάμετρο έως και 1.6 mm, έφτασε συνοριακό τοίχο σταθμού για διάμετρο 8 mm. Πειράματα συγκρίθηκαν με απλοποιημένο μοντέλο διασποράς. Ικανοποιητικά για εκλύσεις διαμέτρου μέχρι 1.6 mm
Shirvill (2005)	H ₂	-	-	ηχητική			Συλλογή δεδομένων για μελέτες αξιολόγησης υπολογισμών CFD εκλύσεων H ₂ μεγάλης πίεσης	Το H ₂ σε καμία από τις εκλύσεις που μελετήθηκαν δεν αυτό-ανεφλέγει μολονότι έχει τη φήμη ότι αυτό-αναφλέγεται εύκολα.

Στα πειράματα ηχητικών εκλύσεων ή όταν οι συνθήκες στο σημείο έκλυσης δεν ήταν γνωστές, η πυκνότητα του αερίου $\rho_{αερίου}$ καθώς και το κινηματικό του ιξώδες $\mu_{αερίου}$ υπολογίστηκαν σε συνθήκες T= 288,15 K και P= 101.325 Pa

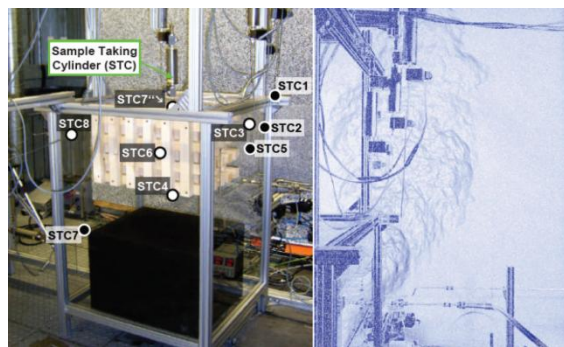
3.3 Πειράματα σε κλειστούς χώρους

3.3.1 Πειράματα παρουσία εμποδίων

3.3.1.1 Έκλυση H₂ σε μοντέλο συσκευής ενεργειακής συστοιχίας (fuel cell)

Συνολικά 200 πειράματα έκλυσης και καύσης H₂ σε μοντέλο συσκευής ενεργειακής συστοιχίας (fuel cell) με φυσικό και τεχνητό αερισμό παρουσιάστηκαν από τους Friedrich και συν. (2009) με σκοπό τη μελέτη επικινδυνότητας στην περίπτωση μεγάλης έκλυσης H₂ μέσα στη συσκευή και την ανάκτηση πειραματικών δεδομένων για τέτοιου είδους σενάρια.

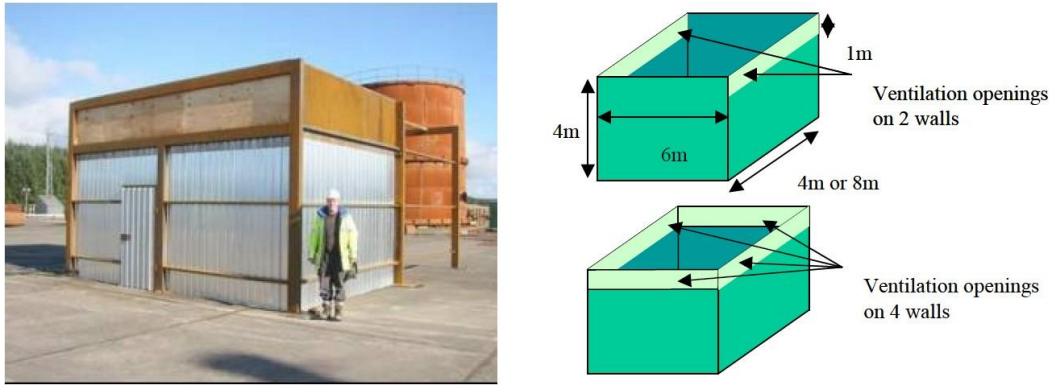
Η συσκευή είχε δυο ειδών εσωτερικές διατάξεις, μια με 32% επί του συνολικού όγκου εμπόδια και μια με 57%. Η έκλυση H₂, διάρκειας 1 sec, κυμάνθηκε από 1,5 έως 15 g/s. Οι μετρήσεις συγκέντρωσης H₂ έγιναν εντός και εκτός της συσκευής. Στην περίπτωση διάταξης με 32% εμπόδια, ακόμα και τα 3 g/s έκλυσης δημιούργησαν αναφλέξιμο νέφος εντός και εκτός της συσκευής ενώ στην περίπτωση 57%, αναφλέξιμο νέφος δημιουργήθηκε με ακόμα ασθενέστερη έκλυση (1,5 g/s).



Σχήμα 6: Πειραματική διάταξη (αριστερά) και εικόνα πειράματος έκλυσης 6 g/s H₂ με την μέθοδο BOS (δεξιά) (Friedrich και συν., 2009)

3.3.1.2 Πειράματα σε σταθμό ανεφοδιασμού H₂ πραγματικής κλίμακας

Οι Tanaka και συν. (2005) παρουσίασαν πειράματα H₂ σε σταθμό ανεφοδιασμού πραγματικής κλίμακας με σκοπό να μελετήσουν την συμπεριφορά του H₂ κατά την έκλυση, διασπορά και έκρηξη του. Συγκεκριμένα, για τα πειράματα διασποράς, εκλύσεις H₂ πίεσης 10 MPa από ακροφύσιο διαμέτρου 0,8 mm και 1,6 mm έλαβαν αρχικά χώρα σε 3 σημεία ενός δωματίου αποθήκευσης (στη γωνία, στο κέντρο και παραπλευρώς ενός εκ των 4 τοίχων) με οριζόντια ή κάθετη κατεύθυνση. Η συγκέντρωση H₂ μετρήθηκε σε 30 σημεία μέσα στο δωμάτιο με τη χρήση ανιχνευτών οξυγόνου. Το δωμάτιο είχε φυσικό αερισμό σε απόσταση 1 m από την οροφή, είτε σε 2 είτε και στους 4 τοίχους όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Η ενεργή/ελεύθερη επιφάνεια αερισμού ήταν σε κάθε περίπτωση 50%. Βρέθηκε ότι 3 λεπτά περίπου μετά την έναρξη της έκλυσης οι συνθήκες μέσα στο δωμάτιο ήταν σχεδόν μόνιμες. Επίσης, ο αερισμός προκαλούμενος από την άνωση λόγω της έκλυσης του H₂ (buoyancy induced ventilation) και της παρουσίας εξωτερικού ανέμου (wind-driven ventilation) ήταν ικανός να διατηρήσει την συγκέντρωση H₂ μέσα στο δωμάτιο κάτω από 17% σε όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 7: Αριστερά – Φωτογραφία μοντέλου χώρου αποθήκευσης, Δεξιά – Σχηματική αναπαράσταση των 2 περιπτώσεων φυσικού αερισμού (Tanaka και συν., 2005)

Τα προηγούμενα πειράματα έδωσαν μία γενική εικόνα για την συμπεριφορά του H_2 στις συνθήκες έκλυσης που μελετήθηκαν. Οι Tanaka και συν. (2005) προχώρησαν στην κατασκευή μοντέλου σταθμού ανεφοδιασμού H_2 πραγματικής κλίμακας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά λειτουργίας: α) $300 \text{ Nm}^3/\text{h}$ παραγωγή H_2 , β) $300 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ροή συμπιεστή H_2 , γ) 3500 Nm^3 αποθήκευση H_2 και δ) 2 διανομείς H_2 . Πειράματα έκλυσης και διασποράς H_2 έλαβαν χώρα στο δωμάτιο αποθήκευσης διαστάσεων $5 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$. Μεταξύ της οροφής και των τοίχων υπήρχε είτε ελεύθερος χώρος είτε χώρος με μεταλλικό πλέγμα 50% ελεύθερης επιφάνειας, ύψους 1 m. Μέσα στο δωμάτιο τοποθετήθηκε μια διάταξη 35 κυλίνδρων, χωρητικότητας ο καθένας 250 l (Σχήμα 8). Η εκλυόμενη ποσότητα H_2 εξαρτάται από το σημείο και το μέγεθος της έκλυσης καθώς επίσης και από την έγκαιρη ανίχνυσή της η οποία θα πρέπει να συνοδεύεται από την απομόνωση της διαρρέουσας περιοχής του αγωγού ή του κυλίνδρου αποθήκευσης. Η έκλυση H_2 από 1 κύλινδρο θεωρήθηκε ως το δυσμενέστερο σενάριο και μελετήθηκε πειραματικά. Η πίεση αποθήκευσης ήταν 40 MPa ενώ το ακροφύσιο είχε διάμετρο 0,8 mm, 1,6 mm και 8 mm. Μελετήθηκαν επίσης εκλύσεις από κυλίνδρους μικρότερης χωρητικότητας (125 l). Στην περίπτωση έκλυσης από ακροφύσιο διαμέτρου 8 mm, ποσότητα H_2 ίση με 65 Nm^3 ελευθερώνεται στο χώρο μέσα σε 10 δευτερόλεπτα. Τέτοιου είδους ταχεία έκλυση είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευτεί εγκαίρως ώστε να αποφευχθεί η σχεδόν ολοσχερής απελευθέρωση H_2 από τον κύλινδρο αποθήκευσης.

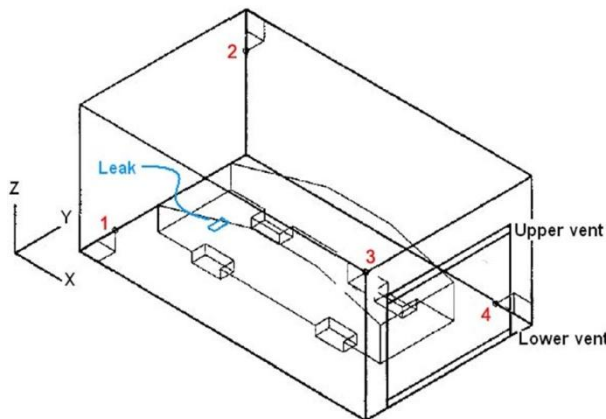


Σχήμα 8: Αριστερά – Δωμάτιο αποθήκευσης H_2 υψηλής πίεσης, Δεξιά – Διάταξη κυλίνδρων αποθήκευσης (Tanaka και συν., 2005)

Οι πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης H_2 έδειξαν ότι είναι σχεδόν απίθανη η δημιουργία αναφλέξιμου μείγματος στο χώρο όταν η διάμετρος έκλυσης δεν ξεπερνά τα 1,6 mm. Ωστόσο, στην περίπτωση διαμέτρου 8 mm, η συγκέντρωση στο χώρο άγγιξε το 27% δημιουργώντας μεγάλη πιθανότητα έκρηξης μολονότι ο χρόνος παραμονής του αναφλέξιμου μείγματος ήταν μικρότερος από 1 λεπτό. Συγκρίσεις μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων συγκέντρωσης H_2 και αποτελεσμάτων με τη χρήση ενός απλοποιημένου μοντέλου συσσώρευσης αερίου (gas accumulation model) έδειξαν ότι το μοντέλο είναι ικανοποιητικό για εκλύσεις από διάμετρο μέχρι 1,6 mm ενώ για εκλύσεις από 8 mm το μοντέλο υπερεκτιμά σαφώς την συγκέντρωση στο χώρο. Τέλος, μείωση έως και 50% της συγκέντρωσης H_2 στο χώρο επιτυγχάνεται στην περίπτωση των κυλίνδρων χωρητικότητας 125 l.

3.3.1.3 Πειράματα έκλυσης και διασποράς He σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου πραγματικής κλίμακας

Πειράματα έκλυσης και διασποράς He σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου, καθώς και προσομοιώσεις των πειραμάτων, έγιναν από τον Swain (1998) με σκοπό τη μελέτη της καταλληλότητας των χώρων στάθμευσης προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για αυτοκίνητα με H_2 ή να προταθούν τυχόν τροποποιήσεις σε αυτούς. Η πειραματική διάταξη αντιπροσώπευε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης, διαστάσεων 6,4 m × 3,7 m × 2,8 m. Στην πόρτα του χώρου βρισκόνταν ανοίγματα μεταβαλλόμενου ύψους. Ένα μοντέλο αυτοκινήτου ήταν τοποθετημένο μέσα στο χώρο ενώ 4 ανιχνευτές συγκέντρωσης βρισκόνταν στις 4 γωνίες του χώρου όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.



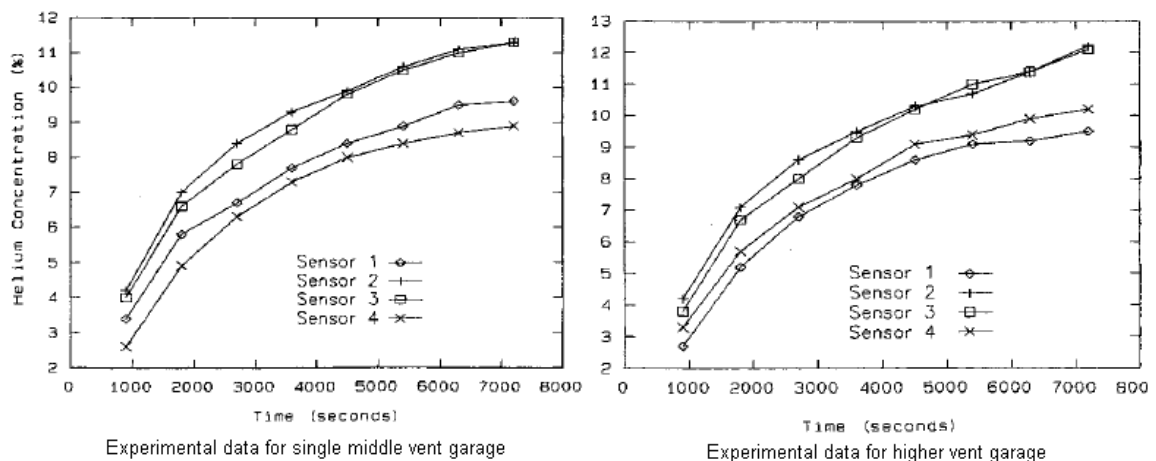
Σχήμα 9: Αναπαράσταση πειραματικής εγκατάστασης (Swain, 1998)



Σχήμα 10: Φωτογραφία από την πειραματική εγκατάσταση (Swain, 1998)

Η έκλυση He, παροχής 2 l/s, βρισκόταν κάτω από το αμάξωμα του αυτοκινήτου. Αρχικά έγιναν 2 πειράματα με ένα μόνο άνοιγμα στην πόρτα. Το πρώτο από αυτά είχε το άνοιγμα στο μέσον της πόρτας ενώ στο δεύτερο, το άνοιγμα βρισκόταν στο πάνω μέρος της πόρτας αναμένοντας να βελτιωθούν οι συνθήκες αερισμού στο χώρο. Οι πειραματικές μετρήσεις φαίνονται στο κάτωθι σχήμα (Σχήμα 11). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκέντρωση He αυξήθηκε όταν το άνοιγμα τοποθετήθηκε κοντά στην οροφή. Οι προσομοιώσεις των 2 πειραμάτων, που έγιναν με τον κώδικα FLUENT, οδήγησαν τον Swain να συμπεράνει τα ακόλουθα: Ο φρέσκιος αέρας, ο οποίος είναι πυκνότερος από το μίγμα He-αέρας, κατά την είσοδο

του στο χώρο κατέρχεται. Η υψηλότερη θέση του ανοίγματος στο 2^ο πείραμα επιτρέπει στον φρέσκο αέρα να αναπτύξει μεγαλύτερη ταχύτητα κατά την κάθοδό του προς το έδαφος και κατά συνέπεια ο αέρας κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα κατά μήκος του χώρου κάτω από το αμάξωμα του αυτοκινήτου. Όταν συναντήσει την έλλυση προκαλεί το He να κινηθεί με μεγαλύτερη ταχύτητα και το μετατοπίζει πιο κοντά στον τοίχο απέναντι από την πόρτα. Το πεδίο ροής μεταξύ της οροφής του αυτοκινήτου και της οροφής του χώρου είναι τώρα διαφορετικό ενώ ένα δευτερεύον ρεύμα προκαλεί ανακυκλοφορία του μίγματος He-αέρα πάνω από το αυτοκίνητο με συνέπεια το ποσοστό του He που διαφεύγει αυτήν την φορά από το χώρο να είναι μικρότερο.



Σχήμα 11: Χρονική μεταβολή συγκέντρωσης He για πειράματα με 1 μόνο άνοιγμα (Swain, 1998)

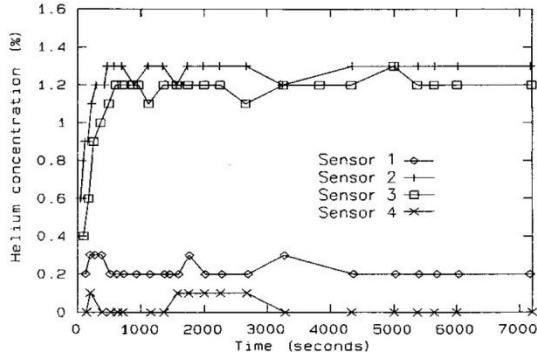
Στη συνέχεια μελετήθηκαν 9 πειράματα με 2 ανοίγματα στην πόρτα το καθένα. Τα ανοίγματα βρισκόνταν κάθε φορά κοντά στο πάτωμα και στο πάνω μέρος της πόρτας ενώ το μήκος τους εκτεινόταν σε όλο το μήκος της πόρτας. Στα πειράματα 1 έως 4, το ύψος των ανοιγμάτων μειωνόταν σταδιακά στο μισό. Στα πειράματα 5 και 6, η συνολική επιφάνεια αερισμού ήταν η ίδια αλλά έγινε εναλλαγή μεταξύ της επιφάνειας του κάτω και άνω ανοίγματος προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της σχετικής θέσης των 2 ανοιγμάτων. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι με βάση τις οδηγίες ASHRAE (ASHRAE, 2005) ο ρυθμός αερισμού, προκαλούμενος από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του χώρου και του περιβάλλοντος λόγω διαφοράς θερμοκρασίας, δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη σχετική θέση μεταξύ του κάτω και άνω ανοίγματος αρκεί η συνολική επιφάνεια αερισμού να είναι η ίδια (για περισσότερες πληροφορίες βλέπε Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα, υποκεφάλαιο: φυσικός αερισμός). Τα πειράματα 7 έως 9 έγιναν για να μελετηθεί η επίδραση των περσίδων στον αερισμό του χώρου. Τα ανοίγματα με τις περσίδες δημιούργησαν επιφάνεια αερισμού με πορώδες 0,44. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 1) συνοψίζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων ενώ τα σχήματα από το Σχήμα 12 μέχρι το Σχήμα 20 δείχνουν την συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές κατά περίπτωση. Αν συγκριθεί το Σχήμα 20 με το Σχήμα 15 φαίνεται ότι τα ανοίγματα ύψους 0,178 m με περσίδες του πειράματος 9 προκαλούν σχεδόν τον ίδιο αερισμό με αυτόν στην περίπτωση του πειράματος 4 όπου τα ανοίγματα έχουν ύψος 0,063 m.

Πίνακας 1: Μέγιστη συγκέντρωση He των πειραμάτων με 2 ανοίγματα (Swain, 1998)

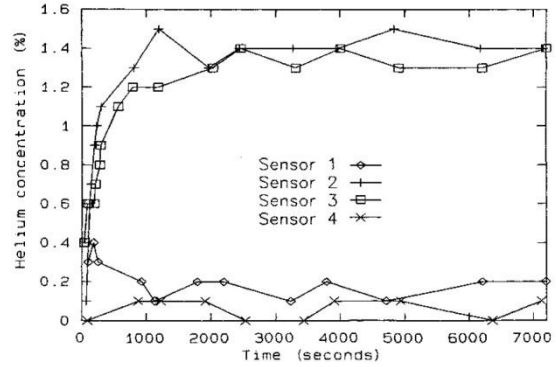
Πείραμα	Ύψος κάτω ανοίγματος (m)	Ύψος άνω ανοίγματος (m)	Μέγιστη συγκέντρωση He (%)
1	0,495	0,495	1,3
2	0,241	0,241	1,5
3	0,114	0,127	1,8
4	0,063	0,063	2,5
5	0,025	0,102	2,7
6	0,102	0,025	2,7
7	0,063+περσίδες	0,063	3,7
8	0,178+περσίδες	0,063	2,6
9	0,178+περσίδες	0,178+περσίδες	2,7

Μελέτη της επίδρασης του μηχανικού αερισμού στην συγκέντρωση He μέσα στο χώρο έγινε χρησιμοποιώντας μηχανικό αερισμό στην οροφή του χώρου παροχής 2 ACH ($= 0,037 \frac{m^3}{s}$, με $ACH = \frac{3600Q}{V}$). Μόνο το κάτω άνοιγμα ύψους 0,178 m με περσίδες χρησιμοποιήθηκε αυτήν τη φορά. Το πείραμα έδειξε ότι ο μηχανικός αερισμός ήταν το ίδιο αποτελεσματικός με τον φυσικό αερισμό του πειράματος 9 (ανοίγματα με περσίδες ύψους 0,178 m) ο οποίος προκάλεσε αερισμό 4,1 ACH. Ο Swain (1998) παρουσίασε επίσης αποτελέσματα προσομοίωσης του πειράματος 9 με τον κώδικα FLUENT. Τα αποτελέσματα ήταν κοντά στα πειραματικά. Το ίδιο πείραμα προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας H₂. Η διαφορά στις συγκεντρώσεις H₂ και He των ανιχνευτών κοντά στην οροφή του χώρου δεν ξεπέρασε το 3%. Τέλος, ο Swain (1998) παρατήρησε ότι γενικά η διαφορά μεταξύ συγκεντρώσεων H₂ και He σε παρόμοιες γεωμετρίες σπάνια ξεπερνούσε το 15% οι δε μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των 2 αερίων εμφανίζονταν κατά τη μη μόνιμη κατάσταση πριν δηλαδή το σύστημα ισορροπήσει και οι συγκεντρώσεις φτάσουν τις μέγιστες τιμές τους.

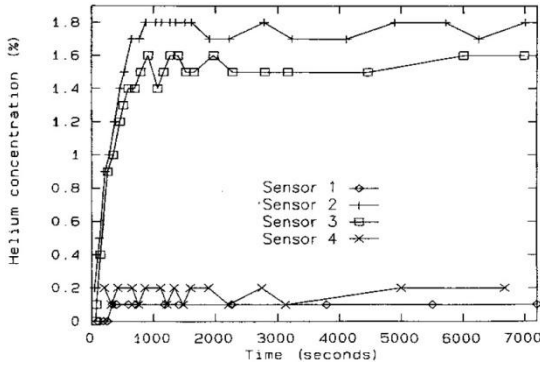
Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έλκυσης και διασποράς υδρογόνου



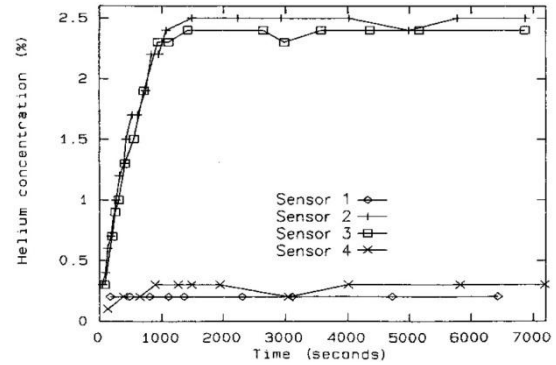
Σχήμα 12: Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 1 με ύψος ανοιγμάτων 0,495 m (Swain, 1998)



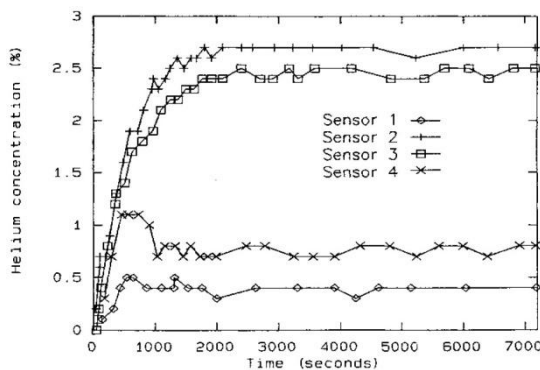
Σχήμα 13: Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 2 με ύψος ανοιγμάτων 0,241 m (Swain, 1998)



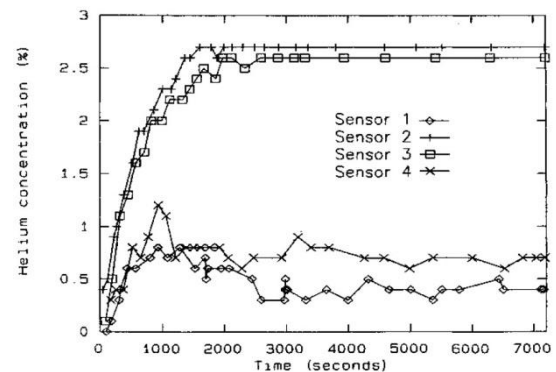
Σχήμα 14: Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 3 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,114 m και ύψος άνω ανοίγματος 0,127 m (Swain, 1998)



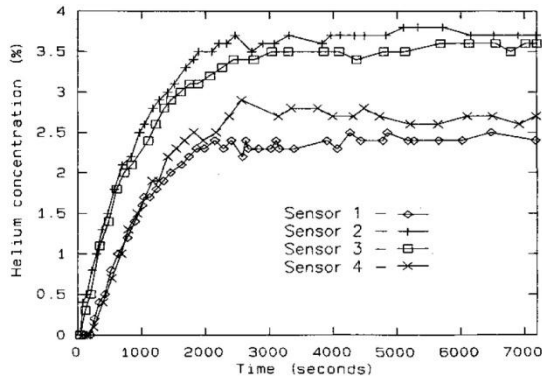
Σχήμα 15: Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 4 με ύψος ανοιγμάτων 0,063 m (Swain, 1998)



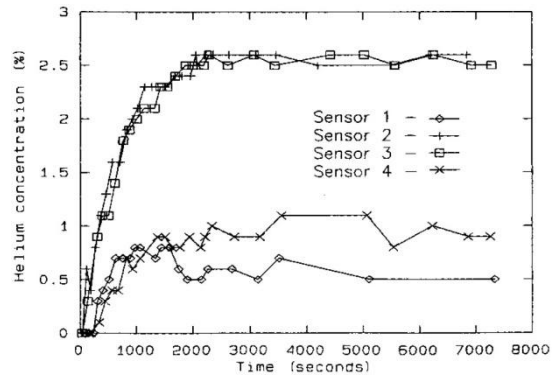
Σχήμα 16: Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 5 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,025 m και ύψος άνω ανοίγματος 0,102 m (Swain, 1998)



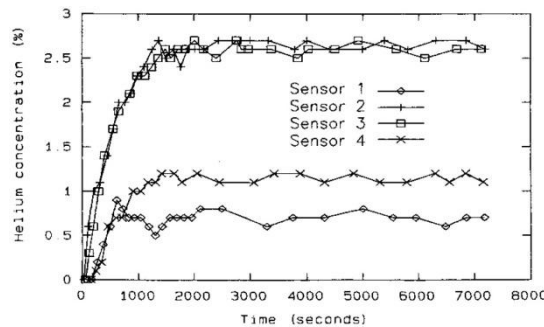
Σχήμα 17: Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 6 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,102 m και ύψος άνω ανοίγματος 0,025 m (Swain, 1998)



Σχήμα 18: Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 7 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,063 m+περσίδες και ύψος άνω ανοίγματος 0,063 m (Swain, 1998)



Σχήμα 19: Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 8 με ύψος κάτω ανοίγματος 0,178 m+περσίδες και ύψος άνω ανοίγματος 0,063 m (Swain, 1998)



Σχήμα 20: Συγκέντρωση He στους 4 ανιχνευτές – πείραμα 9 με ύψος ανοιγμάτων 0,178 m+περσίδες (Swain, 1998)

3.3.1.4 Πειράματα έκλυσης και διασποράς H₂ από ενεργειακή συστοιχία

Πειράματα έκλυσης και διασποράς H₂ από στατικό σύστημα ενεργειακής συστοιχίας (fuel cell) εγκατεστημένης ισχύος 4,8 kWe για οικιακή χρήση δημοσιεύτηκαν από τους Cerchiara και συν. (2009) στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος HyPer (HyPer, 2009). Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις αερισμού (φυσικού ή μηχανικού) της αποθηκευτικής εγκατάστασης της συστοιχίας προκειμένου ο χώρος να μην χαρακτηριστεί ως ζώνη 2 βάσει της Ευρωπαϊκής Οδηγίας ATEX (Directive 1999/92/EC) σε περίπτωση μικρής διαρροής. Το σημείο έκλυσης H₂ θεωρήθηκε ότι βρίσκεται μέσα στη συστοιχία, σε σημείο πριν το σύστημα ρύθμισης της πίεσης. Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας, η πίεση πριν το σύστημα ρύθμισης της πρέπει να είναι μεταξύ 2 και 5 bar ενώ μετά το σύστημα η πίεση θα πρέπει να είναι 350 mbar. Οι πειραματιστές επέλεξαν πίεση έκλυσης ίση με 5 bar προκειμένου να μελετηθεί η δυσμενέστερη περίπτωση. Η διάμετρος έκλυσης υπολογίστηκε με βάση τις Ιταλικές Οδηγίες (CEI EN-60079-10) για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας ATEX. Συγκεκριμένα, η έκλυση θεωρήθηκε ότι είναι μικρή και προέρχεται από την βαλβίδα πριν το σύστημα ρύθμισης πίεσης. Η Ιταλική Οδηγία για μικρές εκλύσεις προερχόμενες από βαλβίδα, καθορίζει επιφάνεια έκλυσης ίση με 0,25 mm². Δεδομένης πίεσης και επιφάνειας, η

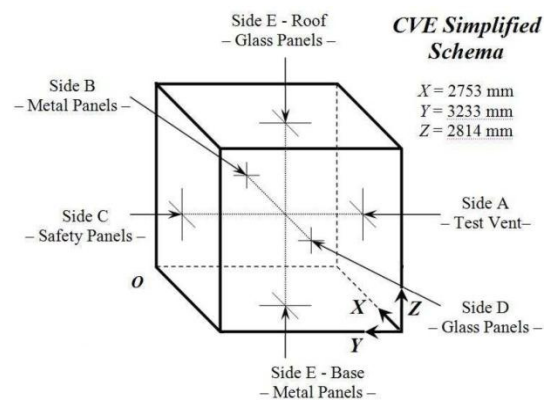
Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

ογκομετρική παροχή της έκλυσης υπολογίστηκε στα 40 l/min. Εκτός από την επιφάνεια των 0,25 mm² μελετήθηκαν πειραματικά και 2 μεγαλύτερες επιφάνειες, 0,5 mm² και 1,0 mm², των οποίων η ογκομετρική παροχή έκλυσης ήταν 90 l/min και 180 l/min αντίστοιχα.

Η πειραματική εγκατάσταση είχε διαστάσεις 2,75 m × 3,23 m × 2,81 m, συνολικού όγκου 25 m³ (βλέπε Σχήμα 21). Η μία πλευρά της εγκατάστασης καθώς και η οροφή της ήταν από γυαλί (glass panels) για την παρακολούθηση των πειραμάτων. Μία πλευρά καθώς και το έδαφος ήταν εξ' ολοκλήρου από χάλυβα (metal panels), μία πλευρά είχε τα ανοίγματα αερισμού (test vent) ενώ η άλλη είχε άνοιγμα ασφαλείας (safety panel) όπως φαίνεται στο Σχήμα 22.



Σχήμα 21: Πειραματική εγκατάσταση CVE (Cerchiara και συν., 2009)

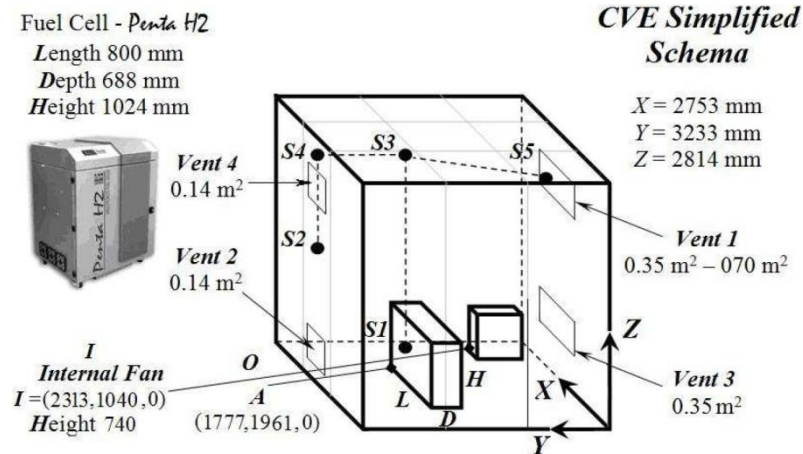


Σχήμα 22: Σχηματική αναπαράσταση και διαστάσεις της εγκατάστασης CVE (Cerchiara και συν., 2009)

Η ενεργειακή συστοιχία είχε διαστάσεις 0,8 m × 0,69 m × 1,02 m. Ανιχνευτές συγκέντρωσης H₂ (S1, S2, S3 S4 και S5) τοποθετήθηκαν μέσα στην εγκατάσταση όπως φαίνεται στο Σχήμα 23. Υπήρχε η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν 4 ανοίγματα, η θέση των οποίων φαίνεται επίσης στο Σχήμα 23. Η επιφάνεια του ανοίγματος 1 (Vent 1) μπορούσε να κυμανθεί από 0,35 m² (Vent1s) έως 0,70 m² (Vent1b) ενώ τα υπόλοιπα 3 ανοίγματα (Vent 2, 3 και 4) είχαν σταθερή ελεύθερη επιφάνεια ίση με 0,14 m², 0,35 m² και 0,14 m² αντίστοιχα. Πειράματα με συνδυασμό των ανοιγμάτων V1s ή V1b, V2, V3 και V4 με τις 3 ογκομετρικές παροχές που αναφέρθηκαν παραπάνω έλαβαν χώρα στην εγκατάσταση CVE. Συνολικά μελετήθηκαν 10 διαφορετικές διατάξεις αερισμού (βλέπε Σχήμα 24 έως Σχήμα 34).

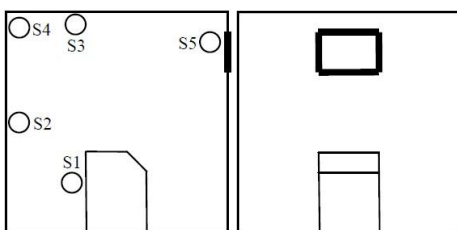
Κατά τις οδηγίες ATEX, ένας χώρος χαρακτηρίζεται ως ζώνη 2 όταν περιστασιακή έκλυση εκρηκτικού αερίου μπορεί να δημιουργήσει μίγμα συγκέντρωσης 50% του LEL (Lower Explosive Limit). Οι πειραματιστές μετέφρασαν αυτήν την απαίτηση ως συγκέντρωση H₂ 2% κατ' όγκο. Με άλλα λόγια, σε κάθε πείραμα εξετάστηκε αν η διάταξη αερισμού ήταν αρκετά αποτελεσματική ώστε η συγκέντρωση H₂ στο χώρο να είναι μικρότερη από 2%.

Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

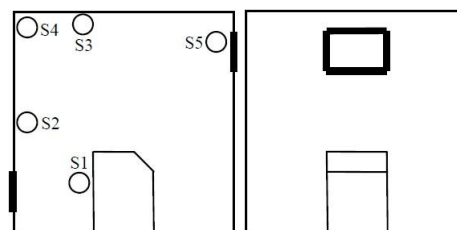


Σχήμα 23: Θέση ανοιγμάτων αερισμού, ενεργειακής συστοιχίας και ανιχνευτών συγκέντρωσης H_2 (Cerchiara και συν., 2009)

Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζοντας για κάθε πείραμα την αποτελεσματικότητα ή μη της διάταξης αερισμού. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, έλαβαν χώρα συνολικά 23 πειράματα. Στην πλειονότητα των πειραμάτων, η έκλυση H_2 ήταν μέσα στην συστοιχία είτε οριζόντια (Πειράματα 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11 και 12) είτε κατακόρυφη (Πειράματα 13 έως και 23) κατεύθυνσης. Πειράματα με την έκλυση έξω από την συστοιχία έλαβαν επίσης χώρα, είτε με κατακόρυφη (Πειράματα 7 και 9) είτε με οριζόντια κατεύθυνση (Πειράματα 8 και 10). Τέλος, ένα πείραμα χωρίς αερισμό και με έκλυση κατακόρυφη εκτός της συστοιχίας μελετήθηκε προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως πείραμα αναφοράς. Από τον πίνακα φαίνεται ότι εκτός από την περίπτωση χρήσης μόνο του ανοίγματος V1s, όλες οι άλλες διατάξεις φυσικού αερισμού ήταν αποτελεσματικές για μικρής έκτασης έκλυση (40 l/min). Για έκλυση ίση με 90 l/min μόνο η διάταξη με όλα τα ανοίγματα παρόντα ήταν αποτελεσματική. Τέλος, για την μεγαλύτερη έκλυση των 180 l/min, κάθε διάταξη φυσικού αερισμού αποδείχθηκε αναποτελεσματική.

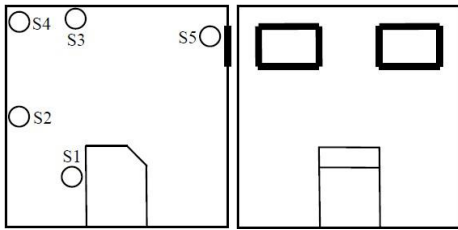


Σχήμα 24: Ανοίγμα αερισμού V1s

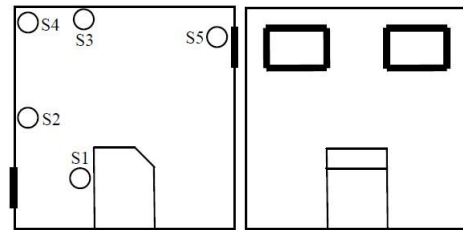


Σχήμα 25: Ανοίγματα αερισμού V1s, V2

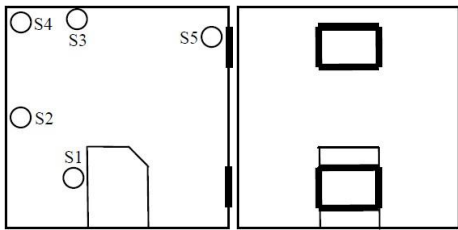
Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έλκυσης και διασποράς υδρογόνου



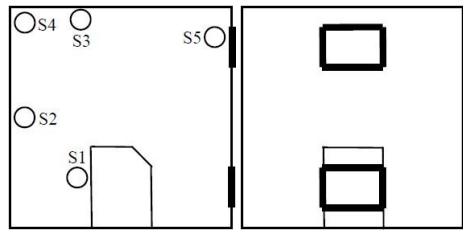
Σχήμα 26: Ανοίγματα αερισμού V1b



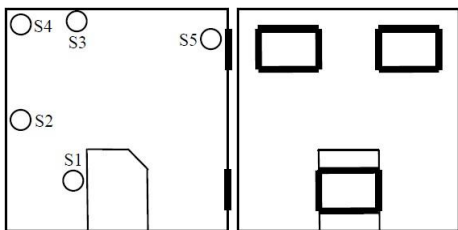
Σχήμα 27: Ανοίγματα αερισμού V1b, V2



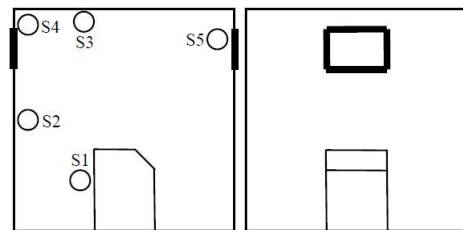
Σχήμα 28: Ανοίγματα αερισμού V1s, V3



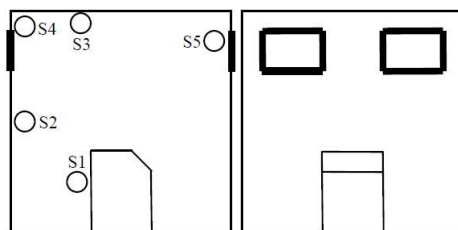
Σχήμα 29: Ανοίγματα αερισμού V1s, V3



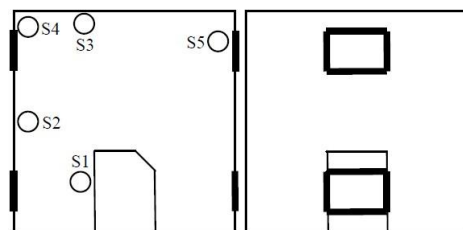
Σχήμα 30: Ανοίγματα αερισμού V1b, V3



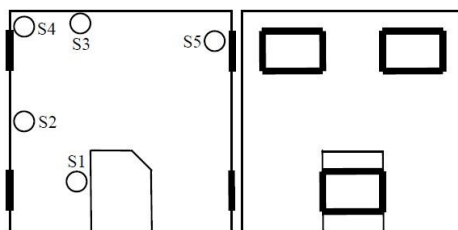
Σχήμα 31: Ανοίγματα αερισμού V1s, V4



Σχήμα 32: Ανοίγματα αερισμού V1b, V4

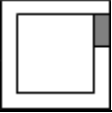
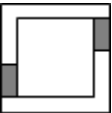
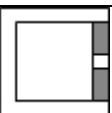
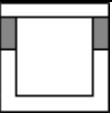
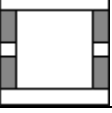


Σχήμα 33: Ανοίγματα αερισμού V1s, V2, V3, V4




Σχήμα 34: Ανοίγματα αερισμού V1b, V2, V3, V4

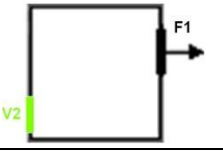
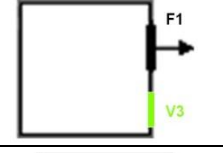
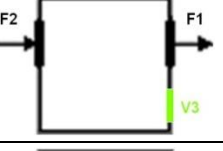
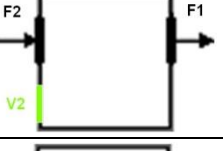
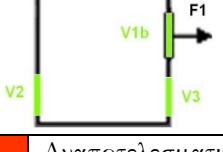


Πίνακας 2: Συνοπτικός πίνακας πειραμάτων φυσικού αερισμού (Cerchiara και συν., 2009)

Διάταξη αερισμού	Ανοίγματα	Αποτελεσματικότητα φυσικού αερισμού για κάθε πείραμα		
		40 l/min	90 l/min	180 l/min
	V1s	1, 2, 5		
	V1b	6, 7, 8		
	V1s, V2	3, 4, 9, 10, 13, 14, 17	11, 23	
	V1b, V2		12	
	V1s, V3	15		
	V1b, V3		18	
	V1s, V4	16		
	V1b, V4		19	
	V1s, V2, V3, V4		21	
	V1b, V2, V3, V4		20	22
Αναποτελεσματική διάταξη φυσικού αερισμού				
Αποτελεσματική διάταξη φυσικού αερισμού				

Στις περιπτώσεις όπου ο φυσικός αερισμός βρέθηκε αναποτελεσματικός, δηλαδή όταν η συγκέντρωση H₂ στο χώρο ήταν μεγαλύτερη από 2%, έλαβαν χώρα πειράματα με μηχανικό αερισμό. Συνολικά 10 πειράματα με διάφορες διατάξεις μηχανικού αερισμού - συνδυασμός μηχανικού αερισμού απαγωγής αέρα του χώρου αποθήκευσης της συστοιχίας (παροχής 0,33 m³/s) και προσαγωγής φρέσκου αέρα από το περιβάλλον (παροχής 0,33 m³/s) - με ή χωρίς παρουσία φυσικού αερισμού μελετήθηκαν πειραματικά για εκλύσεις παροχής 90 l/min και 180 l/min. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων με μηχανικό αερισμό. Αποδείχθηκε ότι ο μηχανικός αερισμός είναι αποτελεσματικός για παροχή έκλυσης H₂ 90 l/min.

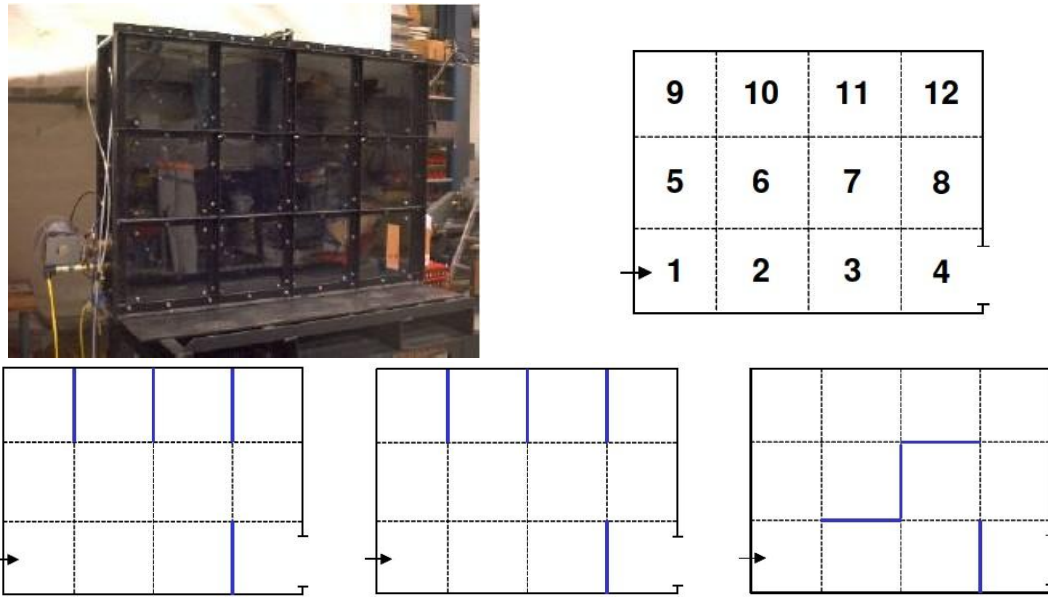
Πίνακας 3: Συνοπτικός πίνακας πειραμάτων μηχανικού αερισμού με ή χωρίς φυσικό αερισμό (Cerchiara και συν., 2009)

Διάταξη αερισμού (μηχανικός και/ή φυσικός)	Φυσικός αερισμός	Q _{aw} από μηχανικό αερισμό (m ³ /s)	Αποτελεσματικότητα φυσικού αερισμού για κάθε πείραμα	
			90 l/min	180 l/min
	Όχι	0,66	24	33

	V2 (0,14 m ²)	0,33	27	30
	V3 (0,35 m ²)	0,33	28	-
	V3 (0,35 m ²)	0,66	25	31
	V2 (0,14 m ²)	0,66	26	32
	V1b (0,70 m ²), V2 (0,14 m ²), V3 (0,35 m ²)	0,33	-	29
	Αναποτελεσματική διάταξη μηχανικού αερισμού			
	Αποτελεσματική διάταξη μηχανικού αερισμού			

3.3.1.5 Πειράματα έκλυσης και διασποράς H₂ σε διάταξη μικρής κλίμακας με χωρίσματα

Τρία πειράματα έκλυσης και διασποράς H₂ σε διάταξη μικρής κλίμακας με χωρίσματα μελετήθηκαν από την GexCon (2003). Η πειραματική διάταξη καθώς και η θέση των ανιχνευτών συγκέντρωσης H₂ φαίνονται στο κάτωθι σχήμα (Σχήμα 35). Η πειραματική διάταξη είχε διαστάσεις 1,2 m × 0,2 m × 0,9 m ενώ και στα τρία πειράματα (D06, D27 και D58) 4 χωρίσματα τοποθετήθηκαν στον χώρο σε διαφορετικές θέσεις προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση εμποδίων στην διασπορά του H₂. Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά του H₂ κατά την έκλυση δέσμης με μεγάλη ορμή (high momentum jet) ή μικρή (low momentum jet) σε κλειστό χώρο παρουσία εμποδίων. Γι' αυτό το λόγο, στα 2 από τα 3 πειράματα η έκλυση H₂ ήταν ηχητική ενώ στο τρίτο η έκλυση ήταν περίπου 10 m/s. Κάποιοι ανιχνευτές παρουσίασαν αρνητικές τιμές μέτρησης για μικρή χρονική διάρκεια (αυτοί στις θέσεις 3, 6 και 11) ενώ ο ανιχνευτής κοντά στην έξοδο (θέση 4) ήταν συχνά ασταθής.

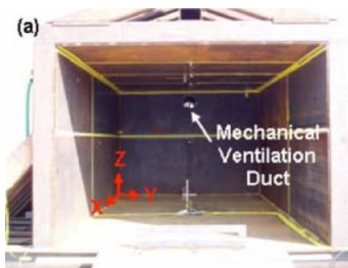


Σχήμα 35: Πάνω αριστερά – Πειραματική διάταξη, Πάνω δεξιά – Θέση ανιχνευτών συγκέντρωσης H₂, Κάτω δεξιά – Θέση χωρισμάτων πειράματος D06, Κάτω κέντρο – Θέση χωρισμάτων πειράματος D27 και Κάτω Αριστερά – Θέση χωρισμάτων πειράματος D58 (GexCon, 2003)

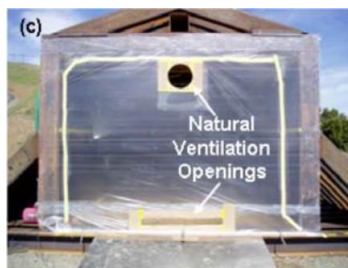
3.3.1.6 Πειράματα H₂ σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης

Οι Merilo και συν. (2009) δημοσίευσαν πειράματα έκλυσης H₂, διασποράς και κατάκαυσής του σε πειραματική εγκατάσταση διαστάσεων μονοθέσιου χώρου στάθμευσης παρουσία φυσικού και μηχανικού αερισμού. Παρουσιάζεται εδώ μόνο το μέρος που αφορά την έκλυση και διασπορά του H₂. Η εγκατάσταση είχε διαστάσεις 2,72 m × 3,64 m × 6,10 m. Η έκλυση, παροχής από 0,88 kg/hr έως 9,22 kg/h, διήρκησε από 20 έως 40 λεπτά παρουσία ή απουσία αυτοκινητού στο χώρο. Πειραματικές μετρήσεις έλαβαν χώρα σε συνολικά 9 σημεία. Στο Σχήμα 36 και Σχήμα 37 φαίνονται η πειραματική εγκατάσταση και η θέση του φυσικού και μηχανικού αερισμού. Τα σχήματα από το Σχήμα 38 μέχρι και το Σχήμα 40 απεικονίζουν τη μέση συγκέντρωση H₂ σε 3 χρονικές στιγμές και σε ύψος 2,7 m, 2,3 m και 1,9 m από το έδαφος. Στα πειράματα 1 και 2 το αναφλέξιμο νέφος κοντά στην οροφή είναι σχεδόν ομοιογενές. Σ' αυτά τα πειράματα οι προκληθείσες από την ορμή δυνάμεις κοντά στην οροφή υπερεισχύουν αυτών της άνωσης και αυτό λόγω της σημαντικής ορμής της έκλυσης. Η διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων των 2 πειραμάτων οφείλεται στην παρουσία του αυτοκινητού στο πείραμα 2 το οποίο προκαλεί ελαφρώς ταχύτερη αύξηση της συγκέντρωσης στο χώρο. Οι συγκεντρώσεις του πειράματος 3 φανερώνουν την ύπαρξη διαστρωμάτωσης κοντά στην οροφή. Στο πείραμα 3, εν αντιθέσει με τα 2 προηγούμενα πειράματα, οι προκληθείσες από την ορμή δυνάμεις δεν υπερεισχύουν έναντι των δυνάμεων λόγω άνωσης. Το Σχήμα 41 παρουσιάζει την μέση συγκέντρωση H₂ σε απόσταση 2,7 m, 2,3 m και 1,9 m από το έδαφος στην περίπτωση έκλυσης 1,86 g/s με μηχανικό αερισμό παροχής 0,1 m³/s. Το σχήμα δείχνει ότι υπάρχει καλή ανάμιξη του H₂ με τον αέρα κοντά στην οροφή και σχεδόν μόνιμη κατάσταση μετά από 26 λεπτά από την έκλυση ωστόσο η παροχή αερισμού δεν είναι ικανή να δημιουργήσει ασφαλείς συνθήκες μέσα στο χώρο.

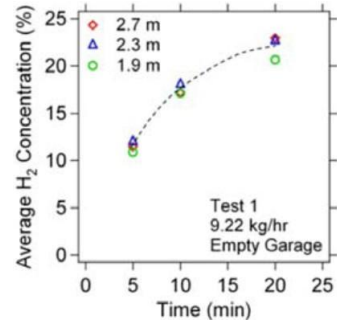
Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου



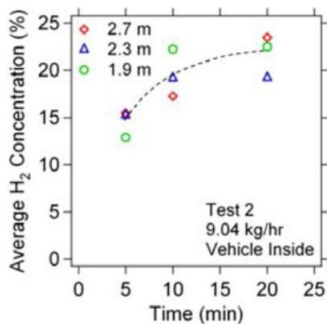
Σχήμα 36: Θέση μηχανικού αερισμού πειραματικής εγκατάστασης (Merilo και συν., 2009)



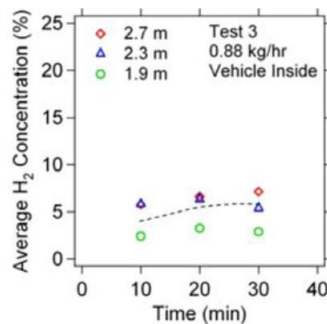
Σχήμα 37: Θέση φυσικού αερισμού πειραματικής εγκατάστασης (Merilo και συν., 2009)



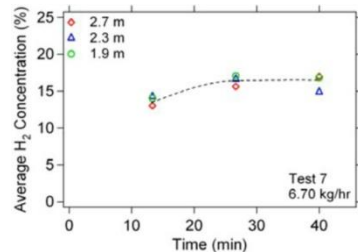
Σχήμα 38: Μέση συγκέντρωση H₂ πειράματος με φυσικό αερισμό και έκλυση 2,56 g/s (Merilo και συν., 2009)



Σχήμα 39: Μέση συγκέντρωση H₂ πειράματος με φυσικό αερισμό και έκλυση 2,5 g/s (Merilo και συν., 2009)

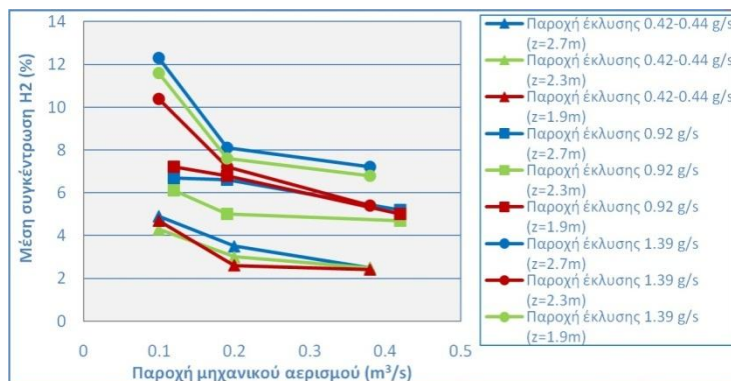


Σχήμα 40: Μέση συγκέντρωση H₂ πειράματος με φυσικό αερισμό και έκλυση 0,24 g/s (Merilo και συν., 2009)



Σχήμα 41: Μέση συγκέντρωση H₂ πειράματος με μηχανικό αερισμό 0,10 m³/s και έκλυση 1,86 g/s (Merilo και συν., 2009)

Στο Σχήμα 42 απεικονίζονται οι μέσες συγκεντρώσεις H₂ για τα πειράματα μηχανικού αερισμού. Ο μηχανικός αερισμός παροχής 0,1 m³/s είναι αναποτελεσματικός εφόσον οι συγκεντρώσεις H₂ είναι μεγαλύτερες από 4% (κατώτατο όριο αναφλεξιμότητας του H₂) σε όλες τις περιπτώσεις. Διπλάσια και τετραπλάσια παροχή είναι αποτελεσματική μόνο για εκλύσεις 0,42 g/s και 0,44 g/s.



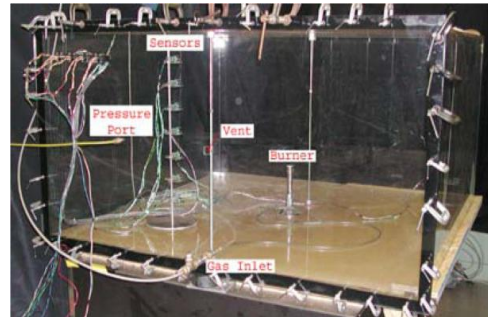
Σχήμα 42: Μέση συγκέντρωση H_2 συναρτήσει μηχανικού αερισμού για έκλυση 0,42-0,44 g/s, 0,92 g/s και 1,39 g/s σε ύψος 2,7m, 2,3m και 1,9m από το έδαφος (χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές όπως αναφέρονται από τους Merilo και συν., 2009)

3.3.2 Πειράματα απουσία εμποδίων

3.3.2.1 Έκλυση He σε χώρο 1/4 διαθέσιμου χώρου στάθμευσης

Οι Pitts και συν. (2009) παρουσίασαν 18 πειράματα σταθερής έκλυσης He σε χώρο διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m x 0,75 m που αντιπροσώπευε 1/4 διαθέσιμου χώρου στάθμευσης με απώτερο σκοπό τη χρήση των μετρήσεων της συγκέντρωσης He για μελέτες ελέγχου αξιοπιστίας προσομοιώσεων (CFD validation studies) με τον κώδικα FDS. Ο χώρος είχε ανοίγματα στη μια πλευρά η δε έκλυση είχε ογκομετρική παροχή 14,95 l/min για έκλυση διάρκειας 1 ώρας και 3,74 l/min για έκλυση διάρκειας 4 ωρών.

Άλλες παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η θέση της έκλυσης και ο αριθμός και η θέση των ανοιγμάτων αερισμού. Απεδείχθη ότι η συγκέντρωση He επηρεάζεται ισχυρά από τα ανοίγματα αερισμού. Επιπλέον, η παρουσία 2 ανοιγμάτων κοντά στο έδαφος και 2 κοντά στην οροφή δημιούργησαν τις πιο αποτελεσματικές συνθήκες για την απομάκρυνση του He από το χώρο. Τέλος οι προσομοιώσεις με τον κώδικα FDS χαρακτηρίστηκαν αξιόπιστες.



Σχήμα 43: Πειραματική διάταξη (Pitts και συν., 2009)

3.3.2.2 Έκλυση H_2 σε κυλινδρική μεταλλική οβίδα και He σε μοντέλο χώρου στάθμευσης

Οι Denisenko και συν. (2009) παρουσίασαν πειράματα έκλυσης H_2 0.53 l/s υπό διαφορετικές κατευθύνσεις έκλυσης μέσα σε αεροστεγή μεταλλική οβίδα όγκου 4 m³ (Σχήμα 44). Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 24 αισθητήρες για τη μέτρηση της συγκέντρωσης H_2 και της θερμοκρασίας. Παρατηρήθηκε το φαινόμενο της διαστρωμάτωσης H_2 το οποίο οι πειραματιστές θεώρησαν ότι για τις συνθήκες των πειραμάτων ήταν εξαρτώμενο από την κατεύθυνση της έκλυσης. Πειράματα έγιναν επίσης σε μοντέλο χώρου στάθμευσης με He αντί του H_2 (Σχήμα 45) υπό διάφορες συνθήκες έκλυσης προκειμένου να μελετηθούν δέσμες (jets), δέσμες πλήρους άνωσης (plumes) και δέσμες στην μεταβατική περιοχή (transitional). Βάσει των μετρήσεων οι πειραματιστές αποφάνθηκαν ότι υπάρχουν 2 βασικές διαμορφώσεις του εκρηκτικού νέφους με κριτήριο διαχωρισμού το λόγο $-L_j/Z_r$, (όπου το L_j υπολογίζεται από την σχέση: $L_j = 0,96U\sqrt{D}/\sqrt{g(\rho_{\alpha\epsilon\rho\alpha} - \rho)/\rho_{\alpha\epsilon\rho\alpha}}$ που είναι ένας χαρακτηριστικός αδιάστατος λόγος σχηματισμού δεσμών πλήρους άνωσης και το Z_r είναι η απόσταση της έκλυσης από την οροφή του χώρου. Η πρώτη διαμόρφωση (όπου $-L_j/Z_r \ll 1$) αφορούσε τις δέσμες πλήρους άνωσης (καλούμενη «πληρούμενο κιβώτιο» - filling box) η δε δεύτερη (όπου $-L_j/Z_r \gg 1$) αφορούσε τις δέσμες

(καλούμενη «κιβώτιο βαθμιαίας εξασθένησης» - fading up box). Οι μακροσκοπικές διαφορές των δύο διαμορφώσεων ήταν οι εξής:

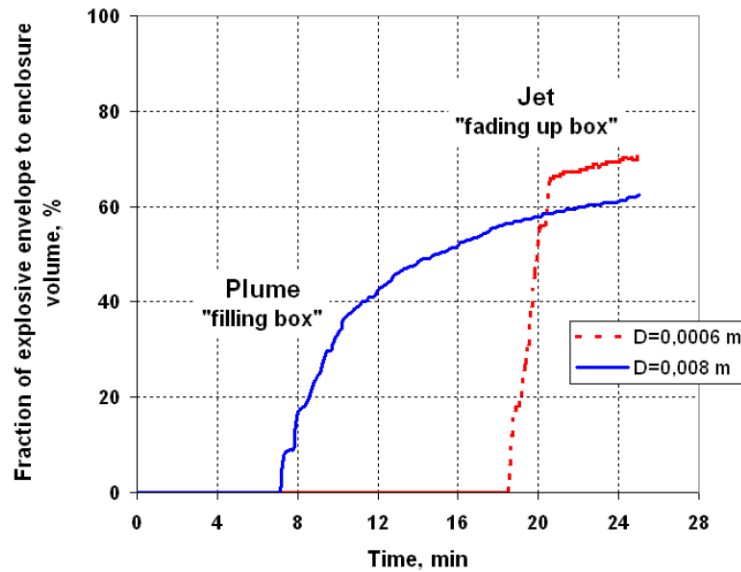


Σχήμα 44: Πειραματική διάταξη μεταλλικής οβίδας (Denisenko και συν., 2009)



Σχήμα 45: Πειραματική διάταξη χώρου στάθμευσης (Denisenko και συν., 2009)

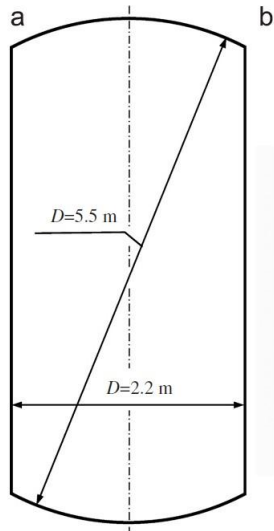
(1) το εκρηκτικό νέφος στην περίπτωση του «πληρούμενου κιβωτίου» εμφανίζεται ταχύτερα αλλά ο ρυθμός αύξησής του είναι βραδύτερος από αυτόν του «κιβωτίου βαθμιαίας εξασθένησης» (βλέπε Σχήμα 46). Ο ρυθμός ανάπτυξης του εκρηκτικού νέφους είναι μία σημαντική παράμετρος σε θέματα ασφάλειας αφού καθορίζει τον διαθέσιμο χρόνο για την αντιμετώπιση εκτάκτων περιστατικών. Η ενεργοποίηση συναγερμού, τα προστατευτικά μέτρα ή/και μέτρα μετριασμού πρέπει να τεθούν σε ισχύ προτού το αναφλέξιμο νέφος λάβει μέγεθος που μπορεί να απειλήσει την ακεραιότητα του κτιρίου ή του εξοπλισμού που βρίσκεται σε αυτό. (2) Ως προς τον βαθμό κατακόρυφης διαστρωμάτωσης, στην περίπτωση του «πληρούμενου κιβωτίου» η μεταβολή της συγκέντρωσης σε απόσταση ίση με $2/3$ μεταξύ της πηγής και της οροφής είναι δεκαπλάσια από την αντίστοιχη της περίπτωσης του «κιβωτίου βαθμιαίας εξασθένησης». Σημαντική ανομοιογένεια (διαστρωμάτωση καθ' ύψος) παρατηρήθηκε στον χώρο στην περίπτωση του «πληρούμενου κιβωτίου» εναντιθέση με την περίπτωση του «κιβωτίου εξασθένησης» όπου το He αναμείχθηκε με τον αέρα σε όλον τον ελεύθερο χώρο πάνω από την έκλυση.



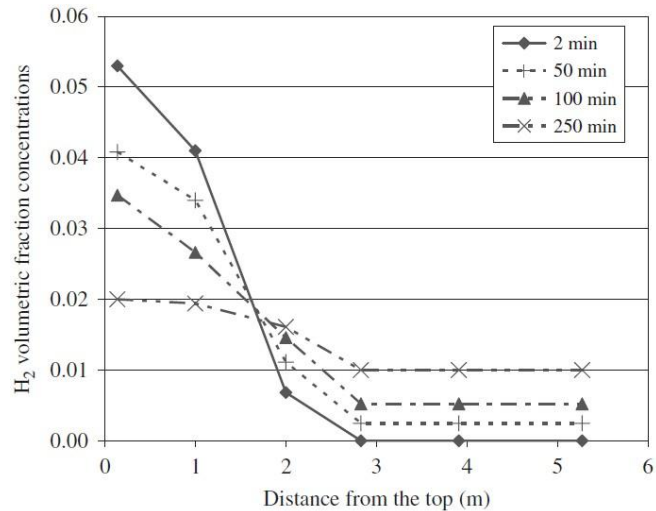
Σχήμα 46: Χρονική εξέλιξη εκρηκτικού μίγματος περίπτωσης «πληρούμενο κιβωτίου» και «κιβωτίου βαθμιαίας εξασθένησης» (Denisenko και συν., 2009)

3.3.2.3 Υποηχητική έκλυση H₂ σε κλειστό κυλινδρικό δοχείο όγκου 20 m³

Πείραμα υποηχητικής έκλυσης H₂ σε κλειστό δοχείο όγκου 20 m³ περιγράφεται από τους Shebeko και συν. (1988) και τους Gallego και συν. (2007). Η γεωμετρία του δοχείου φαίνεται στο Σχήμα 47. Το δοχείο πληρώθηκε αρχικά με αέρα εν ηρεμία θερμοκρασίας 20°C. Η πίεση μέσα στο δοχείο ήταν 760 mm Hg (101325 Pa). Η έκλυση H₂ ήταν κατακόρυφη και ανοδική, με ογκομετρική παροχή 4,5 lt/s διάρκειας 60 δευτερολέπτων (με συνολικό όγκο έκλυσης 0,27 m³). Το ακροφύσιο έκλυσης (διαμέτρου 10 mm) ήταν τοποθετημένο στον άξονα συμμετρίας του δοχείου (σε απόσταση 1,4 m από την οροφή του) και συνδεδεμένο με ένα δοχείο τροφοδοσίας H₂ πίεσης 150 atm. Με βάση τη διάμετρο του ακροφυσίου η ταχύτητα έκλυσης H₂ ήταν 57,3 m/s. Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης H₂ χρησιμοποιήθηκαν 6 θερμοκαταλυτικοί ανιχνευτές οι οποίοι τοποθετήθηκαν στον άξονα συμμετρίας και σε απόσταση 0,14, 1,00, 2,00, 2,83, 3,91 και 5,27 m από την οροφή του δοχείου. Η ακρίβεια των μετρήσεων ήταν ±0,2% H₂ κατ' όγκο. Από το Σχήμα 48 φαίνεται ότι το φαινόμενο διαστρωμάτωσης ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου αλλά παραμένει (έστω και ασθενές) μετά από 250 λεπτά από την έκλυση.



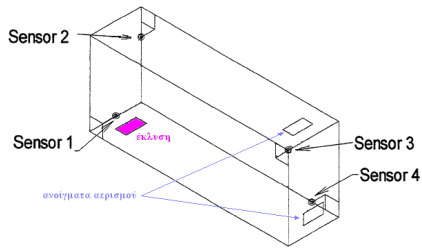
Σχήμα 47: Τομή πειραματικού δοχείου (Gallego και συν., 2007)



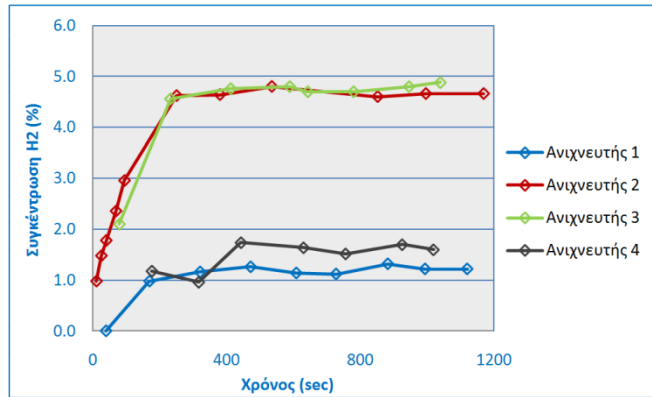
Σχήμα 48: Συγκέντρωση H_2 συναρτήσει της απόστασης από την οροφή του κυλίνδρου με την παρέλευση 2, 50, 100 και 250 s από το τέλος της έκλυσης (Gallego και συν., 2007)

3.3.2.4 Πειράματα σε προθάλαμο υποδιπλάσιας κλίμακας

Πειράματα έκλυσης H_2 και He σε αεριζόμενο προθάλαμο κλίμακας υποδιπλάσιας της πραγματικής και προσομοιώσεις με τον κώδικα FLUENT παρουσιάστηκαν από τους Swain και συν. (1998). Ο προθάλαμος, διαστάσεων 2,9 m x 0,74 m x 1,22 m, καθώς και οι τέσσερις ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της συγκέντρωσης φαίνονται στο Σχήμα 49. Στην δεξιά άκρη του προθαλάμου υπάρχουν δυο ανοίγματα αερισμού, το ένα τοποθετημένο στην οροφή και το άλλο στον παράπλευρο τοίχο. Η έκλυση και για τα δύο αέρια, ογκομετρικής παροχής 2 SCFM, διήρκησε 20 λεπτά. Το Σχήμα 50 παρουσιάζει τη χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης H_2 στους 4 ανιχνευτές. Τέλος, τα αποτελέσματα με τον κώδικα FLUENT ήταν ικανοποιητικά σε σύγκριση με τα πειραματικά.



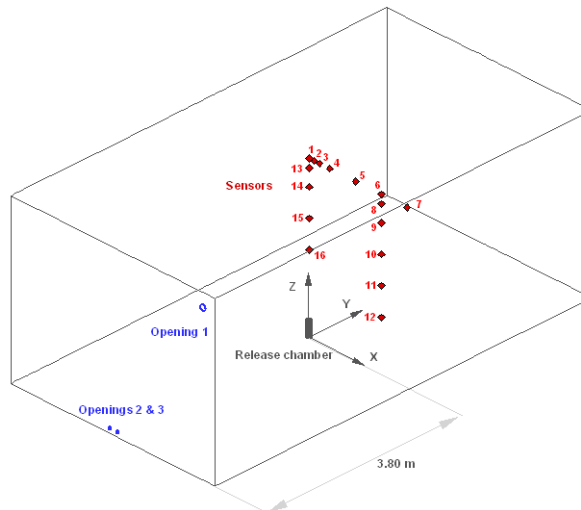
Σχήμα 49: Αναπαράσταση προθαλάμου, θέση ανιχνευτών, έκλυσης και ανοιγμάτων φυσικού αερισμού (Swain και συν., 1998 και HySafe report, 2004a)



Σχήμα 50: Συγκέντρωση H₂ στους 4 ανιχνευτές συναρτήσει του χρόνου (χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές όπως αναφέρονται στους Swain και συν., 1998)

3.3.2.5 Έκλυση και διασπορά H₂ στην πειραματική εγκατάσταση INERIS

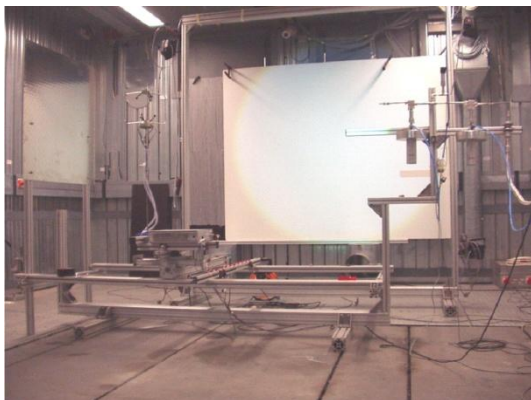
Στα πλαίσια του προγράμματος HySafe, συγκεκριμένα στο εσωτερικό πρόγραμμα InsHyde του HySafe, ο εταίρος INERIS διεξήγαγε πειράματα H₂ προκειμένου να μελετηθούν τα διάφορα φυσικά φαινόμενα κατά την έκλυση και διασπορά του σε κλειστό χώρο (HySafe Report, InsHyde project, 2005). Η πειραματική εγκατάσταση βρισκόταν μέσα σε ένα βράχο και είχε διαστάσεις 3,78 m × 7,2 m × 2,88 m. Προσομοιώσεις από τους εταίρους του InsHyde σε διάφορα σενάρια έγιναν προγενέστερα για να προσδιοριστούν οι συνθήκες του πειράματος (ταχύτητα έκλυσης, απουσία/παρουσία και είδος αερισμού, πλήθος και θέση ανιχνευτών συγκέντρωσης H₂) αντιπροσωπευτικές των προς μελέτη φαινομένων. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν υπολογιστικά σενάρια εκλύσεων 5 10⁻³, 0,1 και 1 g/s διάρκειας 240 ή 600 sec με διάμετρο έκλυσης 4, 10 ή 20 mm και φυσικό ή μηχανικό αερισμό. Στην αρχική φάση της έκλυσης η δέσμη ανέρχεται, κατανέμεται στο χώρο, προσκρούει στην οροφή και κατέρχεται λόγω της πρόσκρουσης, της ανάμιξης με τον αέρα και σε μικρότερο βαθμό λόγω διάχυσης. Μετά το πέρας της έκλυσης, η διασπορά του H₂ λαμβάνει χώρα υπό μικρές ταχύτητες και κατά πάσα πιθανότητα ο βασικότερος μηχανισμός διασποράς είναι η στρωτή διάχυση. Ενδιαφέρον, για λόγους ασφάλειας, έχει επίσης η δημιουργία και συμπεριφορά του αναφλέξιμου νέφους μέσα στο χώρο. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων το σενάριο που είχε περισσότερο ενδιαφέρον ήταν η έκλυση παροχής 1 g/s από 20 mm διάμετρο. Σε αυτό το σενάριο το H₂ λόγω της μεγάλης ορμής κατά την έκλυση αναμείχθηκε σημαντικά με τον περιβάλλοντα αέρα δημιουργώντας αναφλέξιμο νέφος περίπου ίσο με το 45% του όγκου του χώρου μετά το τέλος της έκλυσης. Επίσης, η έκλυση 1 g/s θεωρήθηκε μια από τις αντιπροσωπευτικότερες περιπτώσεις πιθανής έκλυσης κατά τη χρήση τεχνολογιών H₂. Σε αυτό το σενάριο το άνοιγμα 1 ήταν σφραγισμένο ενώ τα ανοιγμάτα 2 και 3 ήταν ελεύθερα προκειμένου να θεωρηθεί η πίεση μέσα στον χώρο σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική (βλέπε Σχήμα 51). Τέλος, στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 16 ανιχνευτές συγκέντρωσης H₂, 5 εκ των οποίων βρισκόνταν στον άξονα έκλυσης.



Σχήμα 51: Αναπαράσταση πειραματικής εγκατάστασης INERIS (HySafe Report, InsHyde project, 2005)

3.3.2.6 Πειράματα κατανομής ελεύθερης τυρβώδους δέσμης

Πειράματα κατανομής ελεύθερης τυρβώδους δέσμης H_2 σε κλειστό χώρο όγκου 160 m^3 έγιναν στο FZK σε αρχικές πιέσεις από 20 έως 260 bar στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος HySafe (HySafe, 2006).



Σχήμα 52: Φωτογραφία πειραματικής εγκατάστασης (HySafe report, 2006)

Η παροχή έκλυσης ήταν από 0,11 έως 8,85 g/s. Ελήφθησαν μετρήσεις συγκέντρωσης H_2 και ταχύτητας σε 3 οριζόντια επίπεδα σε απόσταση 0,75, 1,5 και 2,25 m από την έκλυση. Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν η καταγραφή της κατανομής συγκέντρωσης και ταχύτητας προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες αξιολόγησης μοντέλων CFD και η μελέτη της επίδρασης της αρχικής πίεσης και διαμέτρου έκλυσης στην συμπεριφορά της δέσμης.

3.3.2.7 Μελέτη φυσικού αερισμού χώρου στάθμευσης από δυνάμεις άνωσης κατά την έκλυση H_2

Οι Barley και Gawlik (2009) μελέτησαν πειραματικά, αναλυτικά και υπολογιστικά τη σχέση μεταξύ ρυθμού έκλυσης, διάταξης αερισμού και συγκέντρωσης H_2 σε κλειστό χώρο. Τα πειράματα έγιναν με He αντί H_2 σε μικρές ταχύτητες εκλύσεων σε δωμάτιο πραγματικής κλίμακας υπό σχεδόν ισοθερμοκρασιακές, μόνιμες συνθήκες οι οποίες όμως δύναται να δημιουργήσουν αναφλέξιμο νέφος σε σημαντικό ποσοστό του χώρου. Τα σενάρια που μελετήθηκαν αντιστοιχούν σε πιθανές εκλύσεις προερχόμενες από αυτοκίνητο ενεργειακής συστοιχίας H_2 μέσα σε χώρο στάθμευσης. Το αναλυτικό

μοντέλο συσχετίζει την συγκέντρωση H_2 (σε ύψος ίσο με αυτό του άνω ανοιγματος) με το μέγεθος και ύψος των ανοιγμάτων, τον συντελεστή παροχής, την παροχή έκλυσης και τον παράγοντα διαστρωμάτωσης. Ωστόσο, η διαστρωμάτωση εξαρτάται από φαινόμενα δυναμικής τα οποία δεν λαμβάνονται υπ' όψιν στο απλοποιημένο μοντέλο. Αυτά τα φαινόμενα περιγράφονται στους υπολογισμούς CFD. Τέλος, περιγράφεται η επίδραση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού χώρου και η περίπτωση όπου η θερμική κυκλοφορία αέρα μπορεί να εμποδίσει τον φυσικό αερισμό προκληθέντα από δυνάμεις άνωσης.

3.3.2.7.1 Ρυθμός έκλυσης

Επειδή τα οχήματα χρήσης H_2 είναι αναδυόμενη τεχνολογία, δεν υπάρχουν στατιστικά ιστορικά στοιχεία για την περιγραφή συμπτωματικών εκλύσεων. Κατά την πρόταση SAE J2578 (Standard SAE J2578, 2008) η μέγιστη επιτρεπόμενη έκλυση για όχημα κατά την παράδοσή του από το εργοστάσιο παραγωγής είναι 0,0025 l/s. Ωστόσο είναι πιθανή η ύπαρξη μεγαλύτερων εκλύσεων λόγω κακής συντήρησης, υποβάθμισης κάποιων εξαρτημάτων ή ακόμηση και πρόσκρουσης. Κατά τους Parsons Brinkerhoff (2004) ένα όχημα θα πρέπει να είναι εφοδιασμένο με σύστημα ασφάλειας που θα διακόπτει την ροή H_2 με τη λήψη σήματος διαρροής μεγαλύτερης των 9,43 l/s όταν το όχημα βρίσκεται εν ηρεμία. Με βάση τα παραπάνω, θεωρήθηκε ότι μία χαμηλή έκλυση θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,0025 l/s και 9,43 l/s. Στα πειράματα των Barley and Gawlick (2009) η έκλυση κυμάνθηκε μεταξύ 0,04 l/s και 0,83 l/s.

3.3.2.7.2 Ταχύτητα έκλυσης

Η ταχύτητα έκλυσης H_2 από το σύστημα παροχής καυσίμου σε πιέσεις αποθήκευσης μεταξύ 35 και 70 MPa αναμένεται να είναι υψηλή. Τέτοιας ταχύτητας εκλύσεις προκαλούν καλή ανάμιξη μεταξύ του H_2 και του περιβάλλοντα αέρα, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα διαστρωμάτωσης. Αν όμως η έκλυση προκύψει μέσα στο αμάξωμα του αυτοκινήτου, το H_2 μπορεί να διαφύγει στον περιβάλλοντα χώρο με πολύ μικρότερη ταχύτητα. Μια έκλυση χαμηλής ταχύτητας επιτρέπει την διαστρωμάτωση H_2 στο χώρο. Γι' αυτό το λόγο, οι πειραματιστές θεώρησαν ότι στην περίπτωση χρήσης φυσικού αερισμού ως προληπτικό μέτρο ασφάλειας, εκλύσεις μικρής ταχύτητας είναι πιο επικίνδυνες από αυτές μεγάλης ταχύτητας.

3.3.2.7.3 Επίδραση ανέμου

Η παρουσία ανέμου μπορεί είτε να ενισχύσει είτε να εμποδίσει το φυσικό αερισμό ανάλογα με τον προσανατολισμό του ως προς τη θέση των ανοιγμάτων εισόδου φρέσκου αέρα και εξόδου αέρα του εσωτερικού χώρου. Μια μέθοδος για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας δυσμενούς επίδρασης του ανέμου στον αερισμό είναι η τοποθέτηση των ανοιγμάτων εισόδου στην προσήνεμη πλευρά του κτιρίου και των ανοιγμάτων εξόδου στην υπήνεμη πλευρά. Με αυτόν τον σχεδιασμό, ο άνεμος θα ενισχύσει τον αερισμό. Μια άλλη μέθοδος είναι η κατανομή των ανοιγμάτων εξόδου σε διάφορες πλευρές του κτιρίου ούτως ώστε άνεμος οποιουδήποτε προσανατολισμού να προκαλέσει εγκάρσιο αερισμό. Με την υπόθεση ότι οι δυσμενείς επιδράσεις του ανέμου μπορούν να αποφευχθούν αρχιτεκτονικά, η απουσία ανέμου της πειραματικής εγκατάστασης θεωρήθηκε ότι δημιουργεί σενάρια δυσμενέστερων συνθηκών.

3.3.2.7.4 Επίδραση θερμοκρασίας

Ο αερισμός προκαλούμενος από δυνάμεις άνωσης επηρεάζεται ισχυρά από την θερμοκρασία. Παραδείγματος χάριν, μεταβολή της πυκνότητας του αέρα κατά 1% (η οποία προσδιορίζει την κινητήρια δύναμη του αερισμού) μπορεί να προκληθεί είτε από 1,07% H₂, είτε 1,16% He είτε από 3K διαφορά θερμοκρασίας (βάσει του νόμου των τελείων αερίων στους 300 K). Η θερμική ανακυκλοφορία (φαινόμενο θερμικής καμινάδας) μπορεί να εμποδίσει τον αερισμό από δυνάμεις άνωσης αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του εσωτερικού χώρου. Στην περίπτωση αυτή, ο θερμότερος εξωτερικός αέρας μπορεί να εισέλθει στο χώρο από τα ανοίγματα εξόδου, τα οποία είναι τοποθετημένα συνήθως κοντά στην οροφή του κτιρίου. Τέτοιου είδους φαινόμενα χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής για την εκτίμηση της ασφάλειας κλειστών χώρων όπου είναι πιθανή η έκλυση ανωστικών αερίων όπως το H₂.

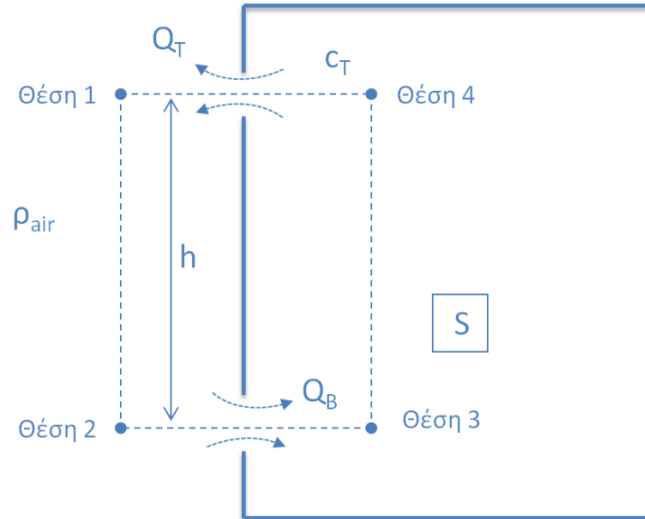
3.3.2.7.5 Περιγραφή των πειραμάτων και του απλοποιημένου μοντέλου

Ο πειραματικός χώρος είχε διαστάσεις 4,29 m × 7,02 m × 2,74 m. Δύο ανοίγματα βρίσκονταν σε μια πλευρά του χώρου, διαστάσεων 32,4 cm × 24,3 m. Οι εκλύσεις έλαβαν χώρα είτε από σημειακή πηγή (περιπτώσεις P, Πίνακας 4) είτε από γραμμικό διαχύτη (περιπτώσεις L, Πίνακας 4) ο οποίος οι πειραματιστές θεώρησαν ότι είναι αντιπροσωπευτικότερος έκλυσης προερχόμενης από το εσωτερικό ενός οχήματος. Οι ανιχνευτές συγκέντρωσης He τοποθετήθηκαν σε 11 σημεία, 9 από αυτά βρίσκονταν σε μία κατακόρυφη στήλη και τα υπόλοιπα 2 στο μέσον των 2 ανοιγμάτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 54.

Για την επίδραση της θερμοκρασίας στην πυκνότητα του περιβάλλοντος αέρα ως προς την μεταβολή της πυκνότητας λόγω της έκλυσης του He, χρησιμοποιήθηκε ο όρος θ , όπως φαίνεται στην εξίσωση (3). Τιμή $\theta = 0$ σημαίνει ισόθερμες συνθήκες, ενώ όταν $\theta = 1$ η θερμική επίδραση στην πυκνότητα είναι ίδια με την επίδραση προσθήκης He στον αέρα.

$$\theta = \frac{1 - \frac{T_{OB} + T_{OT}}{T_{IB} + T_{IT}}}{c_{avg}(1 - \delta)} \quad (3)$$

Χρησιμοποιήθηκε ένα μονοδιάστατο απλοποιημένο μοντέλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 53, για τον υπολογισμό της αναλυτικής σχέσης που συσχετίζει την συγκέντρωση H₂ σε ύψος ίσο με το άνω άνοιγμα (ct) με την επιφάνεια (A) και ύψος των ανοιγμάτων (h), τον συντελεστή ογκομετρικής παροχής του κάτω και άνω ανοίγματος (C_d), την παροχή έκλυσης (J) και τον παράγοντα διαστρωμάτωσης (φ). Παρακάτω δίνονται αναλυτικά τα βήματα για τον υπολογισμό της εν λόγω σχέσης.



Σχήμα 53: Σχηματική αναπαράσταση του 1D μοντέλου των Barley και Gawlik (2009)

$$\text{Ισοζύγιο μάζας H}_2: \rho_{H_2}S = q_T \rho_T Q_T \quad (4)$$

$$\text{Συνολικό ισοζύγιο μάζας: } \rho_{air}Q_B + \rho_{H_2}S = \rho_T Q_T \quad (5)$$

$$\text{Από το νόμο τελείων αερίων: } \frac{1}{\rho_T} = \frac{q_T}{\rho_{H_2}} + \frac{1-q_T}{\rho_{air}} \quad (6)$$

$$\text{Από τη σχέση (6): } q_T = \frac{\rho_{H_2}\rho_{air} - \rho_{out}\rho_{H_2}}{\rho_T(\rho_{air} - \rho_{H_2})} \quad (7)$$

$$\text{Η σχέση (4), με χρήση της σχέσης (7): } \rho_T = \frac{Q_{H_2}}{Q_T}(\rho_{H_2} - \rho_{air}) + \rho_{air} \quad (8)$$

$$\text{Η σχέση (5), με χρήση της σχέσης (8): } Q_B = Q_T - S \quad (9)$$

$$\text{Από τη σχέση (4): } S = \frac{q_T \rho_T}{\rho_{H_2}} Q_T \Rightarrow S = Q_T c_T \quad (10)$$

Αθροίζοντας τις διαφορές πιέσεων του βρόχου 1-2-3-4, λαμβάνεται η επόμενη σχέση:

$$\Delta P_{1-2} + \Delta P_{2-3} + \Delta P_{3-4} + \Delta P_{4-1} = 0 \quad (11)$$

Η διαφορά πιέσεων 1-2 και 3-4 αντιπροσωπεύει την πίεση άνωσης λόγω της διαφοράς μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής στήλης του μίγματος και αέρα αντίστοιχα:

$$\Delta P_{1-2} + \Delta P_{3-4} = gh\rho_{air}c_{avg}(1 - \delta), \text{ όπου } \delta = \frac{\rho_{H_2}}{\rho_{air}} \quad (12)$$

Η σχέση μεταξύ της διαφοράς πίεσης και της διέλευσης του μίγματος από το άνω άνοιγμα (με την υπόθεση ισοθερμοκρασιακών συνθηκών μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου) είναι:

$$Q_T = AC_d \sqrt{\frac{2\Delta P_{1-4}}{\rho_T}} \quad (13)$$

Ομοίως για το κάτω άνοιγμα:

$$Q_B = AC_d \sqrt{\frac{2\Delta P_{3-2}}{\rho_B}} \quad (14)$$

Με την παραδοχή ότι $\rho_B = \rho_{air}$ και κάνοντας χρήση των σχέσεων (9) έως και (14) προκύπτει η παρακάτω αναλυτική σχέση:

$$ghc_{avg}\rho_{air}(1-\delta) - \rho_{air} \frac{\left(\frac{S}{c_T} - S\right)^2}{2A^2C_d^2} - \rho_{air} \frac{\left(\frac{S}{c_T}\right)^2}{2A^2C_d^2} = 0 \quad (15)$$

Η αλλιώς σε πιο εύχρηστη μορφή:

$$F = \frac{A \cdot C_d}{S} \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \varphi^{1/2} \left[\frac{1 - c_T(1-\delta) + (1-c_T)^2}{(1-\delta)c_T^3} \right]^{1/2}, \quad \text{όπου } \varphi = \frac{c_T}{c_{avg}} \quad (16)$$

Με βάση το 1^ο σκέλος της σχέσης (16) φαίνεται ότι η απαιτούμενη επιφάνεια των ανοιγμάτων (A) είναι ανάλογη της έκλυσης (S) και αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του ύψους μεταξύ των 2 ανοιγμάτων (h). Το 2^ο σκέλος της σχέσης συσχετίζει τη συγκέντρωση H_2 (c_T) με τον παράγοντα διαστρωμάτωσης (φ). Από τη σχέση φαίνεται ότι μεγαλύτερα ανοίγματα απαιτούνται όταν το φαινόμενο διαστρωμάτωσης στον χώρο είναι έντονο και αυτό εξηγείται με την υπόθεση ότι για ίδια συγκέντρωση H_2 κοντά στο πάνω άνοιγμα (c_T) η άνωση είναι μικρότερη στην στήλη 3-4 όταν το H_2 κατανέμεται λιγότερο καθ' ύψος. Επίσης, η σχέση δείχνει ότι για δεδομένο μέγεθος ανοιγμάτων και έκλυση, μεγαλύτερη διαστρωμάτωση αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις H_2 .

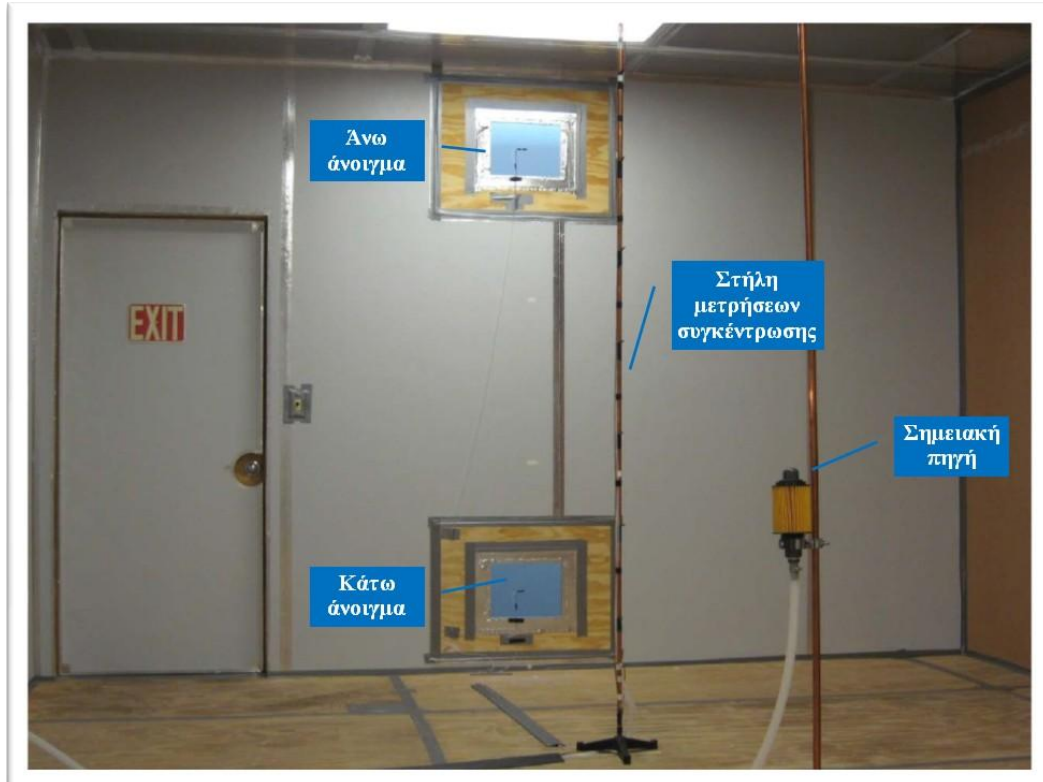
Στο Σχήμα 55 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων (Πίνακας 5) με το απλοποιημένο μοντέλο (καμπύλες και τμήματα καμπυλών). Φαίνεται ότι το απλοποιημένο μοντέλο περιγράφει επαρκώς τη σχέση μεταξύ του αδιάστατου παράγοντα (F), του παράγοντα διαστρωμάτωσης (φ) και της συγκέντρωσης (c_T). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές για τον συντελεστή C_d υπολογίστηκαν πειραματικά με τη χρήση της σχέσης (17) που προέκυψε από τις σχέσεις (11) έως και (14) και φαίνονται ως C_{d1} (Πίνακας 5). Ο συντελεστής C_{d1} είναι ο ίδιος για το πάνω και κάτω άνοιγμα ενώ η ροή μέσω των 2 ανοιγμάτων θεωρήθηκε ότι προκαλείται μόνο από τη διαφορά στατικής πίεσης και όχι από άλλα φαινόμενα όπως π.χ. ορμή. Για τον υπολογισμό των Q_T , Q_B χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (10) και (9) αντίστοιχα. Οι τιμές του C_{d1} κυμαίνονται από 0,603 έως 0,690 και είναι μεγαλύτερες από αυτήν που απαντάται συνήθως στην βιβλιογραφία ($C_d=0,6$). Πιθανοί λόγοι για αυτήν την διαφορά είναι η παράλειψη των φαινομένων ορμής και θερμοκρασίας. Για την επίδραση των θερμικών φαινομένων, η σχέση (18) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της πυκνότητας ρ_{avg} . Οι νέες τιμές για τον

Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έλκυσης και διασποράς υδρογόνου

συντελεστή C_{d2} (Πίνακας 5) κυμαίνονται από 0,531 έως 0,607. Η διαφορά των τιμών του C_{d1} με αυτές του C_{d2} αποδεικνύει την ευαισθησία του συντελεστή C_d στην απόκλιση από ισοθερμοκρασιακές συνθήκες.

$$C_d = \left[\frac{\rho_T Q_T^2 + \rho_{air} Q_B^2}{2A^2 g h (\rho_{air} - \rho_{avg})} \right]^{1/2}, \text{ όπου } \rho_{avg} = \rho_{air} [1 - c_{avg, H_2} (1 - \delta)] \quad (17)$$

$$\rho_{avg} = \rho_0 [1 - c(1 - \delta)] \cdot \left[\frac{T_{oB} + T_{oT}}{T_{iB} + T_{iT}} \right] \quad (18)$$



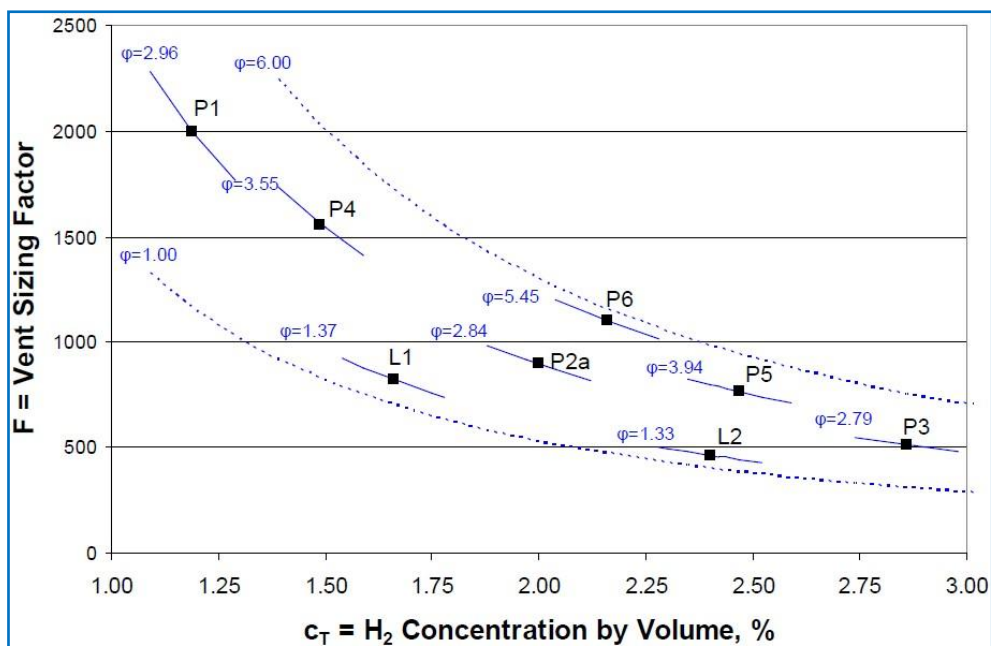
Σχήμα 54: Εσωτερικό πειραματικού χώρου, φαίνεται η θέση της σημειακής έλκυσης, η στήλη μετρήσεων συγκέντρωσης, τα ανοίγματα και η πόρτα (Barley και Gawlik, 2009)

Πίνακας 4: Πειραματικές συνθήκες και αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης He στους 11 ανιχνευτές (y_s : ύψος θέσης έλκυσης, S : παροχή έλκυσης (lt/min), P_o : ατμοσφαιρική πίεση, ΔT : διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου από μετρήσεις στο μέσον του άνω και κάτω ανοίγματος, T_i : Μέση θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, B : ανιχνευτής στο μέσον του κάτω ανοίγματος, T : ανιχνευτής στο μέσον του άνω ανοίγματος) (Barley και Gawlik, 2009)

Case	y_s (m)	S (LPM)	P_o (mm-Hg)	ΔT (K)	T_i (K)	He Concentration (%)										
						B	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P1	0.61	9.8	622	0.42	297.2	0.00	1.19	0.00	0.00	0.00	0.06	0.19	0.56	0.92	1.14	1.17
P2a	0.61	22.0	622	0.53	297.2	0.00	2.00	0.00	0.01	0.02	0.11	0.35	0.93	1.61	2.00	2.02
P2b	0.61	22.0	622	0.58	297.2	0.00	1.97	0.00	0.01	0.02	0.09	0.33	0.91	1.60	1.96	1.99
P3	0.61	40.3	622	Unk	296.4	0.00	2.86	0.01	0.02	0.03	0.09	0.47	1.42	2.43	2.85	2.87
P4	0.91	12.3	622	0.22	296.3	0.00	1.49	0.00	0.00	0.01	0.02	0.12	0.48	0.98	1.43	1.51
P5	0.91	24.5	619	0.61	296.0	0.00	2.47	0.01	0.01	0.02	0.04	0.14	0.57	1.45	2.34	2.56
P6	1.22	18.4	619	0.36	296.1	0.00	2.16	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.28	0.75	1.84	2.67
L1	0.61	22.0	625	0.14	295.6	0.00	1.66	0.08	0.17	0.40	1.26	1.58	1.64	1.65	1.66	1.66
L2	0.61	40.4	625	0.25	295.5	0.00	2.40	0.13	0.27	0.71	1.97	2.33	2.38	2.39	2.41	2.42

Πίνακας 5: Πειραματικά αποτελέσματα και τιμές παραγόντων απλοποιημένου μοντέλου (Barley and Gawlik, 2009)

Case	c_T (%)	ϕ (--)	y_x (m)	L_E (m)	Cd1 (--)	Cd2	θ (--)	F (--)
P1	1.19	2.96	1.70	1.09	0.650	0.549	0.40	2000
P2a	2.00	2.84	1.71	1.10	0.653	0.582	0.29	894
P2b	1.97	2.86	1.72	1.11	0.671	0.582	0.33	918
P3	2.86	2.79	1.68	1.07	0.690	0.607	[a]	515
P4	1.49	3.55	[b] 1.85	0.94	0.640	0.583	0.21	1559
P5	2.47	3.94	[b] 1.93	1.01	0.624	0.531	0.38	765
P6	2.16	5.45	[b] 2.18	0.96	0.674	0.579	0.36	1102
L1	1.66	1.37	[b] 0.93	0.32	0.603	0.590	0.05	824
L2	2.40	1.33	[b] 0.89	0.28	0.623	0.607	0.05	464
Notes:	[a] ΔT was not measured.							
	[b] Stratification not fully developed; y_x estimated from point of inflection.							



Σχήμα 55: Σύγκριση απλοποιημένου μοντέλου (καμπύλες και τμήματα καμπυλών βάσει της εξίσωσης (16) με πειραματικές μετρήσεις (σημεία) (Barley και Gawlik, 2009)

3.3.2.8 Πειράματα έκλυσης και διασποράς He σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου πραγματικής κλίμακας

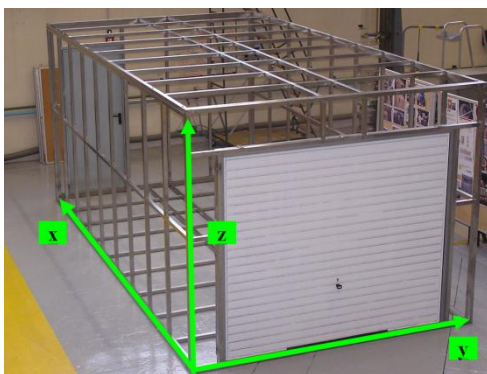
Οι Cariteau και συν. (2009) παρουσίασαν πειράματα έκλυσης He σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου πραγματικής κλίμακας χωρίς και παρουσία οχήματος μέσα στο χώρο ο οποίος είχε ένα άνοιγμα φυσικού αερισμού κοντά στο έδαφος. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η θέση της πηγής και η έντασή της (δέσμη και δέσμη πλήρους άνωσης). Στις περιπτώσεις παρουσία αυτοκινήτου, επελέγησαν 3 θέσεις έκλυσης μέσα στο αυτοκίνητο (κάτω από το καπό του αυτοκινήτου, τη μηχανή και το χώρο επιβατών). Από τις μετρήσεις συγκέντρωσης He των πειραμάτων έκλυσης μέσα στο αυτοκίνητο, οι πειραματιστές συμπέραναν ότι το είδος και η θέση της έκλυσης επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή συγκέντρωσης He στο χώρο. Οι δέσμες πλήρους άνωσης σε θέση με περιορισμένο ελεύθερο χώρο προκάλεσαν διαστρωμάτωση ενώ οι τυρβώδεις δέσμες που προσέκρουσαν στο έδαφος

Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

προκάλεσαν ομοιογενές μίγμα. Επίσης, η διαδρομή που ακολουθεί το αέριο για να εξέλθει από το αυτοκίνητο και το μετέπειτα χαρακτηριστικό μέγεθος της δέσμης που πληροί το χώρο είναι σημαντικές παράμετροι για την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης He. Ακόμη, ο παράγοντας που καθορίζει την ροή στους παράπλευρους τοίχους μετά την πρόσκρουση της δέσμης στην οροφή είναι κυρίως ο λόγος της ορμής στην οροφή προς την άνωση του οριζόντιου τμήματος του χώρου.

3.3.2.9 Πειράματα έκλυσης He σε εγκατάσταση χώρου στάθμευσης πραγματικής κλίμακας

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος HySafe, InsHyde ο εταίρος CEA (Gurta και συν., 2007 και Hysafe report, 2008) παρουσίασε πειράματα έκλυσης He σε μια εγκατάσταση χώρου στάθμευσης πραγματικής κλίμακας με σκοπό να χρησιμοποιηθούν για την θέσπιση οδηγιών χρήσης χώρων στάθμευσης από αυτοκίνητα υδρογόνου. Συνολικά 5 πειράματα έλαβαν χώρα (πειράματα Π1 έως Π5, βλέπε συγκεντρωτικό πίνακα παραγράφου 3.3.3) με εκλύσεις στην στρωτή (Π2, Π4 και Π5) και τυρβώδη (Π1 και Π3) περιοχή (laminar and turbulent flow regime). Οι μετρήσεις συγκέντρωσης He πραγματοποιήθηκαν σε 64 σημεία μέσα στο χώρο.



Σχήμα 56: Πειραματική εγκατάσταση CEA διαστάσεων $L=5,76m$ (x), $W=2,96m$ (y) και $H=2,42m$ (z)

Κάθε κατακόρυφη έκλυση ανωστικού αερίου με αρχική ορμή συμπεριφέρεται ως μη-ανωστική δέσμη (jet) κοντά στην πηγή και σαν δέσμη πλήρους άνωσης (plume) σε μακρινή απόσταση από αυτήν. Με βάση την εξίσωση (19) οι πειραματιστές υπολόγισαν την απόσταση L_{jet} από την πηγή από την οποία η ορμή της έκλυσης γίνεται αμελητέα σε σχέση με τις δυνάμεις άνωσης. Σε κάποιες από τις συνθήκες που μελετήθηκαν πειραματικά, η απόσταση αυτή ήταν μεγαλύτερη από το ύψος του πειραματικού χώρου ενώ σε μία από αυτές η απόσταση ήταν μόλις 0,4 m.

$$L_{jet} = \frac{0,96U_0\sqrt{D}}{\sqrt{\frac{g(\rho_{air} - \rho_{jet})}{\rho_{air}}}} \quad (19)$$

Τα πειράματα στην τυρβώδη περιοχή Π1 και Π3 δημιούργησαν αναφλέξιμο νέφος μέσα στο χώρο η παρουσία του οποίου διήρκησε από 7 έως 8 ώρες. Αντιθέτως, στο πείραμα στρωτής περιοχής Π2, δεν δημιουργήθηκε αναφλέξιμο νέφος. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις He παρουσιάστηκαν κατά την φάση της έκλυσης. Και στα 3 πειράματα (Π1, Π2 και Π3) εμφανίστηκε το φαινόμενο διαστρωμάτωσης.

Η δημιουργία στρώματος κοντά στην οροφή εξαρτάται από τη γεωμετρία του χώρου, τις συνθήκες έκλυσης και τον αερισμό. Στην περίπτωση απουσίας αερισμού, στρώμα καλώς αναμειγμένο εμφανίζεται όταν η απόσταση από το σημείο έκλυσης μέχρι την οροφή H_c είναι μεγαλύτερη από το χαρακτηριστικό μέγεθος της οροφής $0,38 \cdot \sqrt{A_c}$ (όπου $A_c = L \cdot W$). Για τα πειράματα που μελετήθηκαν το H_c ήταν 2,22 m ενώ το χαρακτηριστικό μέγεθος $0,38 \cdot \sqrt{A_c}$ ήταν 1,57 m. Κοντά στο έδαφος, το στρώμα του μίγματος έχει πολύ μικρή συγκέντρωση. Το ύψος αυτού του στρώματος είναι μέγιστο στο πείραμα Π2 και ελάχιστο στο πείραμα Π3. Επίσης, τα πειράματα έδειξαν ότι ο χρόνος καθόδου του He μέχρι το έδαφος εξαρτάται από τον εκλυθέντα όγκο. Αύξηση του εκλυθέντος όγκου He, στη ροή που κυριαρχεί η ορμή, αυξάνει τον ρυθμό καθόδου του στρώματος σε σχέση με την ροή που κυριαρχούν οι δυνάμεις άνωσης (πείραμα Π2). Για το πείραμα Π2, τα στρώματα αναμειγνύονται ακόμα και μετά από 20.000 sec. Για το πείραμα Π1, τα στρώματα είναι παρόντα ακόμα και μετά από 20.000 sec αλλά αναμειγνύονται ακόμα και μετά από 80.000 sec. Τέλος, για το πείραμα Π3, ακόμα και μετά από 80.000 sec τα στρώματα δεν αναμειγνύονται και παραμένουν ως έχουν.

Τα πειράματα Π4 και Π5 διαφέρουν μόνο στην ταχύτητα έκλυσης, με αποτέλεσμα στο μεν πείραμα Π4 ο αριθμός Richardson να έχει τιμή τυπικής δέσμης (περίπου 0,001) και στο Π5 τυπικής δέσμης πλήρους άνωσης (περίπου 10). Οι μετρήσεις συγκέντρωσης He έδειξαν ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των 2 πειραμάτων. Το He παρουσίασε ελαφρώς μεγαλύτερη διασπορά στην περίπτωση Π5 αλλά η μέγιστη διαφορά των συγκεντρώσεων των δύο πειραμάτων δεν ξεπέρασε το 0,2% το οποίο βρίσκεται στο όριο του πειραματικού σφάλματος.

3.3.3 Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων σε κλειστούς χώρους

Αναφορά (έτος)	Αέριο	Ογκομετρικός ρυθμός έκλυσης (lt/s)	H ₂ (ισοδύναμος) ρυθμός μάζας έκλυσης (g/s)	Ταχύτητα εξόδου (m/s)	Όγκος κλειστού χώρου (m ³)	Αερισμός	Re ₀ ¹	Ri ₀ ²	Στόχος	Παρατηρήσεις
Friedrich (2009)	H ₂	Από 18 έως 180	Από 1,5 έως 15	Από 350 έως ηχητική	0.56 με 32% ή 57% επί του συνολικού όγκου εμπόδια	Φυσικός και τεχνητός	Από 2.6E4 έως 2.6E5	Από 8,0E-6 έως 8,0E-8	Μελέτη επικινδυνότητας στην περίπτωση μεγάλης έκλυσης H ₂ μέσα σε συσκευή ενεργειακών συστοιχιών (fuel cells) οικιακής χρήσης	Παρουσία αναφλέξιμου νέφους και στις 2 διατάξεις (32% και 57%) από εκλύσεις 3 g/s και 1.5 g/s αντίστοιχα
Pitts (2009)	He	0,249 και 0,062	4,22E-2, 1,0E-2	0,245 και 0,061	1,69	Φυσικός	75, 19	36, 592	Χρήση μετρήσεων συγκέντρωσης σε μελέτες ελέγχου αξιοπιστίας προσομοιώσεων	Η παρουσία 2 ανοιγμάτων στο έδαφος και 2 στην οροφή ήταν οι αποτελεσματικότερες για την απομάκρυνση του He. Ο κώδικας FDS απέδωσε με αξιοπιστία τα πειραματικά αποτελέσματα
Denisenko (2009)	H ₂	0,53	0.048	-	4	Όχι	-	-	Διερεύνηση χρονικής ανάπτυξης αναφλέξιμου νέφους	Χρήση 24 αισθητήρων μέτρησης συγκέντρωσης και θερμοκρασίας
Denisenko (2009)	He	0,47	0.084	Από ηχητική έως 9,35	8,9	Όχι	8,29E3, 6,46E2	1,43E-8, 5,6E-3	Μελέτη επίδρασης ταχύτητας έκλυσης στην αεροδυναμική διαμόρφωση του χώρου	Μελετήθηκαν τα 3 είδη έκλυσης: δέσμη, ενδιάμεση έκλυση και δέσμη πλήρους άνωσης
Shebeko (1988)	H ₂	4,5	0.377	57,3	20	Όχι	5.49E3	3,99E-04	Πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης υποκρισίμης έκλυσης H ₂	-
Swain (1998a)	H ₂ και He	0,94	H ₂ : 8E-2 He: 0,16	2E-2	2,62	Φυσικός	H ₂ : 48 He: 42	H ₂ : 7,7E4 He: 3,6E4	Πειράματα έκλυσης H ₂ και He	Τα αποτελέσματα με τον κώδικα FLUENT

Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

									σε αεριζόμενο προθάλαμο υποδιπλάσιας κλίμακας για επαλήθευση του κώδικα FLUENT	ήταν ικανοποιητικά σε σύγκριση με τα πειραματικά.
Tanaka (2005)	H ₂	α) 3,33E01, 1,331E04 β) 1,332E02, 5,325E02 και 1,331E04	α) 2,839, 1.135 β) 11,37, 45,4 και 1.135	ηχητική	α) 96 ή 192, β) 120	Φυσικός	α) 1,02E04, 2,04E04, β) 1,02E04, 2,04E04, 1,022E05	α) 6,262E-08, 1,25E-07, β) 6,262E-08, 1,25E-07, 6,26E-07	Πειράματα H ₂ σε σταθμό ανεφοδιασμού πραγματικής κλίμακας για μελέτη συμπεριφοράς H ₂ κατά την έκλυση, διασπορά και έκρηξη του	Είναι σχεδόν απίθανη η δημιουργία αναφλέξιμου μείγματος στο χώρο όταν η διάμετρος έκλυσης δεν ξεπερνά τα 1,6 mm.
GexCon (2003)	H ₂	1,06, 1,15, 1,05	8,9E-2, 9,6E-2, 8,8E-2	ηχητική, 10,17, ηχητική	0,216	Φυσικός	1,29E4, 1,17E3, 1,28E4	7,19E-8, 1,52E-2, 7,34E-8	Πειράματα έκλυσης και διασποράς H ₂ σε διάταξη μικρής κλίμακας με χωρίσματα στο χώρο σε διαφορετικές θέσεις προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση εμποδίων στην διασπορά H ₂ .	Κάποιοι ανιχνευτές παρουσίασαν αρνητικές τιμές μέτρησης για μικρή χρονική διάρκεια ενώ ο ανιχνευτής κοντά στην έξοδο ήταν συχνά ασταθής.
INERIS HySafe (2005)	H ₂	11,73	1	38	78,38	Μικρά ανοίγματα	7,73E3	1,82E-3	Έκλυση και διασπορά H ₂ για τη μελέτη διαστρωμάτωσης, διάχυσης και χαρακτηριστικών αναφλέξιμου νέφους	-
Swain (1998b)	He	2	3,39E-1	0,1	66,83	Φυσικός και μηχανικός	68,95	488	Έκλυση και διασπορά He σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου	Λερισμός με ένα μόνο άνοιγμα δεν είναι επαρκής για τις συνθήκες έκλυσης που μελετήθηκαν. Διπλά ανοίγματα ύψους 0,06m είναι αποτελεσματικά.
Cerchiara	H ₂	0,667	5,6E-2	8,49E2	25	Φυσικός και	8,14E3	1,82E-7	Προσδιορισμός	Η πλειονότητα των

Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

(2009)		1,5 3	1,26E-1 2,51E-1	5,31E1 1,06E2		μηχανικός	3,05E3 6,1E3	2,79E-4 6,99E-5	απαιτήσεων φυσικού ή μηχανικού αερισμού της αποθηρευτικής εγκατάστασης της συστοιχίας ώστε ο χώρος να μην χαρακτηριστεί ως ζώνη 2 βάσει Οδηγίας ATEX σε περίπτωση μικρής διαρροής	διατάξεων φυσικού αερισμού ήταν αποτελεσματικές για μικρής έκτασης έκλυση (40 l/min). Για έκλυση 90 l/min μόνο η διάταξη με όλα τα ανοίγματα παρόντα ήταν αποτελεσματική ενώ για έκλυση 180 l/min, κάθε διάταξη φυσικού αερισμού ήταν αναποτελεσματική. Ο μηχανικός αερισμός ήταν αποτελεσματικός για παροχή έκλυσης 90 l/min.
Merilo (2009)	H ₂	4,93 10,79 16,29 21,82	0,42 0,92 1,389 1,86	104 229 345 462	60	Φυσικός και μηχανικός	7,75E3 1,69E4 2,56E4 3,43E4	9,32E-5 1,94E-5 8,5E-6 4,75E-6	Πειράματα έκλυσης H ₂ , διασποράς και κατάκαυσης σε πειραματική εγκατάσταση διαστάσεων μονοθέσιου χώρου στάθμευσης παρουσία φυσικού και μηχανικού αερισμού.	Πειράματα φυσικού αερισμού με ισχυρή έκλυση προκαλούν σχεδόν ομοιογενές αναφλέξιμο νέφος κοντά στην οροφή ενώ ασθενής έκλυση προκαλεί διαστρωμάτωση. Μηχανικός αερισμός 0.1 m ³ /s είναι αναποτελεσματικός ενώ διπλάσια και τετραπλάσια παροχή είναι αποτελεσματική μόνο για εκλύσεις 0,42 g/s.
FZK HySafe (2006)	H ₂	Από 0,82 έως 104	Από 0,07 έως 8,85	ηχητική	160	-	Από 2,04E3 έως 1,29E6	Από 1,24E-8 έως 7,51E-12	Καταγραφή κατανομής συγκέντρωσης και ταχύτητας για χρήση σε μελέτες αξιολόγησης μοντέλων CFD, μελέτη επίδρασης	-

Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

									αρχικής πίεσης και διαμέτρου έκλυσης στην δέσμη H ₂	
Barley (2009)	He	Πειράματα σημειακής πηγής (P): 0,16 έως 0,67 Πειράματα γραμμικού διαχύτη (L): 0,36 και 0,67	(P): από 0.026 έως 0,11 (L): 0,061 και 0,11	(P): από 0.007 έως 0,017 (L): 0,005 και 0,009	82,5	Φυσικός	(P): από 10 έως 24,5 (L): 12,7 και 22,8	(P): από 02,19E5 έως 3,72E4 (L): 7,53E5 και 23,32E5	Πειραματική, αναλυτική και υπολογιστική μελέτη σχέσης ρυθμού έκλυσης, σχεδιασμού αερισμού και συγκέντρωσης H ₂ .	Το αναλυτικό μοντέλο περιέγραψε επαρκώς τη σχέση μεταξύ του αδιάστατου παράγοντα αερισμού, του παράγοντα διαστρωμάτωσης και της συγκέντρωσης He. Η θερμική ανακυκλοφορία μπορεί να εμποδίσει τον αερισμό αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του εσωτερικού χώρου.
Cariteau (2009)	He	3,16 και 9,48 (Δέσμες πλήρους άνωσης και τυρβώδεις δέσμες)	3,16 και 9,48	0,54 και 1,62	41	Φυσικός	Από 4,9E2 έως 1,8E4	Από 2,92E-5 έως 6,3	Μελέτη της επίδρασης της έντασης, παροχής και θέσης της πηγής στην κατανομή συγκέντρωσης He στο χώρο.	Η διαδρομή που ακολουθεί το αέριο για να εξέλθει το αυτοκίνητο και το μετέπειτα χαρακτηριστικό μέγεθος της δέσμης που πληροί το χώρο είναι οι παράμετροι κλειδιά που ελέγχουν την κατακόρυφη κατανομή της συγκέντρωσης He.
Gupta (2007)	He	Π1: 11,133 Π2: 1,1133 Π3: 11,133 Π4: 0,3 Π5: 0,3	Π1: 1,99 Π2: 0,2 Π3: 1,99 Π4: 0,05 Π5: 0,05	Π1: 35,5 Π2: 3,55 Π3: 35,5 Π4: 16,4 Π5: 0,46	41	Φυσικός (μικρό άνοιγμα κοντά έδαφος)	Π1: 6150 Π2: 615 Π3: 6150 Π4: 686 Π5: 114	Π1: 9,9E-4 Π2: 9,9E-2 Π3: 9,9E-4 Π4: 1,1E-3 Π5: 8,7	Πειράματα έκλυσης He (στρωτή και τυρβώδη περιοχή) σε εγκατάσταση χώρου στάθμευσης πραγματικής κλίμακας με σκοπό να χρησιμοποιηθούν για την θέσπιση οδηγιών για χρήση χώρων στάθμευσης από αυτοκίνητα H ₂	Τα Π1 και Π3 δημιούργησαν αναφλέξιμο νέφος μέσα στο χώρο διάρκειας από 7 έως 8 ώρες ενώ στο Π2 δεν δημιουργήθηκε αναφλέξιμο νέφος. Οι μετρήσεις συγκέντρωσης He των Π4 και Π5 δεν διέφεραν σημαντικά.

3.4 Συμπεράσματα

Υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία για πειράματα ανοιχτού χώρου, ιδίως παρουσία εμποδίων. Τα πειράματα ανοιχτού χώρου που παρουσιάστηκαν σ' αυτό το κεφάλαιο ήταν ηχητικές εκλύσεις H_2 με αρχική πίεση από 1 έως 40 MPa. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι τυπικές τιμές πίεσης σε σταθμό ανεφοδιασμού H_2 είναι μέχρι στιγμής 35 με 40 MPa (αποθήκευση H_2 και διανομείς) ωστόσο αναμένεται η πίεση να αυξηθεί μελλοντικά στα 70 MPa ή ακόμα στα 85 MPa. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την αναγκαιότητα πειραμάτων H_2 σε υψηλότερες πιέσεις, αντιπροσωπευτικών για μελέτες ασφάλειας των εγκαταστάσεων υποδομής τεχνολογιών H_2 . Από τα πειράματα φαίνεται ότι η μεταβολή του αντιστρόφου της συγκέντρωσης H_2 είναι γραμμική ως προς την απόσταση έκλυσης για τις πιέσεις που μελετήθηκαν. Τέλος, τα αποτελέσματα απλοποιημένων μοντέλων ή ολοκληρωτικών μοντέλων όπως το Effects και Phast έχουν περιορισμούς στο εύρος συνθηκών εφαρμογής τους, πράγμα που αποδεικνύει τη σημασία χρήσης υπολογιστικών μοντέλων CFD.

Τα πειράματα που έχουν δημοσιευτεί για εκλύσεις H_2 (ή He) σε κλειστούς χώρους είναι περισσότερα από αυτά των ανοιχτών χώρων. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι τα σενάρια έκλυσης αφορούν κυρίως ενεργειακές συστοιχίες, χώρους υποδομής σταθμών ανεφοδιασμού και χώρους στάθμευσης. Η βασικότερη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν η δημιουργία αναφλέξιμου ή εκρηκτικού νέφους και η χωρική και χρονική ανάπτυξη του ως προς την ένταση και θέση της έκλυσης. Όταν η ορμή της έκλυσης δεν υπερσχύει των δυνάμεων άνωσης εμφανίζεται έντονα το φαινόμενο διαστρωμάτωσης. Στην αντίθετη περίπτωση το H_2 αναμιγνύεται έντονα με τον περιβάλλοντα αέρα και σε περιπτώσεις μικρών εκλύσεων είναι δυνατόν η ανάμιξη να είναι επαρκής ώστε να μην εμφανιστεί αναφλέξιμο νέφος. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση του αερισμού (κυρίως φυσικού) ως προληπτικό μέτρο ασφάλειας. Η ελεύθερη επιφάνεια των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού αλλά και η σχετική θέση που έχουν στο χώρο επηρεάζουν σημαντικά το νέφος. Για εκλύσεις μικρής έντασης, ο φυσικός αερισμός είναι συνήθως επαρκές μέτρο ασφάλειας αρκεί ο χώρος να διαθέτει ανοίγματα τόσο κοντά στην οροφή όσο στο έδαφος. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η θερμική ανακυκλοφορία μπορεί να εμποδίσει τον αερισμό αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από αυτήν του εσωτερικού χώρου. Τέτοιου είδους φαινόμενα δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς τόσο πειραματικά όσο υπολογιστικά.

3.5 Βιβλιογραφικές αναφορές

ASHRAE, (2005), “Fundamentals, Chapter 27: Ventilation and Infiltration”, SI Edition

Barley C.D., Gawlik K., Ohi J. and Hewett R., (2007), “Analysis of buoyancy-driven ventilation of hydrogen from buildings” Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Barley C.D. and Gawlik K., (2009), “Buoyancy-driven ventilation of hydrogen from buildings: Laboratory test and model validation”, Technical Report NREL/TP-550-45804, (<http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45804.pdf>)

Birch A.D., Brown D.R., Dodson M.G. and Swaffield F., (1984), “The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas”, Combustion Science and Technology, Vol. 36, pp. 249-261

Cariteau B., Brinster J., Studer E., Tkatschenko I. and Joncquet G., (2009), “Experimental results on the dispersion of buoyant gas in a full garage from a complex source”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

CEI EN-60079010, (2004), Electrical apparatus for explosive atmospheres – Part 10: Classification of hazardous areas, 2nd Edition

Cerchiara G., Mattei N., Schiavetti M. and Carcassi M., (2009), “Natural and forced ventilation study in a enclosure hosting a fuel cell”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

Chaîneaux, J., (1999), “Leak of hydrogen from a pressurized vessel – Measurement of the resulting concentration field”, EIHP Workshop on dissemination of goals, preliminary results and validation of methodology, Bruxells, pp. 156-161

Chen C.J. and Rodi W., (1980), “Vertical turbulent buoyant jets”, HMT, Vol. 4, Pergamon Press Ltd.

Denisenko V.P., Kirillov I.A., Korobtsev S.V. and Nikolaev I.I., (2009), “Hydrogen-air explosive envelope behaviour in confined space at different leak velocities”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

Directive 1999/92/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1999, Minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres (15th Individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EC), Official Journal L 2000:023

Friedrich A., Kotchourko N., Stern G. And Vesper A., (2009), “HyPer experiments on catastrophic hydrogen releases inside a fuel cell enclosure”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

Gallego, E., Migoya, E., Martín-Valdepeñas, J.M., Crespo, A., Garcia, J., Venetsanos, A., Papanikolaou, E., Kumar, S., Studer, E., Dagba, Y., Jordan, T., Jahn, W., Hóiset, S., Makarov, D., Piechna, J., (2007), “An inter comparison exercise on the capabilities of CFD models to predict distribution and mixing of H₂ in a closed vessel”, Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 2235-2245

Ganci F., Carpignano A., Mattei N. and Carcassi M.N., (2009), “Hydrogen release and atmospheric dispersion: experimental studies and comparison with parametric simulations”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

GexCon, (2003), report GexCon-03-F46201-rev00 (εμπιστευτική έκθεση)

HyPer Installation Permitting Guidance for Hydrogen and Fuel Cells Stationary Applications, January 2009, available at <http://www.hyperproject.eu/> and also at <http://epshypp.web.its.manchester.ac.uk/>

HySafe, (2004a), “Standard Benchmark Problem: SWAIN-1, Gaseous H₂ release and dispersion in a vented hallway, WP8”, <http://www.hysafe.org/>

HySafe, (2004b), “Deliverable 01 (WP8): Review of existing experimental hydrogen-helium release and dispersion data for standard benchmark exercise problems”, <http://www.hysafe.org/>

HySafe, InsHyde internal project, (2005), “Description of INERIS-test-6 experiment and requirements for corresponding blind SBEP in the framework of the InsHyde internal project”, prepared by partners NCSR D and INERIS, <http://www.hysafe.org/>

HySafe, (2006), “Deliverable D57: Experimental data on hydrogen dispersion and explosion for standard benchmark exercise problems”, <http://www.hysafe.org/>

HySafe report, InsHyde internal project, (2007), “Deliverable D65: Experimental results on helium release inside a full scale GARAGE set-up”, <http://www.hysafe.org/>, prepared from partner CEA, Gupta S.

HySafe, InsHyde internal project, (2008), “Deliverable 65: Experimental results on helium release inside a full scale GARAGE set-up”, <http://www.hysafe.org/>, prepared from partner CEA, Cariteau S.

Mattei N., Schiavetti M. and Carcassi M.N., (2009), “Experimental studies on wind influence on hydrogen releases from low pressure pipelines”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

Merilo E.G., Groethe M.A., Colton J.D. and Chiba S., (2009), “Experimental study of hydrogen release accidents in a vehicle garage”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

Parsons Brinkerhoff, (2004), “Support facilities for Hydrogen-fueled vehicles: Conceptual design and cost analysis study”, West Sacramento, CA: California Fuel Cell Partnership, www.fuelcellpartnership.org/pdf/ResourceDocs/FacilitiesStudy08.2004.pdf

Pitts W.M., Prasad K., Yang J.C. and Fernandez M.G., (2009), “Experimental characterization and modelling of helium dispersion in a 1/4-scale two-car

residential garage”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

Ruffin, E., Mouilleau, Y. and Chaineaux, J., (1996), “Large scale characterization of the concentration field of supercritical jets of hydrogen and methane», J. Loss Prev. Process Ind., Vol. 9, No. 4, pp. 279-284

Shebeko, Y.N., Keller, V.D., Yeremenko, O.Y., Smolin, I.M., Serkin, M.A., Korolchenko A.Y., (1988), “Regularities of formation and combustion of local hydrogen-air mixtures in a large volume”, Chemical Industry, Vol. 21, pp. 24 (728) – 27 (731) (in Russian)

Shirvill L.C., Roberts P., Butler C.J., Roberts T.A. and Royle M., (2005), “Characterisation of the hazards from jet releases of hydrogen”, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Standard SAE J2578, (2008), “Surface vehicle recommended practice”, Revised proposed draft, SAE International, Warrendale, PA, www.sae.org/servlets/index

Swain M.R., Grilliot E.S. and Swain M.N., (1998a), “Risks incurred by hydrogen escaping from containers and conduits”, Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-25315

Swain M.R., (1998b), “Addendum to Hydrogen vehicle safety report: Residential garage safety assessment”, prepared for the Ford Motor Company under Prime Contract No. DE-AC02-94CE50389 to the US DoE Office of Transportation Technologies

Tanaka T., Azuma T., Evans J.A., Cronin P.M., Johnson D.M. and Cleaver R.P., (2005), “Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model”, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Ανασκόπηση μαθηματικών προτύπων προσομοίωσης της τύρβης

Λίστα Συμβόλων

Χαρακτήρες κεφαλαίων

N	Αριθμός συνόλου	
L	Κλίμακα μήκους	m
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων	Pa m ³ /mol K
T	Θερμοκρασία	K
V	Διάνυσμα ταχύτητας	m s ⁻¹

Χαρακτήρες μικρών γραμμάτων

e	Εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας	J mol ⁻¹
f _x , f _y , f _z	Συνιστώσες σωματικής δύναμης στις κατευθύνσεις x, y και z	
k	Τυρβώδης κινητική ενέργεια	m ² s ⁻³
k	Θερμική αγωγιμότητα	W m ⁻¹ K ⁻¹
p	Πίεση	Pa
\dot{q}	Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου	W m ⁻² s ⁻¹
t	Χρόνος	s
u, v, w	Συνιστώσες ταχύτητας στην x, y και z κατεύθυνση	m s ⁻¹
\bar{u}	Χρονικά μέση ταχύτητα	m s ⁻¹
u'	Διακυμαινόμενη συνιστώσα ταχύτητας	m s ⁻¹
x, y, z	Κατευθύνσεις χώρου	m

Ελληνικοί χαρακτήρες

Γ_t	Συντελεστής διαχυτότητας βαθμωτού μεγέθους σε τυρβώδη ροή	
δ_{ij}	Δέλτα Kronecker, με $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$	
λ	2 ^{ος} συντελεστής συνεκτικότητας (ιξώδους)	Pa s
μ	Συντελεστής μοριακής συνεκτικότητας (δυναμικό ιξώδες)	Pa s
ρ	Πυκνότητα	kg m ⁻³
τ	Τανυστής τάσης	N m ⁻²
φ	Μεταβλητή	

Συνομογραφίες

DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes

4.1 Εισαγωγή

Το πεδίο της ροής διακρίνεται γενικά σε στρωτό ή τυρβώδες. Η βασική διάκριση μεταξύ των 2 ειδών γίνεται βάσει της χρονικής συμπεριφοράς μιας διαταραχής (ή αλλιώς αρχικής αστάθειας της ροής) ορισμένου πλάτους και συχνότητας που δημιουργείται μέσα στο πεδίο της ροής. Αν το πλάτος της τυχαίας διαταραχής ελαττώνεται με το χρόνο, τότε η ροή κατατάσσεται σε στρωτή. Αν το πλάτος της διαταραχής αυξάνεται με το χρόνο, που σημαίνει ότι η διαταραχή ουσιαστικά αφαιρεί κινητική ενέργεια από τη ροή και εν συνεχεία δημιουργεί άλλες διαταραχές μικρότερου πλάτους και διαφορετικής συχνότητας, τότε η ροή καλείται τυρβώδης. Ο τελευταίος μηχανισμός οδηγεί και πάλι σε τυρβώδη ροή αν η αρχική κατάσταση της ροής βρίσκεται στη μεταβατική περιοχή (Μπεργελές, 2000).

Ο ορισμός της τύρβης κατά τον Bradshaw (Μπεργελές, 2000) είναι ο εξής: «Τύρβη είναι μια τρισδιάστατη χρονικά μεταβαλλόμενη ροή στην οποία η έκταση των δινοσωλήνων προκαλεί διαταραχές της ταχύτητας σε όλες τις συχνότητες μεταξύ μιας ελάχιστης που καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες και μιας μέγιστης που καθορίζεται από τη συνεκτικότητα του ρευστού». Ο ορισμός αυτός προκύπτει από τον μηχανισμό μετάπτωσης της διαταραχής από μια ορισμένη συχνότητα (που καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες) στη συχνότητα του φάσματος κατά τη διαδικασία καταστροφής της αρχικής διαταραχής και μεταφοράς της ενέργειάς της στις υψηλές συχνότητες όπου δια απορροφήσεως, λόγω συνεκτικότητας του ρευστού, μετατρέπεται σε θερμότητα.

Ο Prandtl (Prandtl 1926 όπως παρατίθετο από τον Cebeci, 2004) ξεκίνησε μια διάλεξή του με τα παρακάτω λόγια:

«Αυτά που πρόκειται να πω για τα φαινόμενα των τυρβωδών ροών απέχουν ακόμα πολύ από το να είναι οριστικά. Αφορούν περισσότερο τα πρώτα βήματα προς αυτό το καινούργιο μονοπάτι το οποίο ελπίζω να ακολουθηθεί από πολλούς. Οι ερευνητές στο Göttingen μελέτησαν το πρόβλημα της τύρβης για περίπου 5 χρόνια και δυστυχώς εγκατέλειψαν την ελπίδα ενδελεχούς κατανόησης της τυρβώδους ροής. Οι φωτογραφίες και οι κινητογραφικές εικόνες έδειξαν πόσο αποκαρδιωτικά πολύπλοκη είναι αυτή η ροή...»

Δεν είμαστε πλέον «αποκαρδιωμένοι» καθώς η μέθοδος DNS μας παρέχει πλήρεις πληροφορίες απλών τυρβωδών ροών ενώ τα πειράματα έχουν εξελιχθεί με τη βοήθεια νέων τεχνικών όπως η μέθοδος μονοχρωματικής ακτινοβολίας Doppler η οποία δεν αλληλεπιδρά με το ρευστό και η ταχυμετρία απεικόνισης σωματιδίων (Particle Image Velocimetry). Επίσης, οι εξελίξεις της μεθόδου εξομοίωσης μεγάλων δινών (LES) πιθανότατα θα είναι πολύ χρήσιμες αν κι αυτή η μέθοδος σχετίζεται με προσεγγίσεις τόσο κατά τη διαδικασία φιλτραρίσματος για το διαχωρισμό των μεγάλων δινών από τις μικρές υποπλεγματικές δίνες όσο κατά τη χρήση του υποπλεγματικής κλίμακας μοντέλου. Προς εξοικονόμηση του υπολογιστικού κόστους αναπτύχθηκαν διάφορα μαθηματικά μοντέλα για την προσέγγιση των τυρβωδών ροών τα οποία έχουν εφαρμογές μηχανικού ενδιαφέροντος. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πιο διαδεδομένα μοντέλα και μια γενική περιγραφή των πεδίων εφαρμογής τους.

4.2 Μαθηματική περιγραφή

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής (Navier-Stokes) και ενέργειας για μη-μόνιμη συμπίεστη ροή στον τρισδιάστατο χώρο (Anderson, 1995):

Διαφορική μορφή εξίσωσης διατήρησης της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

Διαφορική μορφή εξίσωσης διατήρησης της ορμής – εξισώσεις Navier-Stokes:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (4)$$

όπου f_x , f_y και f_z είναι οι συνιστώσες στις διευθύνσεις x , y και z της σωματικής (ή αλλιώς μαζικής) δύναμης.

Για νευτωνικό ρευστό, ισχύει:

Κεφάλαιο 4: Ανασκόπηση μαθηματικών προτύπων προσομοίωσης της τύρβης

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} = \lambda \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} = \lambda \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{V}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} = \lambda \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (8)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (9)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (10)$$

όπου μ είναι ο συντελεστής μοριακής συνεκτικότητας και λ ο δεύτερος συντελεστής συνεκτικότητας. Ο 1^{ος} συντελεστής συνδέει τις τάσεις με τη γραμμική παραμόρφωση ενώ ο 2^{ος} τις τάσεις με την ογκομετρική παραμόρφωση. Ο Stokes έκανε την υπόθεση ότι $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$, η οποία έχει βρεθεί ότι για αέρια είναι μια καλή προσέγγιση.

Διαφορική μορφή εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας (ως προς την εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{V}) &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &+ \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ &+ \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right. \\ &\left. + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (11)$$

όπου \dot{q} ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου και k η θερμική αγωγιμότητα.

Η διαφορική μορφή εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας (ως προς την συνολική ενέργεια, δηλαδή $e + \frac{V^2}{2}$) έχει τη μορφή:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right]}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \mathbf{V} \right] \\
 &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} - \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} \\
 & - \frac{\partial(w\rho)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} \\
 & + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Στο σύστημα των παραπάνω εξισώσεων προστίθεται μια θερμοδυναμική σχέση που συνδέει τις εξαρτώμενες μεταβλητές:

$$e = e(T, p) \tag{13}$$

Καθώς και μια καταστατική εξίσωση στην περίπτωση αερίου όπως π.χ. με την υπόθεση τελείου αερίου λαμβάνεται η σχέση:

$$p = \rho RT \tag{14}$$

Η λύση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων πρέπει να συνδυαστεί με τις αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος. Η επίλυση των τρισδιάστατων χρονικά εξαρτημένων εξισώσεων Navier-Stokes για τυρβώδεις ροές είναι δύσκολη λόγω του εύρους της κλίμακας μήκους και χρόνου. Ωστόσο, οι εξισώσεις ροής μπορούν να επιλυθούν άμεσα με την αριθμητική προσομοίωση DNS. Στην προσομοίωση DNS επιλέγεται μια, συμβατή με τις διακυμάνσεις της τύρβης, χωρική και χρονική διακριτοποίηση. Δυστυχώς, η μέθοδος αυτή έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος. Προς εξοικονόμηση του κόστους, αναπτύχθηκαν διάφορα μοντέλα στα οποία προσεγγίζεται η τυρβώδης συμπεριφορά. Τα μοντέλα αυτά κάνουν χρήση των εξισώσεων RANS. Οι εξισώσεις RANS προκύπτουν από την εφαρμογή ενός μέσου χρονικού όρου στις εξισώσεις Navier-Stokes. Κατά την εφαρμογή του μέσου χρονικού όρου, προκύπτουν επιπλέον όροι οι οποίοι πρέπει να μοντελοποιηθούν. Ένα πλεονέκτημα των μοντέλων RANS είναι η ανεξαρτησία του πλέγματος από τα χαρακτηριστικά μεγέθη της τύρβης. Από την άλλη όμως, οι εξισώσεις βασίζονται σε εμπειρικούς συντελεστές, εξαρτώμενους από τη γεωμετρία του προβλήματος και τα χαρακτηριστικά της ροής (Ferziger και Perić, 2002).

4.2.1 Εξισώσεις RANS

Σε μια στατιστικά σταθερή ροή, κάθε μεταβλητή μπορεί να περιγραφεί ως το άθροισμα μιας μέσης χρονικά τιμής και μιας διακυμαινόμενης συνιστώσας γύρω από αυτήν την τιμή (Μαρκιάτος, 1998):

$$\varphi(x_i, t) = \overline{\varphi(x_i)} + \varphi'(x_i, t), \text{ όπου } \overline{\varphi(x_i)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(x_i, t) dt \tag{15}$$

με t ο χρόνος και T το χρονικό διάστημα για τον προσδιορισμό του μέσου όρου.

Η διαδικασία της μέσης χρονικά τιμής στις Navier-Stokes εξισώσεις οδηγεί στις εξισώσεις RANS (time-averaged RANS). Επί παραδείγματι, η εξίσωση ορμής για τη συνιστώσα ταχύτητας u της x -κατεύθυνσης δίνεται από την παρακάτω σχέση (Tannehill και συν., 1997):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho}u + \overline{\rho'u'})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}u\bar{u} + \overline{\bar{\rho}'u'})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}u\bar{v} + \overline{\bar{\rho}'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}u\bar{w} + \overline{\bar{\rho}'w'})}{\partial z} \\ = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2\frac{\partial\bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3}\frac{\partial\bar{u}_k}{\partial x_k} \right) - \overline{\bar{\rho}'u'} - \overline{\bar{\rho}u'u'} - \overline{\rho'u'u'} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2\frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial x} \right) - \overline{\bar{\rho}'u'} - \overline{\bar{\rho}u'v'} - \overline{\rho'u'v'} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2\frac{\partial\bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial\bar{w}}{\partial x} \right) - \overline{\bar{\rho}'u'} - \overline{\bar{\rho}u'w'} - \overline{\rho'u'w'} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

Η ίδια τεχνική εφαρμόζεται και στις υπόλοιπες εξισώσεις διατήρησης. Τελικά, από κάθε γραμμικό όρο των εξισώσεων διατήρησης απλώς προκύπτει ο αυτούσιος όρος. Από τους δευτεροβάθμιους μη γραμμικούς όρους προκύπτουν 2 όροι, το γινόμενο μέσων τιμών των όρων και η συνδιακύμανση:

$$\overline{u_i\varphi} = \overline{(\bar{u}_i + u'_i)(\bar{\varphi} + \varphi')} = \bar{u}_i\bar{\varphi} + \overline{u'_i\varphi'} \quad (17)$$

Ο τελευταίος όρος είναι μηδέν όταν οι 2 ποσότητες είναι ασύνδετες. Αυτό συμβαίνει σπάνια στην περίπτωση τυρβωδών ροών και ως αποτέλεσμα οι εξισώσεις διατήρησης περιλαμβάνουν όρους όπως, εκτός των άλλων, οι τάσεις Reynolds $\overline{\rho u'_i u'_j}$, (οι οποίες είναι οι κυριότερες τάσεις που επιδρούν στη διαμόρφωση του πεδίου ροής) και η τυρβώδης μεταφορά των βαθμωτών ιδιοτήτων $\overline{\rho u'_i \varphi'}$. Η εμφάνιση αυτών των επιπλέον όρων, καθιστά το σύστημα ελλιπές εφόσον υπάρχουν περισσότερες μεταβλητές από εξισώσεις. Τα λεγόμενα μοντέλα τύρβης προσεγγίζουν τις τάσεις Reynolds και την τυρβώδη μεταφορά των βαθμωτών ιδιοτήτων με όρους μέσων ποσοτήτων.

Εάν η ροή δεν είναι σταθερή, η μέθοδος της μέσης χρονικά τιμής δεν μπορεί να εφαρμοστεί και αντ' αυτής χρησιμοποιείται η τεχνική της μέσης τιμής ολότητας (ensemble averaging):

$$\overline{\varphi(x_i)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \int_{n=1}^N \varphi(x_i, t) dt \quad (18)$$

με N ο αριθμός του συνόλου, ο οποίος πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να απαλειφθεί η επίδραση της τύρβης. Αυτή η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα είδη της ροής. Επί παραδείγματι, η εξίσωση ορμής για την συνιστώσα ταχύτητας u της x -κατεύθυνσης, η οποία σε αυτήν την περίπτωση εκφράζεται από τη σχέση: $u = \bar{u} + u''$ με $\bar{u} = \frac{\overline{\rho u}}{\bar{\rho}}$, δίνεται από την παρακάτω σχέση (Tannehill και συν., 1997):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}\bar{w})}{\partial z} \\ = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{\tau}_{xx} - \overline{\rho u''u''}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{\tau}_{yx} - \overline{\rho u''v''}) \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\tau}_{zx} - \overline{\rho u''w''}) \end{aligned} \quad (19)$$

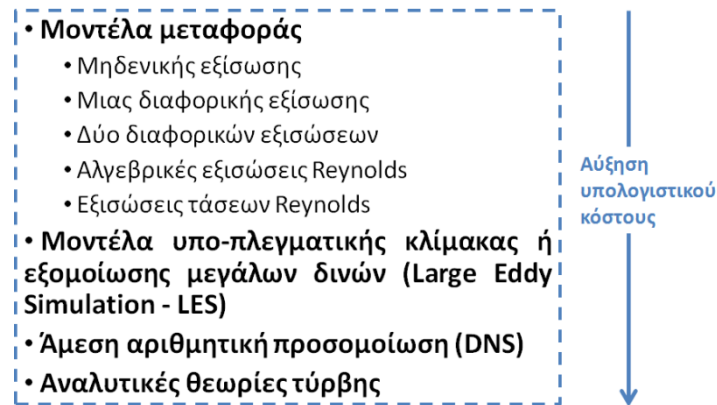
$$\bar{\tau}_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial\bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial\bar{u}_k}{\partial x_k} \right) + \mu \left(2 \frac{\partial\bar{u}''}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial\bar{u}_k''}{\partial x_k} \right) \quad (20)$$

$$\bar{\tau}_{yx} = \mu \left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} \right) + \mu \left(\frac{\partial\bar{v}''}{\partial x} + \frac{\partial\bar{u}''}{\partial y} \right) \quad (21)$$

$$\bar{\tau}_{zx} = \mu \left(\frac{\partial\bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial\bar{w}''}{\partial x} + \frac{\partial\bar{u}''}{\partial z} \right) \quad (22)$$

4.2.2 Μοντέλα τυρβώδους ροής

Στόχος ενός μαθηματικού μοντέλου είναι η ανάπτυξη υπολογιστικών διαδικασιών ώστε οι τάσεις Reynolds και η τυρβώδης μεταφορά των βαθμωτών μεταβλητών να προσδιοριστούν με ικανοποιητική ακρίβεια και γενικότητα. Η ανάπτυξη των τυρβωδών μοντέλων μερικών διαφορικών εξισώσεων διακρίνεται στις εξής κατηγορίες: α) μοντέλα μεταφοράς, β) μοντέλα υπο-πλεγματικής κλίμακας ή εξομοίωση μεγάλων δινών, γ) άμεση αριθμητική προσομοίωση και δ) αναλυτικές θεωρίες τύρβης.



Σχήμα 1: Κατηγορίες μοντέλων τυρβώδους ροής

4.2.2.1 Μοντέλα μεταφοράς

Στην περίπτωση στρωτών ροών η καταστροφή της ενέργειας και η μεταφορά μάζας, ορμής και ενέργειας κάθετα στις ροϊκές γραμμές επιτυγχάνεται με τη μεσολάβηση του ιξώδους. Κατ' αναλογία, γίνεται η υπόθεση ότι η επίδραση της τύρβης μπορεί να εκφραστεί από ένα αυξημένο ιξώδες. Το ιξώδες δίνης (eddy-viscosity) για τις τάσεις Reynolds με βάση την γενικευμένη υπόθεση Boussinesq γράφεται:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (23)$$

Η γενικευμένη υπόθεση Boussinesq έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές ροές με ανακυκλοφορία αλλά δεν μπορεί να θεωρηθεί ως γενικευμένη έκφραση καθώς αστοχεί σε απλούστερες ροές όπως π.χ. ροές σχεδόν ομογενείς. Η σχέση υποδηλώνει ότι οι ορθές διατμητικές τάσεις $\overline{\tau_{xx}}$, $\overline{\tau_{yx}}$ και $\overline{\tau_{zx}}$ είναι ιστροπικές πράγμα το οποίο δεν είναι ακριβές ακόμα και για απλές δισδιάστατες ροές.

Η τυρβώδης μεταφορά κάθε βαθμωτού μεγέθους δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$-\overline{\rho u'_i \phi'} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_j} \quad (24)$$

Εφόσον η μεταφορά ορμής και θερμότητας ή μάζας σε τυρβώδη ροή οφείλεται στον ίδιο μηχανισμό ανάμιξης δινών, αναμένουμε ότι η τιμή της διαχυτότητας Γ_t σε τυρβώδη ροή να προσεγγίζει εκείνη του ιξώδους δίνης μ_t . Εισάγεται λοιπόν ένας αριθμός Prandtl/Schmidt της τυρβώδους ροής, ως ακολούθως:

$$\sigma_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t} \quad (25)$$

Σε πολλές περιπτώσεις ροών, τα πειράματα έχουν δείξει ότι ο αριθμός αυτός είναι συχνά σχεδόν σταθερός και κοντά στη μονάδα (Μαρκιάτος, 1998).

Στην εξίσωση (23), η τυρβώδης κινητική ενέργεια k δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'_x u'_x} + \overline{u'_y u'_y} + \overline{u'_z u'_z}) \quad (26)$$

4.2.2.1.1 Μοντέλα μηδενικής εξίσωσης (μοντέλα μήκους ανάμιξης)

Τα μοντέλα μηδενικής τάξης χρησιμοποιούν μόνο τις διαφορικές εξισώσεις της μέσης ροής και συνδέουν τις διατμητικές τάσεις της τύρβης αποκλειστικά με τις συνθήκες της μέσης ροής σε κάθε σημείο. Τα μοντέλα αυτού του τύπου είναι τα πιο απλά και κάνουν χρήση τις υπόθεσης Boussinesq, η οποία για ένα λεπτό διατμητικό στρώμα έχει τη μορφή:

$$-\overline{\rho u'_i v'_j} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (27)$$

1. Μοντέλο σταθερού «ιξώδους-δίνης»

Οι Trubchikov και Prandtl πρότειναν τον παρακάτω τύπο για ελεύθερες δέσμες (Μαρκιάτος, 1998):

$$v_t = C\delta(U_{max} - U_{min}) \quad (28)$$

Όπου δ είναι το πλάτος της δέσμης, C μια σταθερά και $\nu_t = \rho \mu_t$ το οποίο είναι ομοιόμορφο σε κάθε διατομή.

2. Η υπόθεση μήκους ανάμιξης του Prandtl

Για διδιάστατα οριακά στρώματα, ο Prandtl πρότεινε την θεωρία μήκους ανάμιξης κατά την οποία ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας μ_t λαμβάνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mu_t = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \quad (29)$$

Για ροή οριακού στρώματος οι τάσεις Reynolds παίρνουν την μορφή:

$$-\overline{\rho u'v'} = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (30)$$

Ο Prandtl υπέθεσε ότι το μήκος ανάμιξης l_m σε κάθε θέση εξαρτάται από την απόσταση που έχει από το πλησιέστερο στερεό όριο:

$$l_m = ky \quad (31)$$

Το μήκος ανάμιξης l_m εξαρτάται από το πεδίο ροής. Ακριβής περιγραφή της κλίμακας μήκους ανάμιξης είναι δυνατή για απλές ροές αλλά όχι σε συνθήκες π.χ. αποκόλλησης της ροής ή σε τρισδιάστατες ροές (Ferziger και Perić, 2002). Για επίπεδη δέσμη το μήκος είναι σταθερό και ίσο με $l_m = 0,09\delta$, με δ το $1/2$ της έκτασης της δέσμης, ενώ για κυκλική δέσμη είναι $l_m = 0,075\delta$ με δ το $1/2$ της αξονικής έκτασης της δέσμης. Το μήκος ανάμιξης μπορεί να εκτιμηθεί λοιπόν για απλές ροές αλλά αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση ροών με ανακυκλοφορία (Μαριάτος, 1998). Η θεωρία ανάμιξης έχει ως βασικό πλεονέκτημα την απλότητα. Το μοντέλο επειδή συνδυάζει το συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας με τοπικά μεγέθη μέσης ροής και όχι τύρβης ενώ παράλληλα δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι ανάντη ή κατόντη συνθήκες είναι αξιόπιστο σε ροές τοπικής ισορροπίας. Η υπόθεση του μήκους ανάμιξης προϋποθέτει ότι η παραγωγή και η απορρόφηση ενέργειας της τύρβης βρίσκονται παντού σε ισορροπία με αποτέλεσμα να αγνοούνται η συναγωγή και η διάχυση της ενέργειας της τύρβης. Το μοντέλο είναι αναξιόπιστο στις περιοχές που η κατανομή των ταχυτήτων του πεδίου ροής εμφανίζει ακρότατα ($\partial \bar{u} / \partial y = 0$) επειδή ο συντελεστής συνεκτικότητας όπως υπολογίζεται από το μοντέλο μηδενίζεται.

3. Η θεωρία ομοιότητας της τύρβης από τον von Karman

Ο von Karman βασίστηκε σε 2 παραδοχές: α) ο μηχανισμός ανάπτυξης της τύρβης είναι ανεξάρτητος από το ιξώδες εκτός από τις γειτονικές σε στερεά περιοχές του πεδίου ροής και β) η τύρβη είναι στατιστικώς όμοια σε όλα τα σημεία του πεδίου ροής με αποτέλεσμα να διαφέρει από σημείο σε σημείο κατά σταθερούς συντελεστές μήκους και χρόνου. Ο von Karman κατέληξε με διαστατική ανάλυση στην παρακάτω σχέση:

$$l_m = \kappa \left| \frac{\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial y}}{\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial y^2}} \right| \quad (32)$$

Όπου ο συντελεστής $\kappa \cong 0,41$ είναι γνωστός ως παγκόσμια σταθερά του von Karman. Η παραπάνω σχέση είχε περιορισμένη επιτυχία διότι δίνει άπειρο μήκος ανάμιξης όπου υπάρχει σημείο ανάκαμψης στην κατανομή της ταχύτητας ($\frac{\partial^2 \bar{u}_x}{\partial y^2} = 0$) φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται συνήθως στις δέσμες και τους ολικούς (Μαριάτος, 1998).

4.2.2.1.2 Μοντέλα μιας διαφορικής εξίσωσης

Το πιο διαδεδομένο μοντέλο μιας διαφορικής εξίσωσης είναι αυτό των Spalart και Allmaras (Cebeci, 2005):

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu}_t f_{v1} \quad (33)$$

Ο όρος $\tilde{\nu}_t$ υπολογίζεται από τη μια τροποποιημένη εξίσωση μεταφοράς για το ιξώδες:

$$\begin{aligned} & \frac{D\tilde{\nu}_t}{Dt} \\ &= \underbrace{c_{b1}(1-f_{t2})\tilde{S}\tilde{\nu}_t}_{\text{παραγωγή}} + \underbrace{\frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \tilde{\nu}_t) \frac{\partial \tilde{\nu}_t}{\partial x_j} \right] + c_{b2} \left(\frac{\partial \tilde{\nu}_t}{\partial x_j} \right)^2 \right\}}_{\text{διάχυση}} \\ & - \underbrace{\left(c_{w1}f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right)}_{\text{καταστροφή}} \left(\frac{\tilde{\nu}_t}{d} \right)^2 \end{aligned} \quad (34)$$

$$c_{b1} = 0,1355, c_{b2} = 0,622, c_{v1} = 7,1, \sigma = \frac{2}{3} \quad (35)$$

$$c_{w1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1+c_{b2})}{\sigma}, c_{w2} = 0,3, c_{w3} = 2 \quad (36)$$

$$f_w = g \left[\frac{1+c_{w3}}{g^6+c_{w3}} \right]^{1/6}, g = r + c_{w2}(r^6 - r), r = \frac{\tilde{\nu}_t}{5\kappa^2 d^2} \quad (37)$$

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3+c_{v1}^3}, f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1+\chi f_{v1}}, \chi = \frac{\tilde{\nu}_t}{\nu} \quad (38)$$

$$\bar{S} = S + \frac{\tilde{\nu}_t}{\kappa^2 d^2} f_{v2}, S = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (39)$$

$$f_{t2} = c_{t3} e^{-c_{t4}\chi^2}, c_{t3} = 1,1, c_{t4} = 2 \quad (40)$$

Με d η απόσταση από το πλησιέστερο τοίχωμα. Η οριακή συνθήκη τοιχώματος είναι $\tilde{\nu}_t = 0$. Σε αντιπαράθεση με τα περισσότερα μοντέλα μιας εξίσωσης, αυτό το μοντέλο

έχει τοπικό χαρακτήρα (η εξίσωση σε ένα σημείο δεν εξαρτάται από τη λύση σε άλλα σημεία) και γι' αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κάθε είδους πλέγμα και τους επιλύτες των Navier-Stokes εξισώσεων σε 2 ή 3 διαστάσεις. Είναι υπολογιστικά «ανεπιθύητο» ως προς την ανάλυση πλέγματος κοντά στα τοιχώματα και συγκλίνει γρήγορα σε μόνιμες συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες είναι τετριμμένες. Το μοντέλο σχεδιάστηκε ειδικά για εφαρμογές στην αεροδιαστημική συμπεριλαμβανομένου ροών σε τοιχώματα (FLUENT). Προβλέπει ομαλή μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή στο σημείο μετάβασης. Άλλο ένα γνωστό μοντέλο μιας εξίσωσης είναι αυτό των Bradshaw και συν. (Cebeci, 2004).

4.2.2.1.3 Μοντέλα δύο διαφορικών εξισώσεων (μοντέλα $k \sim \epsilon$)

1. Το μοντέλο standard k-ε

Εξίσωση τυρβώδους κινητικής ενέργειας k:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}}_{\text{ρυθμός μεταβολής}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j}}_{\substack{\text{μεταφορά} \\ \text{με συναγωγή}}} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\rho}{2} \overline{u'_j u'_i u'_i} + \overline{p' u'_j} \right)}_{\substack{\text{τυρβώδης διάχυση} \\ \text{κινητικής ενέργειας} \\ \text{(μεταφορά διακυμάνσεων} \\ \text{ταχυτήτων από τις ίδιες} \\ \text{τις διακυμάνσεις)}}} - \underbrace{\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}}_{\substack{\text{παραγωγή} \\ \text{τύρβης από τη} \\ \text{μέση ροή}}} \\
 - \underbrace{\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}}_{\substack{\text{μη αντιστρεπτή} \\ \text{μετατροπή τυρβώδους} \\ \text{ενέργειας σε εσωτερική}}} & \quad (41)
 \end{aligned}$$

Ο δεύτερος όρος στο δεξί μέλος μοντελοποιείται ως:

$$- \left(\frac{\rho}{2} \overline{u'_j u'_i u'_i} + \overline{p' u'_j} \right) \approx \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (42)$$

Όπου ο όρος $\frac{\mu_t}{\sigma_k}$ είναι η τυρβώδης διαχυτότητα η οποία δεν είναι ιδιότητα του ρευστού και σ_k ένας εμπειρικός αριθμός διάχυσης.

Ο τρίτος όρος στο δεξί μέλος με βάση τη γενικευμένη υπόθεση Boussinesq μοντελοποιείται ως:

$$P_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \approx \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (43)$$

Εξίσωση ρυθμού απορρόφησης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (44)$$

Ο συντελεστής ιξώδους της τυρβώδους ροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu_t = \rho C_m \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (45)$$

Οι παράμετροι του μοντέλου λαμβάνουν τις εξής τιμές: $C_m = 0,09$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$ και $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Τέλος, στις εξισώσεις RANS, στη θέση του μοριακού ιξώδους μ χρησιμοποιείται το «φαινόμενο» ιξώδες $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$.

Για μεγάλους αριθμούς Reynolds, το standard k-ε μοντέλο (Launder και Spalding, 1974 όπως παρατίθετο από τους Versteeg και Malalasekera, 1995) κάνει χρήση συναρτήσεων τοιχωμάτων ώστε να αποφευχθεί η επίλυση των εξισώσεων κοντά στο τοίχωμα. Αν y είναι η κάθετη συντεταγμένη από το τοίχωμα, η μέση ταχύτητα στο σημείο y_p με $30 < y_p < 500$ ικανοποιεί τον λογαριθμικό κανόνα:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B = \frac{1}{\kappa} \ln E y^+ \quad (46)$$

με $B=5,5$ (ή $E=9,8$) για λείες επιφάνειες. Με την υπόθεση ότι ο ρυθμός παραγωγής της τύρβης ισούται με το ρυθμό απορρόφησής της, λαμβάνονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln (E y_p^+) \quad (47)$$

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (48)$$

$$\varepsilon = \frac{u_\tau^3}{\kappa y} \quad (49)$$

Το μοντέλο k-ε είναι το πιο διαδεδομένο. Προβλέπει πολύ καλά ροές λεπτού στρώματος διάτμησης (thin shear layers) και σε έγκλειστους χώρους (οι τάσεις Reynolds είναι σημαντικές). Ωστόσο, προβλέπει μέτρια ροές σε ανοιχτούς χώρους. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι δεν προβλέπει καλά σε περιπτώσεις ασθενών στρωμάτων διάτμησης. Στην περίπτωση αξονοσυμμετρικών δεσμών σε στάσιμο περιβάλλον υπερεκτιμά σημαντικά το ρυθμό ανάπτυξης της δέσμης. Σε μεγάλο τμήμα αυτών των ροών, ο ρυθμός παραγωγής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας είναι κατά πολύ μικρότερος από τον ρυθμό απορρόφησής της. Η κακή επίδοση του μοντέλου σε αυτές τις ροές αποδίδεται κυρίως στην περιγραφή του ρυθμού απορρόφησης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Το μοντέλο παρουσιάζει επίσης προβλήματα σε ροές με περιδίνηση (swirling flows) και σε ροές με μεγάλες, απότομες παραμορφώσεις (καμπύλα οριακά στρώματα και αποκλίνουσες δίοδοι) επειδή δεν μπορεί να περιγράψει τις ελαφρές επιδράσεις της καμπυλότητας των

γραμμών ροής στην τύρβη. Οι δευτερεύουσες ροές σε επιμήκεις μη κυκλικούς αγωγούς, οι οποίες προκαλούνται από ανισότροπες ορθές τάσεις Reynolds, δεν μπορούν να προβλεφθούν λόγω της ανεπαρκούς περιγραφής των ορθών τάσεων (Versteeg και Malalasekera, 1995).

2. Το μοντέλο k- ω

Το δεύτερο πιο διαδεδομένο μοντέλο 2 διαφορικών εξισώσεων είναι το k- ω το οποίο παρουσιάστηκε αρχικά από τον Saffman και έγινε γνωστό από τον Wilcox (Ferziger και Perić, 2002). Το μοντέλο χρησιμοποιεί την εξίσωση (41) ελαφρώς τροποποιημένη:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = P_k - \rho \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k^*} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (50)$$

Η διαφορική εξίσωση για το ω προτάθηκε από τον Wilcox (1998) και είναι η εξής:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \omega)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \rho \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega^*} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (51)$$

Ο συντελεστής ιξώδους της τυρβώδους ροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (52)$$

Οι παράμετροι του μοντέλου λαμβάνουν τις εξής τιμές: $\alpha = \frac{5}{9}$, $\beta = 0,075$, $\beta^* = 0,09$, $\sigma_k^* = \sigma_\omega^* = 2$ και $\varepsilon = \beta^* \omega k$.

3. Το μοντέλο RNG k- ε

Κατά τη διαδικασία RNG γίνεται συστηματική αφαίρεση των μικρών κλιμάκων κίνησης από τις εξισώσεις και αντικατάστασή τους από μεγαλύτερες κλιμακίες κίνησης και ένα τροποποιημένο ιξώδες. Οι εξισώσεις που προκύπτουν για τον υπολογισμό του k και ε είναι (Yakhot και συν. 1992 όπως παρατίθετο από τους Versteeg και Malalasekera, 1995):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \mu_t P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (53)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1}^* P_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (54)$$

Όπου: $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, $C_{1\varepsilon} = 1,42$, $C_{2\varepsilon} = 1,68$ και $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{n(1-n/n_0)}{1+\beta n^3}$, $n = P_k^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, $n_0 = 4,377$, $\beta = 0,012$.

Κεφάλαιο 4: Ανασιόπηση μαθηματικών προτύπων προσομοίωσης της τύρβης

Η αφαίρεση των κλιμάκων κατά τη διαδικασία RNG έχει σαν αποτέλεσμα την έκφραση του συντελεστή ιξώδους της τυρβώδους ροής από την παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon \mu}}\right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v}, \text{ όπου } \hat{v} = \mu_{eff}/\mu \text{ και } C_v \approx 100. \quad (55)$$

Η εξίσωση (55) επιτρέπει την καλή περιγραφή ροών χαμηλού αριθμού Reynolds και ροών κοντά σε τοιχώματα. Στην περίπτωση μεγάλων αριθμών Reynolds, η εξίσωση λαμβάνει τη μορφή $\mu_t = \rho C_m \frac{k^2}{\epsilon}$, με: $C_m = 0,0845$. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της σταθεράς C_m , η οποία προέκυψε από τη θεωρία RNG, βρίσκεται πολύ κοντά στην αντίστοιχη εμπειρική τιμή του μοντέλου standard k-ε ($C_m = 0,09$).

Επειδή η τύρβη επηρεάζεται γενικά από την περιστροφή ή περιδίνηση της μέσης ροής, στο μοντέλο RNG υπάρχει η δυνατότητα περιγραφής αυτών των επιδράσεων με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(a_s, \Omega, \frac{k}{\epsilon}\right) \quad (56)$$

Όπου το μ_{t0} υπολογίζεται είτε από την εξίσωση (55) είτε από την (45), το Ω είναι ένας χαρακτηριστικός αριθμός περιδίνησης και a_s μια σταθερά περιδίνησης η οποία λαμβάνει την τιμή 0,05 για ροές ήπιας περιδίνησης ή μεγαλύτερη τιμή για ροές έντονης περιδίνησης.

Οι αντίστροφοι ενεργοί αριθμοί Prandtl a_k και a_ϵ υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\left| \frac{\alpha - 1,3929}{\alpha_0 - 1,3929} \right|^{0,6321} \left| \frac{\alpha + 2,3929}{\alpha_0 + 2,3929} \right|^{0,3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}}, \text{ με } \alpha_0 = 1,0 \quad (57)$$

Στην περίπτωση μεγάλων αριθμών Reynolds ισχύει: $a_k = a_\epsilon \approx 1,39$. Η διαφορική εξίσωση για τον υπολογισμό του ϵ στο standard k-ε μοντέλο και το μοντέλο RSM είναι ένας από τους λόγους της περιορισμένης ακριβείας τους σε ροές που εμφανίζουν μεγάλους ρυθμούς παραμόρφωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο RNG υπάρχει ένας διορθωτικός όρος, εξαρτώμενος από την παραμόρφωση, στην αντίστοιχη σταθερά $C_{1\epsilon}$. Σε συνθήκες όπου ισχύει $n < n_0$, ο όρος έχει θετική συνεισφορά. Για ροές με ασθενή ή μέτρια παραμόρφωση το RNG μοντέλο προβλέπει παρόμοια με το standard k-ε. Σε ροές με μεγάλο ρυθμό παραμόρφωσης, $n > n_0$, ο όρος έχει αρνητική συνεισφορά. Σε σχέση με το standard k-ε, η μικρότερη καταστροφή του ϵ συνεπάγεται φυσικά αύξηση της τιμής του με αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής του k . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το RNG σε ροές με έντονη ή απότομη παραμόρφωση να προβλέπει μικρότερες τιμές του συντελεστή ιξώδους της τυρβώδους ροής. Το μοντέλο RNG ανταποκρίνεται καλύτερα σε ροές με απότομη παραμόρφωση και σε ροές με καμπυλότητα σε σχέση με το standard k-ε μοντέλο. Οι Yakhot και συν. (1992) ανέφεραν ότι ανταποκρίνεται πολύ καλά στη βασική ροή με βαθμίδα (backward facing step) ιδιαίτερα όταν γίνεται η χρήση της μη γραμμικής σχέσης για τις τάσεις Reynolds. Το υπολογιστικό κόστος είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό του standard k-ε. Οι καλές προβλέψεις του μοντέλου σε σύνθετες τυρβώδεις ροές το

έχουν κάνει τόσο δημοφιλές ώστε να περιλαμβάνεται σε πολλούς εμπορικούς κώδικες CFD. Ωστόσο, δεν έχουν δημοσιευτεί εκτεταμένες μελέτες διερεύνησης της αξιοπιστίας του (Versteeg και Malalasekera, 1995).

4.2.2.1.4 Μοντέλο εξισώσεων τάσεων Reynolds (Reynolds Stress Model – RSM)

Το πιο σύνθετο από τα κλασσικά μοντέλα μεταφοράς είναι το μοντέλο εξισώσεων τάσεων Reynolds (Reynolds stress equation model). Το βασικό μειονέκτημα του μοντέλου k-ε να προβλέψει τις ροές σε πολύπλοκα πεδία τάσεων ή σε πεδία με σημαντικές σωματικές δυνάμεις έγκειται στον προβληματικό προσδιορισμό των τάσεων Reynolds από την εξίσωση (23) ακόμη κι αν η τυρβώδης κινητική ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί με σχετικά καλή ακρίβεια. Από την άλλη πλευρά, η εξίσωση μεταφοράς των τάσεων Reynolds μπορεί να περιγράψει την επίδραση της κατεύθυνσης του πεδίου τάσεων Reynolds. Η εξίσωση μεταφοράς των τάσεων Reynolds R_{ij} ($R_{ij} = -\frac{\tau_{ij}}{\rho} = \overline{u'_i u'_j}$) είναι (Versteeg και Malalasekera, 1995):

$$\underbrace{\frac{DR_{ij}}{Dt}}_{\substack{\text{ρυθμός μεταβολής} \\ \text{και} \\ \text{μεταφορά με συναγωγή}}} = \underbrace{P_{ij}}_{\substack{\text{ρυθμός} \\ \text{παραγωγής}}} + \underbrace{D_{ij}}_{\substack{\text{μεταφορά} \\ \text{με} \\ \text{διάχυση}}} - \underbrace{\epsilon_{ij}}_{\substack{\text{ρυθμός} \\ \text{απορρόφησης}}} + \underbrace{\Pi_{ij}}_{\substack{\text{μεταφορά} \\ \text{λόγω} \\ \text{αλληλεπίδρασης} \\ \text{πίεσης-παραμόρφωσης}}} + \underbrace{\Omega_{ij}}_{\substack{\text{μεταφορά} \\ \text{λόγω} \\ \text{περιστροφής}}} \quad (58)$$

Η εξίσωση (58) περιγράφει τις 6 μερικές διαφορικές εξισώσεις, μια εξίσωση μεταφοράς για κάθε μία από τις 6 ανεξάρτητες τάσεις Reynolds. Η τυρβώδης κινητική ενέργεια k υπολογίζεται ως το άθροισμα των 3 κάθετων τάσεων $[k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})]$. Στους περισσότερους κώδικες CFD, ο ρυθμός ιξώδους απορρόφησης του k, ε, υπολογίζεται από το standard k-ε μοντέλο.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι η δυνητικά ευρύτερη εφαρμογή του σε σχέση με τα κλασσικά μοντέλα μεταφοράς. Προβλέπει με πολύ καλή ακρίβεια τις μέσες ιδιότητες της ροής και όλες τις τάσεις Reynolds για πολλά απλά σενάρια αλλά και για πολύπλοκες ροές συμπεριλαμβανομένων των δεσμών κατά μήκος στερεών ορίων (wall jets), την ασύμμετρη ροή καναλιού (asymmetric channel flow), ροές σε αγωγούς μη κυκλικής διατομής (non-circular duct flow) και καμπύλες ροές (curved flow). Βασικό μειονέκτημα είναι το μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Επίσης το μοντέλο δεν έχει επαληθευθεί όσο εκτεταμένα όσο τα μοντέλα τύπου k-ε. Τέλος, μπορεί να ανταποκριθεί τόσο άσχημα όσο το k-ε λόγω των ίδιων προβλημάτων της περιγραφής του ρυθμού ιξώδους απορρόφησης του k (π.χ. σε αζονοσυμμετρικές δέσμες και ελεύθερες ροές ανακυκλοφορίας).

4.2.2.1.5 Μοντέλο αλγεβρικών εξισώσεων τάσεων Reynolds

Το μοντέλο αλγεβρικών εξισώσεων τάσεων Reynolds είναι ένας οικονομικός τρόπος απόδοσης της ανισοτροπίας των τάσεων Reynolds χωρίς να λυθούν πλήρως οι εξισώσεις μεταφοράς τους. Το μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος στον υπολογισμό των τάσεων Reynolds οφείλεται στην εμφάνιση των βαθμίδων των τάσεων Reynolds στους όρους μεταφοράς συναγωγής και διάχυσης. Ο Rodi πρότεινε την απαλοιφή αυτών των όρων ή την μοντελοποίησή τους κατ' αυτόν τον τρόπο ώστε οι εξισώσεις των τάσεων Reynolds να μεταπέσουν σε αλγεβρικές. Μια πιο γενική μέθοδος είναι η υπόθεση ότι το άθροισμα των δυο αυτών όρων είναι ανάλογο με το άθροισμα των αντίστοιχων όρων της εξίσωσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι η απόδοση της ανισοτροπίας των τάσεων Reynolds. Προσφέρει δυνητικά την καλή πρόβλεψη της προσέγγισης RSM (καλή μοντελοποίηση της άνωσης και φαινομένων περιστροφής) συνδυάζοντας ένα οικονομικό υπολογιστικό κόστος. Το μοντέλο δεν ανταποκρίνεται καλά όταν η υπόθεση απαλοιφής των όρων μεταφοράς δια συναγωγής και διάχυσης δεν είναι έγκυρη. Επίσης και αυτό το μοντέλο δεν έχει επαληθευθεί όσο εκτεταμένα όσο το μοντέλο k-ε.

4.2.2.2 Μοντέλα υπο-πλεγματικής κλίμακας ή εξομοίωσης μεγάλων δινών (LES)

Βασίζονται στην υπόθεση ότι η τυρβώδης κίνηση μπορεί να αναλυθεί σε μια συνιστώσα μεγάλης κλίμακας και μια υπο-πλεγματικής (μικρής) κλίμακας ώστε ο διαχωρισμός των δυο να μην έχει μεγάλη επίδραση στην εξέλιξη των μεγάλων κλιμάκων. Τα μοντέλα αυτά επιλύουν τις χρονικά εξαρτημένες εξισώσεις της ροής για τη μέση ροή και για τις μεγαλύτερες δίνες και μοντελοποιούν τις επιδράσεις των μικρότερων δινών. Οι μέθοδοι βασίζονται σε χωρικά φίλτρα. Οι μέθοδοι, αν και πολλά υποσχόμενες, έχουν ακόμα μεγάλο υπολογιστικό κόστος για να είναι χρήσιμες σε εφαρμογές πρακτικού ενδιαφέροντος (Μαρκιάτος, 1998).

4.2.2.3 Άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS)

Με αυτήν τη μέθοδο προσομοιώνονται όλες οι δυναμικά σημαντικές κλίμακες των τυρβωδών ροών υψηλού αριθμού Reynolds. Βασίζεται στην υπόθεση ότι η άμεση προσομοίωση γίνεται με την τεχνητή μείωση του αριθμού Reynolds μέχρι του σημείου όπου μπορούν να προσομοιωθούν με ακρίβεια όλες οι σημαντικές κλίμακες και ότι ένας ικανός αριθμός μεγάλων κλιμάκων παραμένει αμετάβλητος σε κάθε αλλαγή του αριθμού Reynolds (Μαρκιάτος, 1998). Η μέθοδος αυτή έχει ακόμα πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

4.2.2.4 Αναλυτικές θεωρίες τύρβης

Αναπτύσσονται γενικά σε χώρο Fourier και είναι πολύπλοκες θεωρίες που δεν έχουν ακόμα εφαρμοσθεί σε πραγματικά προβλήματα μηχανικού ενδιαφέροντος (Μαρκιάτος, 1998).

4.3 Βιβλιογραφικές αναφορές

Anderson, J.D., (1995), “Computational Fluid Dynamics: The basics with applications”, McGraw-Hill, Inc.

Cebeci T., Shao, J.P., Kafyeke, F. and Laurendeau, E., (2005), “Computational Fluid Dynamics for Engineers”, Springer, Horizons Publishing

Cebeci T., (2004), “Analysis of Turbulent Flows”, Elsevier, 2nd Edition

Ferziger, J.H. and Perić, M., (2002), “Computational Fluid Methods for Fluid dynamics”, Springer

FLUENT, διαδικτυακός τόπος: <http://www.scribd.com/doc/50413158/10/One-Equation-Model-Spalart-Allmaras>

Tannehill, J., Anderson, D. and Pletcher, (1997), “Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer”, Taylor & Francis, 2nd edition

Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., (1995), “An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The finite volume method”, Longman Scientific & Technical

Μαρκάτος Ν., (1998), “Τυρβώδη φαινόμενα μεταφοράς και μαθηματικά πρότυπα προσομοίωσής τους”, ΕΜΠ

Μπεργελές Γ., (2000), “Υπολογιστική Ρευστομηχανική”, Εκδόσεις Συμεών, 1^η έκδοση 1993

Ανασιόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

Λίστα Συμβόλων

Χαρακτήρες κεφαλαίων

A	Επιφάνεια έκλυσης	m^3
C	Συντελεστής συσχετίσεων δεσμών	
C_d	Συντελεστής παροχής	
K	Αξονική σταθερά	
M	Αριθμός Mach	
MW	Μοριακό βάρος	kg/kmole
P	Πίεση	Pa
R	Παγκόσμια σταθερά αερίων	Pa m^3 /mol K
T	Θερμοκρασία	K
X	Κλάσμα mole	mole/mole
Y	Κλάσμα μάζας	kg/kg

Χαρακτήρες μικρών γραμμάτων

b	Σταθερά εξίσωσης Abel-Nobel	m^3/kg
d	Διάμετρος	m
d^*	Διάμετρος «ορμής» ($=d (\rho_j/\rho_a)^{1/2}$)	m
d'	Διάμετρος ($=d (\rho_a/\rho_j)^{1/2}$)	m
\bar{n}	Μέση ογκομετρική συγκέντρωση ή κλάσμα mole	m^3/m^3 ή mole/mole
r	Ακτινική απόσταση	m
u	Ταχύτητα	m/s
x	Απόσταση από τον άξονα έκλυσης	m

z Συντελεστής συμπίεστικότητας

Δείκτες

a Περιβάλλον (ambient)
cl Άξονας συμμετρίας (centreline)
j Δέσμη (jet)
o Συνθήκες ηρεμίας
ps Ψευδό-διάμετρος (pseudo-diameter)

Ελληνικοί χαρακτήρες

γ Λόγος θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση προς αυτήν υπό σταθερό όγκο
 ρ Πυκνότητα kg/m^3

Συντομογραφίες

ACH Αριθμός εναλλαγών αέρα στη μονάδα του χρόνου (Air Changes per Hour) h^{-1}
SAE Society of Automotive Engineers

5.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να εισαχθεί με επιτυχία στην αγορά το H_2 ως φορέας ενέργειας, θα πρέπει να μελετηθούν τα φυσικά φαινόμενα που συνδέονται τόσο με τη λειτουργία των στοιχείων υποδομής αυτής της τεχνολογίας όσο με πιθανά ατυχήματα σε πραγματική κλίμακα. Σ' αυτήν την κατεύθυνση, έχουν δημοσιευτεί στο παρελθόν πειραματικές αλλά και υπολογιστικές μελέτες. Οι μελέτες στοχεύουν (ή θα πρέπει να στοχεύουν) στην περιγραφή των ακολούθων (Kotchourko, 2009):

- Εξέλιξη και αποτελέσματα ατυχήματος.
- Ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων αποσόβησης κινδύνων.
- Δημιουργία αξιόπιστης βάσης δεδομένων για τον καθορισμό Κωδίκων και Προδιαγραφών.
- Υποστήριξη ανάπτυξης ασφαλών τεχνολογιών H_2 .

Ωστόσο, τα ζητήματα που συνδέονται με την ασφάλεια των τεχνολογιών H_2 δεν έχουν επιλυθεί ακόμα τόσο από πλευράς πληρότητας πειραματικών δεδομένων σε όλο το εύρος των συνθηκών στην πράξη, όσο από πλευράς ανάπτυξης υπολογιστικών μέσων όπως οι μεθοδολογίες CFD (Molkon, 2007).

Για την εφαρμογή των CFD μεθοδολογιών σε προβλήματα πραγματικής κλιμακίας είναι απαραίτητος ο έλεγχος της καταλληλότητας και αξιοπιστίας τους. Ο έλεγχος της καταλληλότητας συνίσταται από τη διαδικασία ελέγχου της επάρκειας των υπολογιστικών μέσων να περιγράψουν με ακρίβεια το μαθηματικό μοντέλο. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι ο έλεγχος της καταλληλότητας δεν άπταται του ελέγχου της δυνατότητας του μοντέλου να περιγράψει την πραγματικότητα δηλαδή τα σχετικά φυσικά φαινόμενα (Baraldi και συν., 2010). Από την άλλη πλευρά, για την αξιοπιστία των υπολογιστικών μέσων ελέγχεται ο βαθμός ακρίβειας της περιγραφής της πραγματικότητας από το μαθηματικό μοντέλο λαμβάνοντας παράλληλα υπ' όψιν το πεδίο εφαρμογής του μαθηματικού μοντέλου (Baraldi και συν., 2010).

Σ' αυτό το κεφάλαιο επιχειρείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των υπολογιστικών μελετών σεναρίων έκλυσης και διασποράς αερίων με έμφαση σε σενάκια H_2 . Παρατίθενται οι σχετικές μελέτες σεναρίων σε ανοιχτούς και κλειστούς χώρους ενώ παρουσιάζονται κάθε φορά τα κυριότερα συμπεράσματα των μελετών. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά οι διάφορες μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για την μοντελοποίηση των συνθηκών κοντά στην πηγή στην περίπτωση έκλυσης ρευστού σε συνθήκες υψηλής πίεσης. Τέλος γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της υπόθεσης ιδανικού και πραγματικού αερίου για την περίπτωση σεναρίων έκλυσης H_2 .

5.2 Μελέτες σεναρίων έκλυσης και διασποράς αερίων σε ανοιχτούς χώρους

5.2.1 Μελέτη έκλυσης, διασποράς και καύσης ατυχήματος H_2 σε αστική περιοχή

Οι Venetsanos και συν. (2003) προσομοίωσαν το ατύχημα έκρηξης που συνέβη στις 3 Μαρτίου 1983 στο κέντρο της Στοκχόλμης. Το ατύχημα προκλήθηκε από έκλυση περίπου 13,5 kg H_2 σε μια φορτομάξα 18 διασυνδεδεμένων δοχείων αποθήκευσης H_2 όγκου 50 l και πίεσης 200 bar το καθένα. Η έκλυση μοντελοποιήθηκε υποθέτοντας ροή Fanno στις σωληνώσεις και ισεντροπική μεταβολή στα δοχεία με ιδιότητες πραγματικού αερίου για το H_2 . Η έκλυση θεωρήθηκε ότι προήλθε από ρήξη 1 ή 2 γραμμών διασύνδεσης των δοχείων με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν είτε 2 είτε 4 σημεία έκλυσης αντίστοιχα (δέσμες H_2). Μελετήθηκαν 5 σενάκια έκλυσης: α) έκλυση από 4 σημεία με τη συμμετοχή 15 και 3 δοχείων αντίστοιχα (ρωγμή από 2 γραμμές διασύνδεσης), β) έκλυση από 2 σημεία με τη συμμετοχή 15 και 3 δοχείων αντίστοιχα (ρωγμή από 1 γραμμή διασύνδεσης), γ) έκλυση από 2 σημεία με τη συμμετοχή και των 18 δοχείων (ρωγμή από 1 γραμμή διασύνδεσης), δ) έκλυση από 1 σημείο υποθέτοντας 1 δοχείο ισοδύναμου όγκου με αυτόν των 18 δοχείων και ε) έκλυση από 4 σημεία υποθέτοντας 1 δοχείο ισοδύναμου όγκου με αυτόν των 18 δοχείων (ρωγμή από 2 γραμμές διασύνδεσης). Ο χρόνος για την εκκένωση των δοχείων βρέθηκε μικρότερος στην περίπτωση α) και πιο κοντά στον πραγματικό χρόνο κατά την επίσημη αναφορά του ατυχήματος. Επίσης, στην περίπτωση ε) υπερεκτιμήθηκε η συνολική εκλυθείσα μάζα H_2 μόνο κατά 4%. Οι συνθήκες έκλυσης του σεναρίου α) χρησιμοποιήθηκαν για του υπολογισμό της διασποράς και έκρηξης του H_2 . Για τον υπολογισμό της διασποράς του H_2 χρησιμοποιήθηκε μοντέλο μιας εξίσωσης μη ισότροπης τύρβης. Για την μοντελοποίηση της έκρηξης,

χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο k-ε σε συνδυασμό με το μοντέλο τυρβώδους καύσης Eddy-dissipation του Hjertager. Η έκρηξη δεν άγγιξε τα όρια ταχείας κατάκαυσης ή κατάρρηξης. Τα αποτελέσματα βρέθηκαν σε συμφωνία με τα επίσημα στοιχεία καταστροφών στη γύρω περιοχή. Η παρούσα μελέτη αναδεικνύει την πιθανότητα μη εμφάνισης του φαινομένου κατάρρηξης ή ακόμα και ταχείας κατάκαυσης στην περίπτωση σεναρίων ανοιχτού χώρου ακόμα κι αν η συγκέντρωση H₂ είναι μέσα στα όρια της κλίμακας κατάρρηξης.

5.2.2 Μελέτη της επίδρασης γειννίασης στερεής επιφάνειας στην έκταση του αναφλέξιμου νέφους H₂ και CH₄

Η έκταση του αναφλέξιμου νέφους είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τον καθορισμό των αποστάσεων ασφαλείας καθώς και των διαστάσεων των ζωνών επικινδυνότητας στους Κώδικες και τις Προδιαγραφές ασφαλείας εγκαταστάσεων τεχνολογιών H₂. Οι Hourri και συν. (2009) δημοσίευσαν μια υπολογιστική μελέτη της επίδρασης γειννίασης στερεής επιφάνειας στην έκταση του αναφλέξιμου νέφους H₂ και CH₄. Τα σενάρια αφορούσαν εκλύσεις σταθερής παροχής από δοχείο αποθήκευσης H₂ και CH₄ πίεσης 284 barg (η προκύπτουσα παροχή ήταν 0,99 kg/s και 2,72 kg/s αντίστοιχα). Μελετήθηκαν οριζόντιες και κατακόρυφες δέσμες παρουσία στερεής επιφάνειας σε απόσταση 0,5 m, 1 m και 2 m κατά μήκος και καθέτως του άξονα έκλυσης. Τα αποτελέσματα συνειριήθησαν με αυτά ελευθέρων δεσμών (δηλ. απουσία στερεής επιφάνειας). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται περιληπτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Επίδραση στερεής επιφάνειας στην έκταση αναφλέξιμου νέφους H₂ και CH₄

Συνθήκες έκλυσης		Δέσμη H ₂		Δέσμη CH ₄	
		Οριζόντια	Κατακόρυφη	Οριζόντια	Κατακόρυφη
Παράλληλη στον άξονα δέσμης	Όχι	38	43	17	15
	0,5 m	52	100	50	40
	1 m	48	90	39	31
	2 m	43	85	18	21
Κάθετη στον άξονα δέσμης	Όχι	38		17	
	0,5 m	73		41	
	1 m	65		28	
	2 m	65		24	

Όπως φαίνεται, η έκταση του αναφλέξιμου νέφους επηρεάζεται από τη γειννίαση της επιφάνειας τόσο στη δέσμη H₂ όσο σε αυτήν του CH₄. Για τις οριζόντιες δέσμες, την μεγαλύτερη επίδραση είχε η παράλληλη προς τη δέσμη επιφάνεια στην περίπτωση του CH₄ (αύξηση κατά 200% όταν η επιφάνεια απείχε 0,5 m). Η μέγιστη αύξηση της έκτασης του αναφλέξιμου νέφους στην περίπτωση του H₂ ήταν 37% (και πάλι όταν η επιφάνεια απείχε 0,5 m). Στην περίπτωση των κατακόρυφων δεσμών, η μέγιστη αύξηση της έκτασης του αναφλέξιμου νέφους ήταν 132% και 166% για το H₂ και το CH₄ αντίστοιχα (και πάλι όταν η επιφάνεια απείχε 0,5 m).

Η επίδραση μιας στερεής επιφάνειας στα χαρακτηριστικά της δέσμης είναι ένα φαινόμενο που έχει μελετηθεί στο παρελθόν τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά για δέσμες αέρα στον σχεδιασμό αερισμού κτιρίων. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως «φαινόμενο Coanda» (Awbi, 2005). Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα.

5.2.3 Προσομοίωση σεναρίων ατυχήματος H_2 και CH_4 από υπόγειους αγωγούς μεταφοράς

Στις 30 Ιουλίου του 2004 στο Ghislenghien του Βελγίου σκοτώθηκαν 15 άτομα λόγω έκρηξης και επακόλουθης φωτιάς που προκλήθηκε από έκλυση CH_4 σε υπόγειο αγωγό μεταφοράς. Οι Wilkening and Baraldi (2007), ορμώμενοι από αυτό το ατύχημα, μελέτησαν υπολογιστικά με τον κώδικα CFD-ACE σενάρια παραπλήσια με αυτό του ατυχήματος απουσία και παρουσία ανέμου (10 m/s). Συνέκριναν δε τα αποτελέσματα των σεναρίων CH_4 με αντίστοιχα σενάρια έκλυσης H_2 στις ίδιες συνθήκες. Οι υπολογισμοί ήταν δισδιάστατοι ενώ θεωρήθηκε ότι το CH_4 ή το H_2 ήταν αποθηκευμένο σε αγωγό μήκους 200 m, διαμέτρου 1 m υπό πίεση 11 bar. Η έκλυση θεωρήθηκε ότι είχε διάμετρο 20 cm ενώ η ταχύτητα ήταν ηχητική και για τα 2 αέρια (420 m/s για το CH_4 και 1340 m/s για το H_2). Παρατήρησαν ότι η εκλυόμενη θερμική ενέργεια CH_4 , η περιεχόμενη στο υπολογιστικό χωρίο, ήταν μεγαλύτερη από αυτήν του H_2 λόγω της μικρότερης άνωσης του CH_4 και της μικρότερης έντασης της πηγής έκλυσης. Ωστόσο το αντίθετο παρατηρήθηκε όταν συνεκρίθησαν οι αντίστοιχες θερμικές ενέργειες, οι περιέχουσες στο αναφλέξιμο νέφος, λόγω των ευρύτερων ορίων ανάφλεξης του H_2 (4%-74%) έναντι του CH_4 (5.3%-15%). Κατά συνέπεια, πιθανή έκρηξη των σεναρίων H_2 θα προκαλούσε θεωρητικά περισσότερες καταστροφές από αυτές των σεναρίων CH_4 . Από την άλλη όμως πλευρά, το αναφλέξιμο νέφος των σεναρίων H_2 βρίσκεται πιο μακριά από το έδαφος και τα γειτονικά κτίρια σε σχέση με αυτό των σεναρίων CH_4 , γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα έναυσης των σεναρίων CH_4 έναντι αυτών του H_2 .

5.2.4 Ανάλυση επιπτώσεων έκλυσης H_2 σε σταθμό ανεφοδιασμού

Στην Ιαπωνία υπάρχουν 3 ειδών σταθμοί ανεφοδιασμού συμβατικού καυσίμου: α) σταθμοί ανεφοδιασμού ανοιχτού χώρου με προστατευτικό θόλο μικρών διαστάσεων, β) σταθμοί ανεφοδιασμού με προστατευτικό θόλο μεγάλων διαστάσεων και γ) σταθμοί ανεφοδιασμού αυτοεξυπηρέτησης. Στους σταθμούς η απόσταση ασφαλείας έχει οριστεί στα 6 m. Οι σταθμοί περιβάλλονται από τοίχο πυροπροστασίας ύψους 2 m. Με την τρέχουσα ιαπωνική νομοθεσία, επιτρέπεται η εγκατάσταση σταθμού H_2 στους συμβατικούς σταθμούς μόνο της α) κατηγορίας. Ο Kikukawa (2008) παρουσίασε αριθμητικά αποτελέσματα με τον κώδικα FLUENT και το μοντέλο realizable k-ε σεναρίων έκλυσης H_2 πολύ μικρής διαμέτρου (0,2 mm) υπό πίεση 40 MPa σε σταθμό ανεφοδιασμού της β) κατηγορίας παρουσία ανέμου έντασης έως 3 m/s με σκοπό να αποδείξει την ασφάλεια της εγκατάστασης. Τα αποτελέσματά του έδειξαν ότι η συγκέντρωση H_2 σε αυτές τις συνθήκες έκλυσης δεν υπερβαίνει το 1% κάτω από το θόλο και ότι η αύξηση των διαστάσεων του θόλου επηρεάζει ελάχιστα τη διατήρηση του H_2 κάτω από αυτόν.

5.2.5 Πειραματική και υπολογιστική ανάλυση τυρβωδών δεσμών αέρα και H_2

Οι Houf και συν. (2009) δημοσίευσαν υπολογιστικά αποτελέσματα τυρβωδών δεσμών αέρα και H_2 . Οι προσομοιώσεις έγιναν με τον κώδικα FUEGO, τα μοντέλα k-ε και RNG χρησιμοποιώντας τα σχήματα διακριτοποίησης ανάντη 1^{ης} τάξης και MUSCL. Τα αποτελέσματα της ταχύτητας, κλάσματος μάζας και mole επί του άξονα έκλυσης συνεκρίθησαν με συσχετίσεις από την βιβλιογραφία στην περιοχή αυτό-ομοιότητας (self similar) των δεσμών.

5.2.5.1 Ασυμπίεστη τυρβώδης δέσμη αέρα

Αρχικά μελετήθηκε μια ισόθερμη κυκλική δέσμη αέρα με αριθμό Reynolds 13.200 και ταχύτητα 10 m/s με τη χρήση του k-ε και RNG k-ε με τα 2 σχήματα διακριτοποίησης. Οι ταχύτητες επί του άξονα έκλυσης των προσομοιώσεων συνεκρίθησαν με την παρακάτω συσχέτιση:

$$\frac{u_j}{u_{cl}} = \left(\frac{1}{C_1}\right) \frac{x}{d} + C_2 \quad (1)$$

Ο συντελεστής C_2 σχετίζεται με την νοητή θέση της δέσμης και εξαρτάται τόσο από τις συνθήκες όσο από την περιοχή μη αυτό-ομοιότητας της δέσμης. Ο συντελεστής C_1 παίρνει τιμές από 5 έως 6,5.

Τα αποτελέσματα με: (1) πυκνότερο πλέγμα, (2) χρήση του μοντέλου RNG k-ε σε σχέση με το k-ε και (3) χρήση του σχήματος MUSCL σε σχέση με το 1^{ης} τάξης ανάντη προέβλεψαν μεγαλύτερη έκταση της δέσμης. Ωστόσο, όλα τα αποτελέσματα προέβλεψαν τιμές για το συντελεστή C_1 μέσα στα όρια των τιμών από τη βιβλιογραφία με εξαίρεση την περίπτωση του μοντέλου RNG k-ε με το σχήμα MUSCL η οποία προέβλεψε πολύ σημαντική αύξηση της έκτασης της δέσμης.

5.2.5.2 Ασυμπίεστη τυρβώδης δέσμη H_2

Μελετήθηκε μια δέσμη H_2 με αριθμό Reynolds 13.200 με διάμετρο έκλυσης 6,2 cm με τη χρήση του k-ε και RNG k-ε με τα 2 σχήματα διακριτοποίησης και κυμαινόμενη τυρβώδη ένταση στην πηγή από 1% έως 20%. Όταν η πυκνότητα της δέσμης διαφέρει από αυτήν του περιβάλλοντος αέρα, η συσχέτιση της ταχύτητας στον άξονα έκλυσης, σχέση (1), παραμένει η ίδια αλλά η διάμετρος d αντικαθίσταται από την d^* ($=d(\rho_j/\rho_a)^{1/2}$). Η τιμή του συντελεστή C_1 είναι περίπου ίση με 5. Ομοίως, η συσχέτιση για το κλάσμα μάζας Y_{cl} επί του άξονα έκλυσης δίνεται από τη σχέση (3). Η τιμή του συντελεστή C_3 είναι περίπου ίση με 4,8. Ανάλογη έκφραση δίνεται για το κλάσμα mole επί του άξονα X_{cl} , όπως φαίνεται από τη σχέση (4).

$$\frac{u_j}{u_{cl}} = \left(\frac{1}{C_1}\right) \frac{x}{d^*} + C_2 \quad (2)$$

$$\frac{1}{Y_{cl}} = \left(\frac{1}{C_3}\right) \frac{x}{d^*} + C_4 \quad (3)$$

$$\frac{1}{X_{cl}} = \left(\frac{1}{C_5}\right) \frac{x}{d'} + C_6 \quad (4)$$

Τα αποτελέσματα έδειξαν μικρή επίδραση της τυρβώδους έντασης στις τιμές των σταθερών των παραπάνω σχέσεων (περίπου 7% μείωση της σταθεράς της ταχύτητας – δηλαδή μεγαλύτερη έκταση της δέσμης – όταν η τυρβώδης ένταση αυξήθηκε από 1% σε 20%). Οι σταθερές ήταν περίπου κατά 30-40% μεγαλύτερες όταν χρησιμοποιήθηκε το k-ε με το σχήμα 1^{ης} τάξης ανάντη. Σημαντική βελτίωση εμφάνισε η προσομοίωση με το RNG k-ε ή το σχήμα MUSCL.

5.2.5.3 Συμπιεστή τυρβώδης δέσμη H₂

Στην περίπτωση της συμπιεστής τυρβώδους δέσμης H₂ οι Houf και συν. (2009) βασίστηκαν στη μέθοδο Mach disk (Winters and Evans, 2006) για να υπολογίσουν τις υποηχητικές συνθήκες αμέσως μετά το δίσκο Mach. Η μέθοδος δίσκου Mach περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.4.5.1. Το πείραμα που μοντελοποιήθηκε ήταν έκλυση H₂ από διάμετρο 5,08 mm σε συνθήκες ηρεμίας πίεσης 104,8 bar και θερμοκρασίας 231,4 K. Η διάμετρος του δίσκου Mach που υπολογίστηκε ήταν 6,2 cm ενώ ο αριθμός Mach αμέσως μετά το δίσκο ήταν 0,4 (ταχύτητα H₂ ίση με 448,2 m/s). Με βάση την ανάλυση και τα πειράματα των Birch και συν. (1987) με φυσικό αέριο, αιθυλένιο και αέρα σε πιέσεις μέχρι 70 bar, οι τιμές των συντελεστών C₁ και C₂ των σχέσεων (2) και (3) είχαν τιμές 4,8 και 5,4 αντίστοιχα. Ο συντελεστής C₁ της προσομοίωσης με το μοντέλο k-ε βρέθηκε ίσος με 7,6 ενώ με το μοντέλο RNG k-ε ήταν 5,4. Ο συντελεστής C₂ ήταν περίπου 5% μικρότερος από τον C₁ και για τα 2 μοντέλα.

5.2.6 Υπολογιστική μελέτη σεναρίων έκλυσης και διασποράς H₂ από οχήματα

Οι Venetsanos και συν. (2008) δημοσίευσαν μια ανάλυση των πιθανών κινδύνων από εκλύσεις αερίου H₂ αστικών λεωφορείων (σε πιέσεις 20, 35 και 70 MPa συνολικής μάζας 40 kg) σε αστικό περιβάλλον και σήραγγες. Συνεικρίθησαν επίσης παρόμοιες εκλύσεις από συστήματα συμπιεσμένου φυσικού αερίου (πίεση 20 MPa συνολικής μάζας 168 kg). Τα σενάρια που μελετήθηκαν στις παραπάνω πιέσεις αφορούσαν εκλύσεις H₂ από 1 PRD (1 πηγή: 5 kg ή 4 πηγές: 40 kg) και 4 PRD (4 πηγές: 40 kg) και φυσικού αερίου από 1 PRD (1 πηγή: 21 kg ή 4 πηγές: 168 kg) και 4 PRD (4 πηγές: 168 kg). Η μαζική παροχή και η διάρκεια έκλυσης του φυσικού αερίου ήταν μεγαλύτερη από αυτήν των περιπτώσεων με H₂ λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας και περιεχόμενης μάζας του. Στα σενάρια έκλυσης σε αστικό περιβάλλον, υψηλότερη πίεση αποθήκευσης προκαλεί μεγαλύτερα μέγιστα αναφλέξιμου νέφους. Η μάζα του αναφλέξιμου νέφους H₂ στην περίπτωση έκλυσης από 4 PRD/4 πηγές ήταν συγκρίσιμη με αυτήν του φυσικού αερίου. Στα άλλα σενάρια η μάζα του αναφλέξιμου νέφους H₂ είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του φυσικού αερίου. Η διαθέσιμη ενέργεια, η περιέχουσα στο αναφλέξιμο νέφος του φυσικού αερίου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του νέφους H₂ σε όλα τα σενάρια και ιδιαίτερα στις περιπτώσεις 1

PRD/1 πηγή και 4 PRD/4 πηγές. Στα σενάρια έκλυσης σε σήραγγα, τις δυσμενέστερες συνθήκες προκαλεί η περίπτωση ταχύτατης έκλυσης είτε H_2 είτε φυσικού αερίου σε σήραγγα χωρίς αερισμό. Τα σενάρια H_2 σε σήραγγα είναι δυσμενέστερα σε σχέση με αυτά σε αστικό περιβάλλον, η δε περιέχουσα ενέργεια στο αναφλέξιμο νέφος είναι μεγαλύτερη και έχει μεγαλύτερο χρόνο παραμονής. Από τις προσομοιώσεις αναδείχθηκε η διαφορετική συμπεριφορά του H_2 σε σχέση με το φυσικό αέριο με συνέπεια να είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός διαφορετικών μέτρων αποσόβησης κινδύνου.

5.3 Μελέτες σεναρίων έκλυσης και διασποράς αερίων σε κλειστούς χώρους

5.3.1 Κατακόρυφη τυρβώδης ανωστική δέσμη He

Οι Cheng, Agranat and Tchouvelev (2005) αξιολόγησαν τον κώδικα PHOENICS με το μοντέλο RNG k-ε για κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές δέσμες He. Χρησιμοποίησαν το πείραμα των Pancharakesan and Lumley (1993) το οποίο αφορούσε έκλυση He από κυκλική διατομή διαμέτρου 6,12 mm υπό σταθερή ταχύτητα 72,5 m/s μέσα σε δωμάτιο διαστάσεων 4,25 m × 4,25 m × 3,75 m. Η σύγκριση της ταχύτητας και του κλάσματος mole He στον άξονα της έκλυσης μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αριθμητικών αποτελεσμάτων έδειξε τα εξής:

- Ταχύτητα στον άξονα έκλυσης:
 - Μέχρι την απόσταση 0,43 m από την έκλυση, η προσομοίωση υπερετίμησε τα πειραματικά δεδομένα. Η μέγιστη υπερετίμηση (6,67%) εμφανίστηκε στη θέση πλησιέστερα της πηγής (0,3 m).
 - Από τα 0,49 m μέχρι τα 0,73 m, η προσομοίωση υποετίμησε τα πειραματικά δεδομένα. Η μέγιστη υποετίμηση (7,38%) εμφανίστηκε στην απώτερη θέση από την πηγή (0,73 m).
- Κλάσμα mole στον άξονα έκλυσης:
 - Μέχρι την απόσταση 0,55 m από την έκλυση, η προσομοίωση υπερετίμησε τα πειραματικά δεδομένα. Η μέγιστη υπερετίμηση (19,3%) εμφανίστηκε στη θέση πλησιέστερα της πηγής (0,3 m).
 - Από τα 0,61 m μέχρι τα 0,73 m, η προσομοίωση υποετίμησε τα πειραματικά δεδομένα. Η μέγιστη υποετίμηση (6,63%) εμφανίστηκε στην απώτερη θέση από την πηγή (0,73 m).

Τα αποτελέσματα της αξονικής ταχύτητας των Cheng, Agranat and Tchouvelev (2005) ακολουθούν τη γραμμική σχέση: $u_j/u_{cl} = 0,414x/d$ η οποία σε αναλογία με τη σχέση (2) έχει τιμή για τον συντελεστή C_l ίση με 6,49, δηλαδή περίπου 30% μεγαλύτερη από αυτήν που αναφέρεται στους Houf και συν. (2009). Ομοίως, τα αποτελέσματα του κλάσματος mole στον άξονα έκλυσης ακολουθούν τη γραμμική σχέση: $1/Y_{cl} = 0,73x/d$ η οποία σε αναλογία με τη σχέση (3) έχει τιμή για τον

συντελεστή C_3 ίση με 3,68, δηλαδή περίπου 23% μικρότερη από αυτήν που αναφέρεται στους Houf και συν. (2009) .

5.3.2 Έκλυση και διασπορά H_2 σε χώρο στάθμευσης

Στα πλαίσια της δραστηριότητας InsHyde του ευρωπαϊκού προγράμματος HySafe (2003-2009), παρουσιάστηκε από τους Venetsanos και συν. (2009) μια σύγκριση μεθοδολογιών CFD σε πείραμα έκλυσης 1g/s H_2 μέσα σε κλειστό χώρο στάθμευσης (απουσία αυτοκινήτου). Η συγκέντρωση H_2 μετρήθηκε πειραματικά σε 12 σημεία μέσα στο χώρο τόσο κατά τη διάρκεια της έκλυσης (240 s) όσο μετά από αυτήν, στη φάση διασποράς H_2 στο χώρο (5160 s) (η περιγραφή του πειράματος έχει δοθεί στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου). Η συμμετοχή ήταν μεγάλη: 12 οργανισμοί με 10 διαφορετικούς κώδικες CFD και 8 διαφορετικά μοντέλα τύρβης. Η σύγκριση έγινε σε 2 στάδια. Στο πρώτο στάδιο τα αποτελέσματα των μεθοδολογιών συνεκρίθησαν μεταξύ τους χωρίς να είναι γνωστές οι πειραματικές μετρήσεις. Στο δεύτερο στάδιο, η σύγκριση έγινε μετά τη δημοσίευση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Η γενική διαπίστωση για το πρώτο στάδιο ήταν ότι τα αποτελέσματα της μέσης συγκέντρωσης διέφεραν από τα πειραματικά κατά το διπλάσιο ή υποδιπλάσιο. Η μέγιστη απόκλιση παρατηρήθηκε στις θέσεις που βρίσκονταν μακρότερα από την έκλυση και εγγύτερα στο έδαφος. Για τις θέσεις επί του άξονα της δέσμης, η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίστηκε εγγύτερα στην έκλυση. Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων μειώθηκαν στο δεύτερο στάδιο. Ωστόσο η μείωση αυτή δεν ήταν δραματική. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανέδειξε τα εξής:

- Σημαντική επίδραση του μοντέλου τύρβης:
 - Το standard k-ε υπερεκτίμησε τα πειραματικά αποτελέσματα κοντά στην πηγή και κατά τη διάρκεια της έκλυσης. Η επιλογή είτε χρήσης μικρού αριθμού Schmidt (=0,3) σε συνδυασμό με το σχήμα ανάντη διαφορών 1^{ης} τάξης είτε χρήσης του συνηθισμένου αριθμού Schmidt (=0,7) σε συνδυασμό με μικρό χρονικό βήμα και μεγαλύτερης τάξης σχήματος διακριτοποίησης βελτιώνει τα αποτελέσματα. Η δεύτερη επιλογή συνεστήθη από τους συγγραφείς.
 - Το RNG k-ε και το realizable k-ε υπερεκτίμησαν τα πειραματικά αποτελέσματα.
 - Το LVEL υποεκτίμησε τα αποτελέσματα.
 - Το SST μοντέλο προέβλεψε μικρότερες συγκεντρώσεις από το standard k-ε και πλησιέστερες στις πειραματικές κοντά στην πηγή.
 - Το LES Smagorinski είχε καλές προβλέψεις όταν η σταθερά Smagorinski έλαβε τιμή ίση με 0,12.
 - Το VLES Smagorinski με τιμή σταθερά Smagorinski ίση με 0,1 υπερεκτίμησε τις συγκεντρώσεις κοντά στην πηγή.

- Μετά το πέρας της έκλυσης H_2 και στην περίπτωση του πρώτου σταδίου (υπολογισμοί προ πειράματος) οι μεθοδολογίες παρουσίασαν 2 τάσεις, είτε σταθερή διαστρωμάτωση είτε ταχεία μετάβαση σε ομοιογενές μίγμα H_2 /αέρα μέσα στο χώρο. Το πείραμα έδειξε ότι υπήρχε στρώμα μίγματος H_2 -αέρα κοντά στην οροφή, το οποίο ήταν σχεδόν ομοιογενές στην οριζόντια κατεύθυνση αλλά ανομοιογενές στην κατακόρυφη. Το σινηικό βελτιώθηκε στο δεύτερο στάδιο (υπολογισμοί μετά το πείραμα) με την εφαρμογή μικρότερων χρονικών βημάτων, πύκνωσης του πλέγματος στην κατακόρυφη κατεύθυνση και αύξησης της τάξης του σχήματος διακριτοποίησης.
- Οι λόγοι μετακίνησης του H_2 στο κάτω μέρος του κυλίνδρου έμειναν αδιευκρίνιστοι. Κάποιοι από τους συμμετέχοντες παρατήρησαν ότι η μεταφορά λόγω συναγωγής είναι ισχυρότερη από την τυρβώδη διάχυση ακόμη και σε χρονικές στιγμές κατά πολύ μεταγενέστερες από το πέρας της έκλυσης. Οι συγγραφείς υπογράμμισαν την ανάγκη διερεύνησης αυτού του φαινομένου στο μέλλον.

5.3.3 Έκλυση και διασπορά H_2 σε κλειστό κυλινδρικό δοχείο

Οι Gallego και συν. (2007) παρουσίασαν μια υπολογιστική μελέτη υποχημητικής έκλυσης και διασποράς H_2 διάρκειας 60 s σε κλειστό κυλινδρικό δοχείο. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από 12 εταιρους του HySafe (2003-2009) συνεκρίθησαν με πειραματικά δεδομένα συγκέντρωσης H_2 σε 6 σημεία μέσα στο δοχείο και σε 6 χρονικές στιγμές μετά από το πέρας της έκλυσης. Το πείραμα έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου. Χρησιμοποιήθηκαν 8 κώδικες CFD και 6 διαφορετικά μοντέλα τύρβης. Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν από το πείραμα και τις προσομοιώσεις ήταν τα εξής:

- Υπάρχει μια περιοχή έντονης συναγωγής στην οποία ο περιβάλλον αέρας συμπαρασύρεται και αναμιγνύεται με το H_2 .
- Εμφανίζεται ανακυκλοφορία της ροής λόγω της πρόσκρουσης της δέσμης στην οροφή του κυλίνδρου η οποία δημιουργεί με τη σειρά της δέσμες κοντά στα τοιχώματα αλλά και συμπαράσυρση και ανάμιξη με τον περιβάλλοντα αέρα.
- Εμφανίζεται φυσική συναγωγή λόγω της ανομοιομορφής κατανομής της πυκνότητας (λόγω της έκλυσης του H_2) και ίσως λόγω μη αδιαβατικών τοιχωμάτων. Λόγω της μεταβαλλόμενης πυκνότητας και της εμφάνισης διαστρωμάτωσης, κάποια μοντέλα προέβλεψαν κινήσεις κυματομορφής μέσα στο δοχείο.
- Η διάχυση έχει αρχικά τυρβώδη χαρακτήρα και προς το τέλος του πειράματος μοριακό.

Τα αποτελέσματα των διαφόρων CFD μεθοδολογιών σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα είχαν σημαντικές διαφορές. Γενικά, η τάση ήταν η υπερεκτίμηση των συγκεντρώσεων H_2 στις θέσεις πάνω από την πηγή και η σημαντική υποεκτίμηση

αυτών στις θέσεις κάτω απ' αυτήν ιδίως στα πρώτα χρονικά στάδια των προσομοιώσεων. Οι διαφορές αποδόθηκαν τόσο σε υπολογιστικούς λόγους (χαρακτηριστικά πλέγματος όπως ανεπαρκής πυκνωση κοντά στην πηγή, υπόθεση αδιαβατικών τοιχωμάτων, γνωστή αδυναμία του μοντέλου k-ε να προβλέπει σωστά τόσο τα φαινόμενα πρόσκρουσης της δέσμης στην οροφή όσο και την κυκλική δέσμη εν γένει) όσο και σε πειραματικούς (πιθανή ασυμμετρία της πηγής έκλυσης, ανεπαρκής πειραματική περιγραφή των οργάνων και της πειραματικής διάταξης μέσα στον κύλινδρο, απουσία μετρήσεων θερμοκρασίας τόσο στο χώρο όσο στα τοιχώματα, απουσία ελέγχου επαναληψιμότητας μετρήσεων, πιθανή μη βαθμονόμηση των ανιχνευτών που βρίσκονταν επί της δέσμης). Ως σημαντικότερο θέμα αναγνωρίστηκε η επίδραση της υπόθεσης αδιαβατικών τοιχωμάτων στην ανάμιξη συναγωγής λόγω της θέρμανσης του αερίου. Επίσης, συνειστέθη η παρακολούθηση και εξασφάλιση της διατήρησης της μάζας H_2 κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων καθώς οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι η επιλογή μεγάλου χρονικού βήματος επηρεάζει δυσμενώς τη διατήρηση της μάζας H_2 .

5.3.4 Μοντελοποίηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς H_2 σε διάταξη μικρής κλίμακας με χωρίσματα

Οι Jordan και συν. (2007) δημοσίευσαν προσομοιώσεις 7 εταιρών του HySafe (με τους CFD κώδικες ADREA-HF, CFX, FLACS, KFXK GASFLOW και FLUENT) πειραμάτων βραδείας οριζόντιας έκλυσης και διασποράς H_2 μέσα σε διάταξη μικρής κλίμακας με 4 εσωτερικά χωρίσματα και 1 άνοιγμα αερισμού. Τα πειράματα περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου. Οι υπολογισμοί ήταν γενικά σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα τόσο κατά τη φάση της έκλυσης όσο με το πέρας αυτής (φάση διάχυσης). Όλοι οι κώδικες υπερεκτίμησαν τις συγκεντρώσεις H_2 κοντά στην πηγή έκλυσης. Από τις δοκιμές ευαισθησίας που έγιναν διαπιστώθηκε ότι οι παρακάτω παράγοντες βελτιώνουν κατά μικρό ποσοστό τα αποτελέσματα:

- Αύξηση της θερμοκρασίας έκλυσης H_2 (από 0 °C έως 20 °C).
- Αύξηση του αριθμού Schmidt από 0,7 σε 1,5.
- Μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας στις στερεές επιφάνειες.

5.3.5 Έκλυση και διασπορά H_2 σε υπόγεια οδική διάβαση (underpass)

Οι Ventsanos και συν. (2010) δημοσίευσαν προσομοιώσεις 4 εταιρών του HySafe (με τους CFD κώδικες ADREA-HF, CFX, FLACS και FLUENT) σεναρίων έκλυσης και διασποράς H_2 από λεωφορείο σε υπόγεια οδική διάβαση. Τα σεναρία αφορούσαν εκλύσεις H_2 από 4 ή 1 PRD (20 kg ή 5 kg H_2) σε διάβαση (μήκους 42 m, πλάτους 15 m και ύψους 6 m) με πλήρη γεωμετρικά χαρακτηριστικά στην οροφή (φωτισμός με λεπτομερή κατασκευή στήριξης) στα οποία το H_2 κατά την έκλυσή του μπορεί να εγκλωβιστεί. Μελετήθηκε επίσης η περίπτωση έκλυσης απουσία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην οροφή της διάβασης. Τα αποτελέσματα των συμμετεχόντων, ως προς τον όγκο του αναφλέξιμου νέφους, ήταν παρόμοια στην περίπτωση χωρίς τη γεωμετρία στην οροφή. Επίσης, ο όγκος του αναφλέξιμου νέφους

ήταν γενικά μικρότερος σε σχέση με τα σενάρια παρουσία της γεωμετρίας. Στις περιπτώσεις με τη γεωμετρία αναδείχθηκαν κάποιες διαφορές στα αποτελέσματα. Οι κώδικες ADREA-HF και FLUENT προέβλεψαν μικρότερες τιμές μέγιστου του όγκου του νέφους αλλά μεγαλύτερες τιμές νέφους κατά την έναρξη και το πέρας της έκλυσης. Ο κώδικας FLACS προέβλεψε μεγαλύτερες τιμές μέγιστου του όγκου του νέφους αλλά μηδαμινές τιμές μετά το πέρας της έκλυσης. Αυτό αποδόθηκε στην εμφάνιση μεγαλύτερης τύρβης κατάντη των εμποδίων της γεωμετρίας. Το μέγιστο του νέφους με τον κώδικα CFX δεν επηρεάστηκε από την παρουσία της γεωμετρίας. Ωστόσο με το πέρας της έκλυσης το νέφος είχε παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν των υπολογισμών με τους κώδικες ADREA-HF και FLUENT.

5.3.6 Έκλυση και διασπορά He σε χώρο στάθμευσης με φυσικό αερισμό

Οι Barley and Gawlik (2009) δημοσίευσαν πειράματα και προσομοιώσεις έκλυσης He (αντί H₂) σε χώρο στάθμευσης (απουσία αυτοκινήτου) με φυσικό αερισμό. Περιγραφή των πειραμάτων έχει γίνει στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου. Οι υπολογισμοί CFD έγιναν με τον κώδικα FLUENT με την υπόθεση στρωτής ροής. Το υπολογιστικό χωρίο επεκτάθηκε εκτός των φυσικών ορίων του χώρου ενώ έγινε παράλληλα η υπόθεση συμμετρίας. Οι διαφορές στις συγκεντρώσεις He δεν ξεπέρασαν τα 0,05%. Επίσης, έγινε προσομοίωση με H₂ και συνεκρίθησαν τα αποτελέσματα με αυτά του He. Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι η μέγιστη διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων H₂ και He εμφανίστηκε κοντά στην οροφή η οποία όμως δεν ξεπέρασε τα 0,2%.

5.3.7 Έκλυση H₂ από τη δεξαμενή τροφοδοσίας αυτοκινήτου

Οι Liu and Schreiber (2008) μελέτησαν υπολογιστικά την έκλυση H₂ (ταχύτητας 10 m/s) από τη δεξαμενή τροφοδοσίας και τη διασπορά του μέσα σε αυτοκίνητο τύπου 2004 PT Cruiser sedan παρουσία 2 ομοιωμάτων επιβατών χρησιμοποιώντας τον κώδικα FLUENT και το k-ε μοντέλο. Στόχος ήταν η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του αερισμού στην απομάκρυνση του H₂ από το αυτοκίνητο. Βρέθηκε ότι πάνω από 60% του όγκου του αυτοκινήτου περιείχε H₂ με συγκέντρωση μεγαλύτερη του 4% ωστόσο η μέση συγκέντρωση H₂ ήταν 4,6%. Η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρήθηκε κοντά στην πηγή και κοντά στο πίσω παράθυρο του αυτοκινήτου λόγω της διάταξης του αερισμού.

5.3.8 Έκλυση και διασπορά H₂ σε χώρο με φυσικό αερισμό

Οι Matsuura και συν. (2008) δημοσίευσαν προσομοιώσεις του πειράματος έκλυσης H₂ (παροχής $9,44 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$) των Swain και συν. (1998). Ο χώρος είχε 2 ανοίγματα αερισμού, ένα στην οροφή (V1) και ένα κοντά στο έδαφος σε παράπλευρο τοίχο (V2). Μελετήθηκε η επίδραση της θέσης των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού και των οριακών συνθηκών τους (συνθήκη πίεσης) στην συσσώρευση του H₂ μέσα στο χώρο. Χρησιμοποιήθηκαν 2 υπολογιστικά χωρία, το ένα με διαστάσεις ίσες με τα φυσικά όρια του χώρου ενώ στο άλλο το χωρίο επεκτάθηκε και στις 3 διαστάσεις επί 3 φορές των αντίστοιχων διαστάσεων του χώρου. Χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας CFD-ACE ενώ η τύρβη μοντελοποιήθηκε με το k-ε μοντέλο. Απεδείχθη ότι η μετατόπιση του ανοίγματος V2 καθ' ύψος προκάλεσε σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων στο

χώρο (έως και 100% κοντά στο έδαφος). Επίσης, η μείωση της πίεσης από 0,5-3,0 Pa στα ανοίγματα αερισμού (ιδιαίτερος στο άνοιγμα κοντά στο έδαφος) επέδρασε σημαντικά στις συγκεντρώσεις He μέσα στο χώρο. Μείωση της πίεσης κατά 0,5 Pa στο κάτω άνοιγμα αύξησε σημαντικά τις συγκεντρώσεις μέσα στο χώρο και εξίσου με μείωση της πίεσης κατά 3,0 Pa στο πάνω άνοιγμα. Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της έντασης και κατεύθυνσης του εξωτερικού ανέμου στην κατανομή των συγκεντρώσεων μέσα στο χώρο. Ευεργετική επίδραση είχε ο άνεμος με κατεύθυνση ανάντη των ανοιγμάτων. Το αντίθετο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε στην περίπτωση ανέμου κατάντη αλλά και με κατεύθυνση παράλληλη ως προς τα ανοίγματα.

5.3.9 Έκλυση και διασπορά He σε χώρο μικρής κλίμακας

Μελετήθηκαν υπολογιστικά από τους Prasad και συν. (2009) πειράματα έκλυσης He αντί H₂ (για θέματα ασφαλείας) σε χώρο διαστάσεων ¼ τυπικού διθέσιου χώρου στάθμευσης προκειμένου να αξιολογηθεί ο κώδικας NIST FDS με το μοντέλο LES. Τα πειράματα περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου. Μελετήθηκαν 2 εκλύσεις He, παροχής 14,95 l/min και 3,74 l/min επί 1 h και 4 h αντίστοιχα. Η έκλυση βρισκόταν είτε κοντά στο έδαφος, στη μέση ή κοντά σε έναν τοίχο, είτε κοντά στην οροφή και στο κέντρο. Το είδος της ροής ήταν στρωτή. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) παρουσιάζονται οι συνθήκες των πειραμάτων.

Πίνακας 2: Συνθήκες πειραμάτων

Περίπτωση	Παροχή (l/min) και διάρκεια (h) έκλυσης	Θέση έκλυσης	Ανοίγματα φυσικού αερισμού
1	14,95, 1	Κέντρο (0,0, 0,75, 0,21)	1 άνοιγμα (5,43 cm ²) στο κέντρο
2	14,95, 1	Γωνία (0,0, 1,48, 0,21)	1 άνοιγμα (5,43 cm ²) στο κέντρο
3	14,95, 1	Κέντρο (0,0, 0,75, 0,21)	2 ανοίγματα (4,62 cm ²) κοντά στην οροφή και το δάπεδο
4	3,74, 4	Κέντρο (0,0, 0,75, 0,72)	1 άνοιγμα (5,43 cm ²) στο κέντρο

Παρατηρήθηκαν πειραματικά τα παρακάτω φαινόμενα για την περίπτωση 1:

- Το He κινήθηκε προς την οροφή και μετά αναπτύχθηκε οριζοντίως με παράλληλη έξοδο του από το άνοιγμα αερισμού.
- Μετά από 1.800 s από την έναρξη της έκλυσης εμφανίστηκε έντονη διαστρωμάτωση. Το μίγμα He/αέρα είχε τη μεγαλύτερη συγκέντρωση κοντά στην οροφή και πολύ μικρή κοντά στο έδαφος. Η συγκέντρωση εμφάνισε πολύ μικρές διαφοροποιήσεις κατά την οριζόντια κατεύθυνση.
- Οι ταχύτητες μακριά από την έκλυση και το άνοιγμα ήταν πολύ μικρές.

Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

- Μετά από 3.600 s από την έναρξη της έκλυσης σημαντική ποσότητα He εμφανίστηκε κοντά στο έδαφος.
- Η παροχή ειροής στο άνοιγμα ήταν αρχικά μεγάλη καθώς εξέρρεε κυρίως αέρας, ωστόσο κατά τη διάρκεια της έκλυσης η πυκνότητα ειροής μειωνόταν. Τη στιγμή λήξης της έκλυσης, παρατηρήθηκε απότομη μεταβολή της παροχής ειροής. Έπειτα, παρατηρήθηκαν έντονες διακυμάνσεις στην παροχή ειροής αφού από το ίδιο άνοιγμα εξέρρεε μίγμα He/αέρα και εισέρρεε καθαρός αέρας.
- Μετά από 5.400 s από την έναρξη της έκλυσης η πυκνότητα στο χώρο ήταν ομοιόμορφη.

Τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων της προσομοίωσης της περίπτωσης 1 υποεκτίμησαν τα πειραματικά με μέση διαφορά τιμών λιγότερη από 3,3%. Για την περίπτωση 2 η διαφορά ήταν 2,2% (υποεκτίμηση), για την περίπτωση 3 ήταν 4,6% (υποεκτίμηση) και τέλος για την περίπτωση 4 τα αποτελέσματα εμφάνισαν μικρή υπερεκτίμηση της τάξεως του 1%.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση διαφόρων παραγόντων στα αποτελέσματα συγκέντρωσης He της περίπτωσης 1. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τους παράγοντες και την επίδραση που αυτοί είχαν στα αποτελέσματα συγκεντρώσεων He στον ανιχνευτή κοντά στο έδαφος (S1) και κοντά στην οροφή του χώρου (S7).

Πίνακας 3: Μελέτη ευαισθησίας στα αποτελέσματα συγκέντρωσης της περίπτωσης 1

Παράγοντας	Επίδραση
10% αύξηση της παροχής έκλυσης μάζας (αύξηση ταχύτητας έκλυσης)	Αύξηση συγκέντρωσης κατά 7,4% και στους 2 ανιχνευτές
Μείωση κατά 25% της διαμέτρου έκλυσης (αύξηση ταχύτητας έκλυσης)	Αύξηση συγκέντρωσης κατά 2,5% και στους 2 ανιχνευτές
Αύξηση αριθμού Schmidt από 0,3 σε 0,5	Αύξηση συγκέντρωσης κατά 2,3% στον S7, μικρή μείωση συγκέντρωσης κατά την έκλυση στον S1
Μείωση σταθεράς Smagorinsky από 0,2 σε 0,12	Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης αυξήθηκε κατά 10-12% και στους 2 ανιχνευτές
Μείωση υπολογιστικού χωρίου στα φυσικό όρια της διάταξης (επιβολή οριακών συνθηκών στο άνοιγμα «ελεύθερης διάβασης»)	Μείωση συγκέντρωσης κατά 2% και στους 2 ανιχνευτές
Μείωση ανοίγματος αερισμού κατά 33%	Μικρή επίδραση στη φάση διασποράς
Προσομοίωση με H ₂ αντί He με ίδια ογκομετρική παροχή έκλυσης	Πολύ μικρή επίδραση

5.3.10 Μεθοδολογία μετριάσμου του κινδύνου διασποράς H_2 σε κλειστό χώρο με τη χρήση ανιχνευτών συγκέντρωσης

Οι Matsuura και συν. (2009) πρότειναν μια μέθοδο για τον μετριάσμο του κινδύνου που μπορεί να προκαλέσει η έκλυση και διασπορά H_2 σε κλειστό χώρο με τη χρήση 15 ανιχνευτών συγκέντρωσης και προσαρμοζόμενου στις ενδείξεις των οργάνων ανίχνευσης φυσικού αερισμού. Αρχικά παρουσίασαν τα αριθμητικά αποτελέσματα με τον κώδικα FDS του πειράματος των Swain και συν. (1998) με 2 υπολογιστικά πλέγματα. Καθώς το πυκνότερο πλέγμα προέβλεψε καλύτερα τα πειραματικά το χρησιμοποίησαν για την ανάλυση. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεντρώσεις στους ανιχνευτές παρουσίασαν σημαντικές διακυμάνσεις, φαινόμενο το οποίο εμφανίστηκε και σε μερικούς από τους υπολογισμούς που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης με φυσικό αερισμό. Το υπολογιστικό χωρίο επεκτάθηκε περίπου κατά 20% των αντίστοιχων διαστάσεων του χώρου μόνο κατά την x και z κατεύθυνση. Οι Matsuura και συν. (2009) συνέκριναν τις συγκεντρώσεις H_2 μέσα στο χώρο για διάφορες γεωμετρίες ανοιγμάτων φυσικού αερισμού στην οροφή του χώρου. Απόδειξαν ότι ανοίγματα κοντά στις γωνίες της οροφής προκαλούν σταθερή εκροή του H_2 , ωστόσο η ταχύτητα αερισμού είναι μικρή. Ανοίγματα κοντά στην περιοχή πρόσκρουσης του H_2 με την οροφή προκαλούν σταθερή εκροή H_2 αλλά και πάλι η αραιώση του H_2 στο χώρο εντοπίζεται κοντά στην οροφή με αποτέλεσμα η αποτελεσματικότητα του αερισμού να είναι μικρή. Τέλος, όταν υπάρχουν πολλά ανοίγματα αερισμού στην οροφή, το H_2 εκρέει άμεσα, ωστόσο υπάρχει η πιθανότητα να εισέλθει φρέσκος αέρας από κάποια από τα ανοίγματα και να εμφανιστεί αρνητική διαστρωμάτωση. Οι Matsuura και συν. (2009) πρότειναν την επιλεκτική χρήση κάποιων από τα ανοίγματα αερισμού της οροφής ανάλογα με τις μετρήσεις συγκέντρωσης H_2 στο χώρο. Θεώρησαν μια συγκέντρωση κατωφλίου (0,5%) για την ενεργοποίηση του εκάστοτε ανοιγματος αερισμού. Οι συγγραφείς πρότειναν ως την αποτελεσματικότερη διάταξη αερισμού, την ενεργοποίηση των ανοιγμάτων της οροφής που βρίσκονται κοντά στην πηγή έκλυσης ως προς την οριζόντια κατεύθυνση.

5.3.11 Εκτίμηση της κατανομής H_2 σε χώρους στάθμευσης από εκλύσεις λόγω διαπερατότητάς του από τα δοχεία αποθήκευσης αυτοκινήτων και λεωφορείων

Οι Venetsanos και συν. (2010) μελέτησαν την χρονική και χωρική κατανομή έκλυσης H_2 λόγω διαπερατότητας από τα συστήματα αποθήκευσής του σε αυτοκίνητα και λεωφορεία που βρίσκονται μέσα σε χώρους στάθμευσης. Η έκλυση λόγω διαπερατότητας είναι βραδεία και μεγάλης διάρκειας. Ο κύριος στόχος ήταν ο χαρακτηρισμός της κατανομής του H_2 στο χώρο στάθμευσης σε τέτοιου είδους σενάρια (ομοιογενής ή εμφάνιση διαστρωμάτωσης). Τα σενάρια που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4). Η έκλυση των 1,087 NL/min επελέγη βάσει των προδιαγραφών SAE για δοχεία αποθήκευσης H_2 με μη μεταλλικό περιβλημα (τύπος 4) στο τέλος του κύκλου ζωής τους ή σε συνθήκες μέγιστης θερμοκρασίας. Ο αερισμός των 0,03 ACH επελέγη ως βάσιμος ελάχιστος αερισμός χώρου στάθμευσης.

Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

Πίνακας 4: Περίληψη συνθηκών μελετηθέντων σεναρίων

Σενάριο	Διαστάσεις χώρου (όγκος, m ³)	Αέριο	Ογκομετρική παροχή έκλυσης (NL/min)	Διάμετρος έκλυσης (m)	Ταχύτητα έκλυσης (mm/s)	Αερισμός (ACH)
Bus-1	16x6,55x6,0 (681,2)	H ₂	1,087	0,15	1,07	0,001
Bus-1	16x6,55x6,0 (681,2)	H ₂	1,087	0,15	1,07	0,03
CEA-1	5,76x2,96x2,4 (40,92)	He	1,0	0,07	4,33	0,01
CEA-2	5,76x2,96x2,4 (40,92)	He	0,03	0,07	0,13	0,01

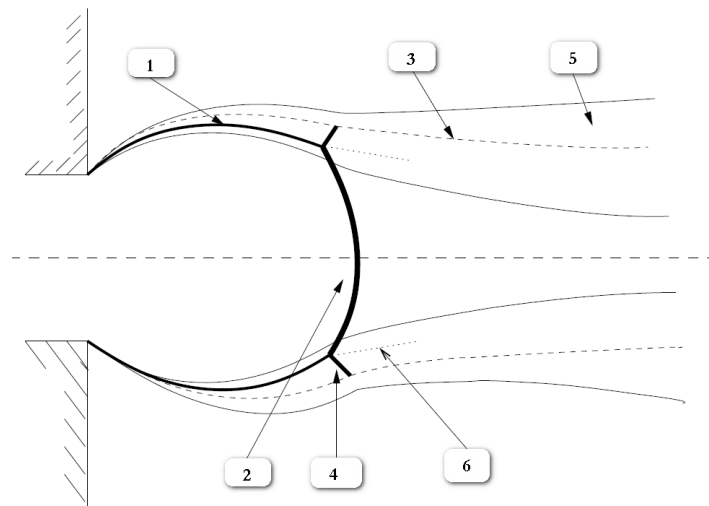
Τα 2 πρώτα σενάρια μελετήθηκαν αριθμητικά από 2 απλοποιημένα μοντέλα, ομοιογενούς κατανομής (homogeneous, Lees, 1996) και 2 στρωμάτων (two layer, Lowesmith και συν., 2007) και υπολογιστικά με τον κώδικα ADREA-HF και το μοντέλο k-ε. Τα 2 τελευταία σενάρια μελετήθηκαν πειραματικά (Cariteau και συν., 2010) και υπολογιστικά με τον κώδικα ADREA-HF. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατανομή του H₂ ή He των σεναρίων Bus-1, CEA-1 και CEA-2 είναι ομοιογενής ενώ στο σενάριο Bus-2 εμφανίστηκε διαστρωμάτωση. Η διαστρωμάτωση αποδόθηκε κυρίως στον αυξημένο βαθμό αερισμού. Ωστόσο, η αύξηση του αερισμού λειτουργεί διττά: αύξηση διαστρωμάτωσης από τη μια πλευρά (με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης H₂ στα στρώματα κοντά στην οροφή) και από την άλλη μείωση της συνολικής συγκέντρωσης H₂ λόγω της αυξημένης απομάκρυνσής του από τα ανοίγματα αερισμού. Οι CFD υπολογισμοί ήταν σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στα σενάρια με εμφάνιση διαστρωμάτωσης, τα αποτελέσματα με το μοντέλο 2 στρωμάτων ήταν έως 0,5% μικρότερα από αυτά με τον κώδικα ADREA-HF.

Οι Saffers και συν. (2010) μελέτησαν υπολογιστικά παρόμοια σενάρια διαπερατότητας H₂ (1,0 NmL/hr L) σε χώρο στάθμευσης απουσία αερισμού. Βρήκαν ότι η διαφορά συγκέντρωσης H₂ μεταξύ της οροφής και του δαπέδου του χώρου ήταν αμελητέα. Εναντιθέσει με την μοντελοποίηση της έκλυσης με τον κώδικα ADREA-HF ως πηγή πεπερασμένης διαμέτρου, οι Saffers και συν. (2010) μοντελοποίησαν την έκλυση σε όλη την επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.

Τέλος, οι Adams και συν. (2010) παρουσίασαν μια μεθοδολογία για την εκτίμηση του επιτρεπόμενου ορίου διαπερατότητας των δοχείων αποθήκευσης H₂ αυτοκινήτων και λεωφορείων υποθέτοντας ως μικρότερο πιθανό φυσικό αερισμό στο χώρο στάθμευσης τα 0,03 ACH. Ως επιτρεπόμενο όριο συγκέντρωσης H₂ στο χώρο θεωρήθηκε το 25% του LFL (1% H₂ κατ' όγκο) και ως μέγιστη διαρκής θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης τα 55 °C. Η μεθοδολογία βασίστηκε στην υπόθεση ότι το H₂ μετά τη διάχυση μέσω των στερεών επιφανειών του δοχείου, κατανέμεται στον κλειστό χώρο στάθμευσης ομοιογενώς. Ως επιτρεπόμενα όρια ρυθμού διαπερατότητας H₂ προτάθηκαν τα: α) 6,0 mL/hr/water capacity για καινούργιο δοχείο σε θερμοκρασία 15 °C, β) 8,0 mL/hr/water capacity για καινούργιο δοχείο σε θερμοκρασία 20 °C και γ) 90,0 mL/hr/std passenger vehicle για δοχείο στο τέλος του κύκλου ζωής του και σε θερμοκρασία 55 °C.

5.4 Μοντελοποίηση έκλυσης ρευστού σε συνθήκες υψηλής πίεσης

Οι ιδιότητες της δέσμης που προκύπτει κατά την έκλυση ρευστού σε συνθήκες υψηλής πίεσης, εξαρτώνται από τη θέση και το μέγεθος της διαρροής, τις συνθήκες έκλυσης όπως πίεση και θερμοκρασία και τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού όπως ηχητική ταχύτητα, ειδική θερμότητα και μοριακό βάρος (Tchouvelev, 2008). Οι δέσμες υψηλής πίεσης επηρεάζονται επίσης από την παρουσία εμποδίων στον άμεσα περιβάλλοντα χώρο. Η δέσμη εξέρχεται του ακροφυσίου ή της ρωγμής υπό πίεση σημαντικά μεγαλύτερης της ατμοσφαιρικής. Η αρχική διάταξη της δέσμης αποτελείται από πλάγια και κάθετα κρουστικά κύματα, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από το λόγο πιέσεων μεταξύ του ρευστού και του περιβάλλοντος. Τα κύματα είναι το αποτέλεσμα της εκτόνωσης του αερίου κατά την έξοδό του στο περιβάλλον. Το πρώτο κύμα είναι κάθετο και συνήθως καλείται δίσκος Mach (βλέπε Σχήμα 1). Το αρχικό στάδιο της ανάπτυξης της δέσμης χαρακτηρίζεται από ασθενή και πεπερασμένη παράσυρση του περιβάλλοντος αέρα. Ωστόσο, είναι συνήθης η υπόθεση άτριβης ροής σ' αυτήν την περιοχή και ως εκ τούτου η παράσυρση στη δέσμη λόγω διάχυσης δεν λαμβάνεται υπ' όψιν. Κατά τους Ivings και συν. (2008) αυτή η υπόθεση δεν επηρεάζει σημαντικά την κατάντη ανάπτυξη της δέσμης.



Σχήμα 1: Διάταξη περιοχής πλησίον ακροφυσίου υποεκτονώμενης δέσμης υψηλής πίεσης με λόγο πιέσεων δέσμης προς περιβάλλοντος αέρα >10 : 1. Κρουστικό όριο, 2. Δίσκος Mach, 3. Ισοβαρής γραμμής διατμητικής ζώνης, 4. Κύμα ανάκλασης, 5. Διατμητική ζώνη, 6. Ζώνη ανάμειξης δίσκου Mach (Lehnasch, 2005)

Μετά το δίσκο Mach, η δέσμη ισορροπεί σε ηχητικό ρεύμα το οποίο υφίσταται μετάβαση στην καλούμενη πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή (fully developed flow). Στην περιοχή αυτή η ακτινική μεταβολή της ταχύτητας και της συγκέντρωσης του ρευστού ακολουθεί κατά προσέγγιση κανονική κατανομή (Gaussian). Το σημείο όπου η δέσμη ισορροπεί σε ηχητικό ρεύμα καλείται ηχητικό σημείο και είναι κατά προσέγγιση διπλάσιο της απόστασης μεταξύ της εξόδου (σημείο έκλυσης) και του δίσκου Mach.

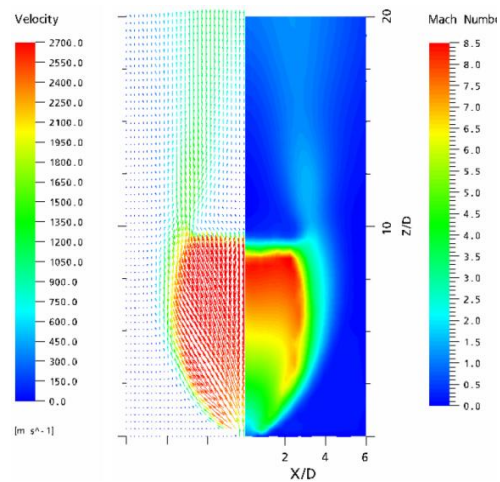
Οι μέθοδοι για την μοντελοποίηση έκλυσης ρευστού υψηλής πίεσης ποικίλλουν. Κατά τους Ivings και συν. (2008) υπάρχουν 5 μεθοδολογίες:

1. Επίλυση της περιοχής πλησίον της έκλυσης όπου εμφανίζονται τα πλάγια και κάθετα κύματα (jet shock structure).
2. Σημειακή ηχητική πηγή.
3. Σημειακή υποηχητική πηγή.
4. Ηχητική πηγή.
5. Υποηχητική πηγή.

5.4.1 Μοντελοποίηση της περιοχής πλησίον της έκλυσης

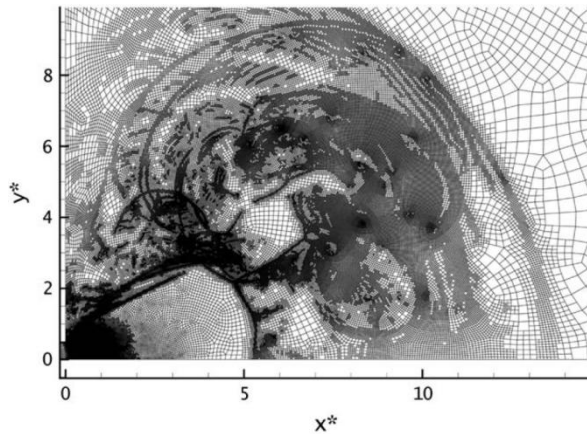
Η επίλυση της περιοχής πλησίον της έκλυσης και της δομής των κυμάτων απαιτεί πολύ πυκνό υπολογιστικό πλέγμα. Σε συνδυασμό με την απαίτηση πολύ μικρών χρονικών βημάτων, η προσομοίωση τέτοιων φαινομένων είναι χρονοβόρα. Γι' αυτό το λόγο είναι συνήθης πρακτική η παράληψη επίλυσης αυτής της περιοχής και η χρήση κάποιας εκ των υπολοίπων μεθόδων. Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται ένα παράδειγμα υπολογιστικής επίλυσης της περιοχής πλησίον της έκλυσης. Στο σχήμα φαίνεται το πεδίο ροής και η κατανομή του αριθμού Mach όπως υπολογίστηκε από τους Xu και συν. (2005). Μελετήθηκε η έκλυση κυκλικής δέσμης H_2 σε πίεση 20 MPa και θερμοκρασία 300 K από ακροφύσιο διαμέτρου 0.01 m. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας CFX ενώ η τύρβη μοντελοποιήθηκε με το μοντέλο SST.

Στους συγκεκριμένους υπολογισμούς, έγινε η υπόθεση άξονο-συμμετρικής ροής και ελήφθη ως υπολογιστικό χωρίο τεμάχιο 45° μοιρών με πλήθος κελιών 200.000. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές συνθήκες για τον υπολογισμό της διασποράς της δέσμης H_2 , η οποία έχει αποκτήσει πλέον ατμοσφαιρική πίεση. Για τη διασπορά της δέσμης χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας KIVA με τη μέθοδο προσομοίωσης μεγάλων δινών (LES). Τα αποτελέσματα της πρώτης προσομοίωσης, έδειξαν ότι υπάρχει συμπαρασύρση αέρα αμέσως μετά τα κύματα και ως εκ τούτου η προσέγγιση μιας δέσμης μέσω της φαινόμενης πηγής (βλέπε παράγραφο 5.4.4) μπορεί να περιέχει σφάλματα στους υπολογισμούς.



Σχήμα 2: Αριστερά: πεδίο ροής, Δεξιά: κατανομή αριθμού Mach (Xu και συν., 2005)

Οι Réneau και συν. (2009), μελέτησαν υπολογιστικά την αρχική φάση εξέλιξης υπερηχητικής ροής δέσμης H_2 με έμφαση στην ανάπτυξη του μετωπικού (πρωραίου) κρουστικού κύματος (bow shock) και της δομής της δέσμης ανάντη αυτού χρησιμοποιώντας μη δομημένο πλέγμα με δυναμική προσαρμογή βάσει της βαθμίδας πίεσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3: Μη δομημένο πλέγμα με δυναμική προσαρμογή βάσει βαθμίδας πίεσης (Réneau και συν., 2009)

5.4.2 Σημειακή ηχητική πηγή

Η υπόθεση της σημειακής ηχητικής πηγής είναι ίσως η πιο απλή μέθοδος μοντελοποίησης εκλύσεων αερίων σε συνθήκες υψηλής πίεσης. Η πηγή μοντελοποιείται από το σημείο που είναι ηχητική και ορίζεται απλά ο ρυθμός έκλυσης μάζας και η κατεύθυνση της ροής. Η επιφάνεια του υπολογιστικού κελιού στο οποίο εισάγεται η πηγή (το οποίο βρίσκεται στο σημείο της έκλυσης) δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτήν της δέσμης στο ηχητικό σημείο προκειμένου να μοντελοποιηθεί σωστά ο ρυθμός ορμής.

5.4.3 Σημειακή υποηχητική πηγή

Είναι επίσης δυνατή η μοντελοποίηση της πηγής σε σημείο επέκεινα του ηχητικού, όπου η ροή είναι υποηχητική, εισάγοντας συνθήκες έκλυσης σε ένα μόνο υπολογιστικό κελί. Σ' αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ο συμπαρασυρόμενος περιβάλλον αέρας στη δέσμη στο συγκεκριμένο σημείο. Το υπολογιστικό κελί στο οποίο εισάγεται η πηγή πρέπει επιπλέον να είναι μεγαλύτερο από την πραγματική επιφάνεια έκλυσης προκειμένου να ληφθεί υπ' όψιν η έκταση της δέσμης σε αυτό το σημείο.

5.4.4 Ηχητική πηγή

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προσέγγισης της έκλυσης υποεκτονώμενης δέσμης ως ηχητική πηγή. Κοινό σημείο όλων των μεθόδων είναι η υπόθεση ότι η φαινόμενη πηγή (ψευδο-πηγή) είναι ηχητική η δε πίεση της δέσμης ατμοσφαιρική. Συνήθως η επιφάνεια της ψευδο-πηγής επιλύεται με παραπάνω από ένα κελιά.

Οι Birch και συν. (1984) πρότειναν μια μεθοδολογία για την εκτίμηση του ρυθμού μείωσης του πεδίου της μέσης συγκέντρωσης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας μιας υπερκρίσιμης δέσμης. Η μέση ογκομετρική συγκέντρωση είναι ανάλογη της διαμέτρου της πηγής έκλυσης και αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας του ρευστού. Απέδειξαν ότι το πεδίο συγκέντρωσης συμπεριφέρεται σαν να είχε δημιουργηθεί από πηγή μεγαλύτερης διαμέτρου από την πραγματική, την οποία απεικάλισαν ψευδο-διάμετρο.

Αργότερα, οι Birch και συν. (1987) ανασκεύασαν τον ορισμό της ψευδο-διαμέτρου και χρησιμοποίησαν για τον υπολογισμό της εκτός από την αρχή διατήρησης της μάζας και την αρχή διατήρησης της ορμής. Σε μία νεότερη μελέτη των Houf και συν. (2007) και Schefer και συν. (2007) η μέθοδος Birch και συν. (1987) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του ρυθμού μείωσης του πεδίου συγκέντρωσης δέσμης H₂. Η ταχύτητα μετά την εκτόνωση του H₂ (θέση 3, Σχήμα 4) υπολογίστηκε με βάση τη μελέτη των Hess και συν. (1973). Παρακάτω αναφέρονται οι διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό της ψευδο-διαμέτρου.

5.4.4.1 Birch 1984

Οι Birch και συν. (1984) μελέτησαν πειραματικά το πεδίο συγκέντρωσης συμπιεστής ηχητικής ροής μεθανίου σε πιέσεις από 2 έως 70 bar και αιθυλενίου σε 8 bar με τη χρήση ταχέως χρωματογράφου. Σ' αυτές τις πιέσεις το αέριο εκτονώνεται κατάντη του ακροφυσίου ούτως ώστε να βρεθεί σε ισορροπία με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Απεδείχθη ότι ο ρυθμός μείωσης της συγκέντρωσης υποεκτονωμένων δεσμών (underexpanded jets) στην περιοχή ομοιότητας μπορεί να περιγραφεί με τη χρήση εξισώσεων υποκρίσιμων εκλύσεων εφόσον η διάμετρος της πραγματικής πηγής έκλυσης αντικατασταθεί με αυτήν μιας φαινόμενης πηγής (καλούμενη ως ψευδο-διάμετρος). Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν αυτήν την προσέγγιση. Ακολουθεί η θεωρητική ανάλυση για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους.

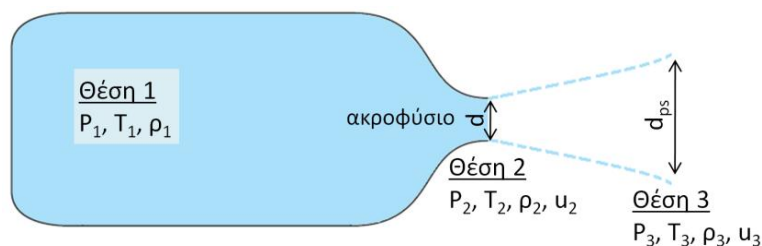
Για μονοδιάστατη συμπιεστή ροή, η διατήρηση μάζας στην περιοχή εκτόνωσης έχει τη μορφή:

$$\dot{m} = C_d \rho_2 u_2 A_2 = \rho_3 u_3 A_3 \quad (5)$$

όπου C_d είναι ο συντελεστής παροχής, σχετικός με την ανομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας στη θέση 2 (συντελεστής παροχής στη θέση 3 δεν χρησιμοποιήθηκε λόγω της υπόθεσης ομοιόμορφης κατανομής της ταχύτητας μετά το δίσκο Mach).

Από την εξίσωση (5) λαμβάνεται ο λόγος των τετραγώνων των διαμέτρων στις θέσεις 2 και 3 (βλέπε Σχήμα 4):

$$\frac{d_{ps}^2}{d^2} = \frac{C_d \rho_2 u_2}{\rho_3 u_3} \quad (6)$$



Σχήμα 4: Αναπαράσταση έκλυσης υπερκρίσιμου αερίου (Θέση 1: συνθήκες στην δεξαμενή αποθήκευσης - συνθήκες ηρεμίας - ανάντη έκλυσης, Θέση 2: συνθήκες ακροφυσίου, Θέση 3:

Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

συνθήκες μετά τη θεωρητική περιοχή εκτόνωσης του αερίου όπου επικρατούν συνθήκες περιβάλλοντος)

Υποθέτοντας ισεντροπική μεταβολή μεταξύ της θέσης 2 και 1 ($T_2 = T_1 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)$ και $P_2 = P_1 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/\gamma-1}$) τελείου αερίου ($\rho = \frac{PMW}{RT}$), υπολογίζεται η πυκνότητα ρ_2 ως:

$$\rho_2 = \frac{P_1 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{1/\gamma-1} MW}{RT_1} \quad (7)$$

όπου MW είναι το μοριακό βάρος του αερίου και R η παγκόσμια σταθερά αερίων.

Η ηχητική ταχύτητα u_2 στην θέση 2, είναι ανάλογη του τετραγώνου της τοπικής θερμοκρασίας T_2 και κατ' επέκτασιν ανάλογη της θερμοκρασίας ηρεμίας T_1 :

$$u_2 = \sqrt{\frac{\gamma RT_2}{MW}} = \sqrt{\frac{\gamma RT_1 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)}{MW}} \quad (8)$$

Ομοίως, για την θέση 3, υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή ηχητικής ταχύτητας έχουμε $u_3 = \sqrt{\frac{\gamma RT_3}{MW}}$ και $\rho_3 = \frac{P_3 MW}{RT_3}$.

Ο λόγος των τετραγώνων των διαμέτρων στις θέσεις 2 και 3 παίρνει την μορφή:

$$\frac{d_{ps}^2}{d^2} = C_d \frac{P_1}{P_3} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma+1/2(\gamma-1)} \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} \quad (9)$$

Με την υπόθεση ότι η θερμοκρασία του αερίου στη θέση 3 είναι ίση με την ατμοσφαιρική και ως εκ τούτου ίση με την θερμοκρασία στις συνθήκες ηρεμίας (κατάσταση ανακοπής της ροής) δηλαδή $T_3=T_1$, η εξίσωση (9) παίρνει τη μορφή:

$$\frac{d_{ps}^2}{d^2} = C_d \frac{P_1}{P_3} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma+1/2(\gamma-1)} \quad (10)$$

Ο ρυθμός μείωσης της μέσης ογκομετρικής συγκέντρωσης (ή κλάσματος mole) \bar{n} κατά μήκος του άξονα συμμετρίας εκφράζεται από την παρακάτω σχέση η οποία χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τυρβώδη κυκλική ελεύθερη δέσμη με ισχυρή ορμή (momentum dominated) σε υποκρισιμες συνθήκες:

$$\bar{n} = \frac{K d_{ps}}{x + x_0} \sqrt{\rho_a / \rho_g} \quad (11)$$

Όπου K είναι η αξονική σταθερά μείωσης ίση με 4,9 για τα υπό μελέτη αέρια, x είναι η θέση κατά μήκος του άξονα της δέσμης, x_0 είναι η νοητή μετατόπιση της αφετηρίας της δέσμης (θέση ψευδο-διαμέτρου) και ρ_a η πυκνότητα του αέρα. Ο όρος

x_0 συνήθως παραλείπεται καθώς $x \gg x_0$. Η απόσταση x_0 μπορεί να προσεγγιστεί με τιμή ίση με 10% της τιμής της ψευδο-διαμέτρου.

5.4.4.2 Birch 1987

Στην προγενέστερη μελέτη των Birch και συν. (1984) το φαινόμενο μέγεθος της πηγής έκλυσης (ψευδο-διάμετρος) υπολογίστηκε υποθέτοντας διατήρηση της μάζας στην περιοχή εκτόνωσης και ομοιόμορφη κατανομή ηχητικής ταχύτητας. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου η κατάντη της έκλυσης ορμή είναι σημαντική, ο υπολογισμός της ψευδο-διαμέτρου του 1984 μπορεί να μην είναι επαρκής. Στην μελέτη των Birch και συν. (1987), προτάθηκε ένας νέος ορισμός της ψευδο-διαμέτρου βάσει της αρχής διατήρησης όχι μόνο της μάζας αλλά και της ορμής στον όγκο ελέγχου εκτόνωσης του υπερκρίσιμου αερίου. Μελετήθηκαν πειραματικά υποκρίσιμες και υπερκρίσιμες (2 έως 75 bar) εκλύσεις αέρα.

Αρχή διατήρησης της ορμής μεταξύ της θέσης 2 και 3 (Σχήμα 4) με συντελεστή ορμής C_d^2 :

$$\rho_3 u_3^2 A_3 = C_d^2 \rho_2 u_2^2 A_2 + A_2 (P_2 - P_3) \quad (12)$$

Από την σχέση (12) η επιφάνεια στη θέση 3 υπολογίζεται ως:

$$A_3 = \frac{C_d^2 A_2 \rho_2 u_2^2 + A_2 (P_2 - P_3)}{\rho_3 u_3^2} \quad (13)$$

Από τις σχέσεις (5) και (12) η ταχύτητα στη θέση 3 υπολογίζεται ως:

$$u_3 = u_2 \left(C_d + \frac{P_2 - P_3}{\rho_2 u_2^2 C_d} \right) \quad (14)$$

Από τις σχέσεις (13) και (5) η επιφάνεια στη θέση 3 υπολογίζεται ως:

$$A_3 = \frac{C_d^2 \rho_2^2 A_2 u_2^2}{\rho_3 [C_d^2 u_2^2 \rho_2 + (P_2 - P_3)]} \quad (15)$$

Η σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (7) και (8) μετατρέπεται στην:

$$u_3 = u_2 \left[C_d + \frac{1 - \frac{P_3}{P_1} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{-\gamma/\gamma-1}}{\gamma C_d} \right] \quad (16)$$

Βάσει των σχέσεων (5) και (7) και υποθέτοντας ότι το ρευστό ανακτά αμέσως μετά το κρουστικό κύμα την αρχική θερμοκρασία ηρεμίας ($T_3 \approx T_1$):

$$d_{ps} = d \left[\frac{u_2}{u_3} C_d \frac{P_1}{P_3} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{1/\gamma-1} \right] \quad (17)$$

Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έιλυσης και διασποράς υδρογόνου

Σε σχετικά υψηλές πιέσεις (όπου $\frac{P_1}{P_3} \gg (\frac{2}{\gamma+1})^{-\gamma/\gamma-1}$) η ταχύτητα στη θέση 3 προσεγγίζεται ως:

$$u_3 \cong u_2 \left(C_d + \frac{1}{\gamma C_d} \right) \quad (18)$$

Από τις σχέσεις (17) και (18) υπολογίζεται τελικά η ψευδο-διάμετρος:

$$d_{ps} = d C_d \sqrt{\frac{P_1}{P_2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/\gamma-1} \frac{\gamma}{\gamma C_d^2 + 1}} \quad (19)$$

Σε αυτήν την περίπτωση η τιμή της σταθεράς K της εξίσωσης (11) (όπως αναφέρεται στους Birch και συν., 1984), βρέθηκε να είναι ίση με 5,4 για τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες.

5.4.4.3 Schefer 2007

Οι Schefer και συν. (2007) υπολόγισαν την ψευδο-διάμετρο με τη χρήση της αρχής διατήρησης της μάζας και της ορμής στην περιοχή εκτόνωσης υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας:

$$\rho_2 u_2 A_2 = \rho_3 u_3 A_3 \quad (20)$$

$$\rho_3 u_3^2 A_3 = \rho_2 u_2^2 A_2 + A_2 (P_2 - P_3) \quad (21)$$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις υπολογίζεται η ταχύτητα u_3 και η ψευδο-διάμετρος d_{ps} ως:

$$u_3 = u_2 - \frac{P_3 - P_2}{\rho_2 u_2} \quad (22)$$

$$d_{ps} = d \sqrt{\frac{\rho_2 u_2}{\rho_3 u_3}} \quad (23)$$

Οι συνθήκες στη θέση 2 υπολογίστηκαν από τις συνθήκες ηρεμίας στη θέση 1 με τη χρήση ισεντροπικών σχέσεων. Η πίεση στη θέση 3, P_3 είναι ατμοσφαιρική. Η εφαρμογή των σχέσεων έγινε για H_2 σε πιέσεις αποθήκευσης μέχρι 413 bar. Σε πιέσεις περίπου μέχρι 170 bar το H_2 μπορεί να προσεγγιστεί ως τέλειο αέριο. Σε υψηλότερες πιέσεις όμως η συμπεριφορά του αερίου απομακρύνεται από αυτήν του τελείου αερίου. Η συμπεριφορά πραγματικού αερίου μπορεί να περιγραφεί επαρκώς με τη χρήση της καταστατικής εξίσωσης Abel-Nobel:

$$P = \frac{\rho R_{H_2} T}{(1 - bp)} = z \rho R_{H_2} T \quad (24)$$

Όπου $z = 1/(1 - b\rho)$ είναι ο συντελεστής συμπιεστότητας, b η σταθερά όγκου ($b=7.691 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$) και R_{H_2} η σταθερά H_2 ($R_{H_2}= 4,12 \text{ N m/ gm K}$). Η πυκνότητα του αερίου στις συνθήκες ηρεμίας μπορεί να υπολογιστεί βάσει της εξίσωσης (24) ως εξής:

$$\rho_1 = \frac{P_1}{P_1 b + R_{H_2} T_1} \quad (25)$$

Επίσης, για ισεντροπική μεταβολή αερίου Abel-Nobel από δεξαμενή αποθήκευσης υψηλής πίεσης η πυκνότητα στην έξοδο του ακροφυσίου (θέση 2) υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$\left(\frac{\rho_1}{1 - b\rho_1}\right)^\gamma = \left(\frac{\rho_2}{1 - b\rho_2}\right)^\gamma \left[1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2(1 - b\rho_2)^2}\right) M_2^2\right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (26)$$

Υποθέτοντας ότι στη θέση 2 η ροή είναι φραγμένη (choked flow) ο αριθμός Mach ισούται με 1 ($M_2=1$) και η εξίσωση (26) παίρνει τη μορφή:

$$\left(\frac{\rho_1}{1 - b\rho_1}\right)^\gamma = \left(\frac{\rho_2}{1 - b\rho_2}\right)^\gamma \left[1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2(1 - b\rho_2)^2}\right)\right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (27)$$

Επίσης, η θερμοκρασία και η πίεση στη θέση 2 υπολογίζονται ως:

$$T_2 = \frac{T_1}{1 + [(\gamma - 1)/2(1 - b\rho_2)^2]} \quad (28)$$

$$P_2 = \frac{\rho_2 R_{H_2} T_2}{1 - b\rho_2} \quad (29)$$

Τέλος, η ηχητική ταχύτητα στη θέση 2 υπολογίζεται ως:

$$u_2 = \frac{1}{(1 - b\rho_2)} \sqrt{\gamma R T_2} \quad (30)$$

5.4.4.4 Χiao 2009

Οι Χiao και συν. (2009) παρουσίασαν μοντέλα για τον υπολογισμό του πεδίου συγκέντρωσης και ταχύτητας στην περιοχή πλησίον της έκλυσης υποεκτονώμενης δέσμης H_2 πιέσεων 10, 30 και 100 MPa. Για τον υπολογισμό των συνθηκών ηρεμίας στη δεξαμενή αποθήκευσης και στο σημείο έκλυσης χρησιμοποιήθηκε η καταστατική εξίσωση πραγματικού αερίου η δε μεταβολή θεωρήθηκε ισεντροπική. Η εκτόνωση σε πίεση 0.1 MPa του αερίου υπολογίστηκε με μοντέλο μηδενικής διάστασης. Οι συνθήκες μετά την εκτόνωση χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές συνθήκες σε μοντέλο κυκλικής και ελεύθερης τυρβώδους δέσμης H_2 .

5.4.5 Υποηχητική πηγή

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη μοντελοποίηση της δέσμης σε σημείο όπου η ταχύτητα της ροής είναι σαφώς μικρότερη της ηχητικής. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει την υπόθεση ασυμπίεστης ροής και ως εκ τούτου αποφεύγονται οι υπολογιστικές δυσκολίες της συμπιεστής ροής. Επίσης, εφόσον η διάμετρος στην υποηχητική κατάσταση είναι μεγαλύτερη από αυτήν της ηχητικής, το μέγεθος των κελιών μπορεί να είναι μεγαλύτερο κάτι που είναι σημαντικό σε εφαρμογές γεωμετρίας μεγάλης κλίμακας για τη μείωση του υπολογιστικού κόστους.

5.4.5.1 Μέθοδος δίσκου Mach

Σ' αυτήν την μέθοδο, όπως περιγράφεται από τους Winters and Evans (2006), θεωρείται ισεντροπική μεταβολή μεταξύ της κατάστασης ηρεμίας μέσα στο δοχείο και του ακροφυσίου και μεταξύ του ακροφυσίου και του σημείου του δίσκου Mach ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται οι σχέσεις όπως περιγράφονται από τον Shapiro (Shapiro, 1953) για τον υπολογισμό των συνθηκών κατάντη του δίσκου Mach. Γίνεται επίσης η υπόθεση ότι όσο H_2 διέρχεται από το ακροφύσιο τόσο ακριβώς διέρχεται από το δίσκο Mach. Οι συνθήκες έκλυσης για την προσομοίωση είναι οι εξής:

- Η επιφάνεια του δίσκου Mach λαμβάνεται ως επιφάνεια έκλυσης.
- Η ταχύτητα και η θερμοκρασία αμέσως μετά το δίσκο Mach λαμβάνεται ως ταχύτητα και θερμοκρασία της έκλυσης.

Για τον υπολογισμό των συνθηκών κατάντη του δίσκου Mach, λαμβάνονται οι παρακάτω σχέσεις (Shapiro, 1953):

Ο αριθμός Mach στο επίπεδο x (M_x) συνδέεται με τις πιέσεις P_x και P_y από τη σχέση:

$$\frac{P_y}{P_x} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} M_x^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \quad (31)$$

Οι στατικές πιέσεις P_x και P_y μπορούν να εκφραστούν από τους αντίστοιχους αριθμούς Mach και τις πιέσεις σε συνθήκες ηρεμίας P_{0x} και P_{0y} ως εξής:

$$P_x = P_{0x} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_x^2\right)^{\frac{-\gamma}{\gamma - 1}} \quad (32)$$

$$P_y = P_{0y} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_y^2\right)^{\frac{-\gamma}{\gamma - 1}} \quad (33)$$

Εφόσον όμως έχει γίνει η υπόθεση ισεντροπικής μεταβολής μεταξύ του ακροφυσίου (επίπεδο 1) και του επιπέδου ανάντη του δίσκου Mach (επίπεδο x) τότε ισχύει:

$$P_{01} = P_{0x} \quad (34)$$

Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

Ακόμη ισχύει ότι:

$$P_{oy} = P_{atm} \quad (35)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι οι συνθήκες στο επίπεδο 0 είναι αυτές στο δοχείο αποθήκευσης, οι οποίες είναι γνωστές, τότε:

$$P_0 = P_{o1} = P_{ox} \quad (36)$$

Επίσης, ισχύει η παρακάτω σχέση που συνδέει τους αριθμούς Mach εκατέρωθεν του δίσκου Mach:

$$M_y^2 = \frac{M_x^2 + \frac{2}{\gamma - 1}}{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} M_x^2 - 1} \quad (37)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (32) έως και (37) στη σχέση (31), λαμβάνεται τελικά η σχέση:

$$\frac{P_{oy}}{P_{ox}} = \frac{\left[\frac{M_x^2 \gamma + 1}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_x^2} \right]^{\gamma/\gamma - 1}}{\left[\frac{2\gamma}{\gamma + 1} M_x^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right]^{1/\gamma - 1}} = \frac{P_{atm}}{P_0} \quad (38)$$

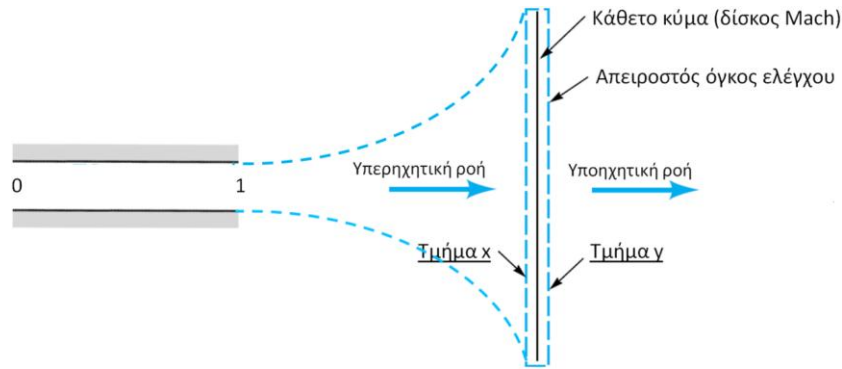
Από τη σχέση λοιπόν (38) μπορεί να υπολογιστεί το M_x . Έχοντας γνωστό το M_x και με χρήση της σχέσης (37) υπολογίζεται το M_y . Τέλος ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις σχέσεις που ισχύουν σε κάθε επίπεδο για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του αερίου.

Πίνακας 5: Σχέσεις υπολογισμού των συνθηκών του ρευστού στα διάφορα επίπεδα (μέθοδος δίσκου Mach)

Συνθήκες ηρεμίας	Συνθήκες στο ακροφύσιο (κρίσιμες συνθήκες, $M_1=1$)	Συνθήκες ανάντη δίσκου Mach	Συνθήκες κατόντη δίσκου Mach
Επίπεδο 0	Επίπεδο 1	Επίπεδο x	Επίπεδο y
P_0 (γνωστό)	$P_1 = P_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/\gamma - 1}$	$P_x = P_0 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_x^2 \right)^{-\gamma/\gamma - 1}$	$P_y = P_x \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} M_x^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right)$
T_0 (γνωστό)	$T_1 = T_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)$	$T_x = T_0 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_x^2 \right)^{-1}$	$T_y = T_x \left[\frac{\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_x^2 \right) \left(\frac{2\gamma}{\gamma - 1} M_x^2 - 1 \right)}{\frac{(\gamma + 1)^2}{2(\gamma - 1)} M_x^2} \right]$

Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έλλυσης και διασποράς υδρογόνου

-	$u_1 = M_1 c_1$ $= \sqrt{\frac{\gamma R T_1}{MW}}$	$u_x = M_x c_x = M_x \sqrt{\frac{\gamma R T_x}{MW}}$	$u_y = M_y c_y = M_y \sqrt{\frac{\gamma R T_y}{MW}}$
$\rho_0 = \frac{P_0 MW}{R T_0}$	$\rho_1 = \rho_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{1/\gamma - 1}$	$\rho_x = \frac{P_x MW}{R T_x}$	$\rho_y = \frac{P_y MW}{R T_y}$
-	A_1	$A_x = \frac{A_1 \rho_1 u_1}{\rho_x u_x}$	$A_y = A_x$



Σχήμα 5: Αναπαράσταση μεθόδου δίσκου Mach

5.4.5.2 Πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή

Στην πλήρως ανεπτυγμένη περιοχή (περιοχή κατάντη του δίσκου Mach) η ταχύτητα και η ογκομετρική συγκέντρωση της δέσμης, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, περιγράφονται με κανονικές κατανομές. Οι Ewan and Moodie (1986) πρότειναν τις παρακάτω σχέσεις για την περιγραφή των συνθηκών υποχηχητικής πηγής όπου ο αριθμός Mach στο κέντρο της υποχηχητικής κατάστασης ήταν 0,3.:

$$V = V_c \exp \left[- \left(\frac{r}{b_V} \right)^2 \right] \quad (39)$$

$$X = X_c \exp \left[- \left(\frac{r}{b_X} \right)^2 \right] \quad (40)$$

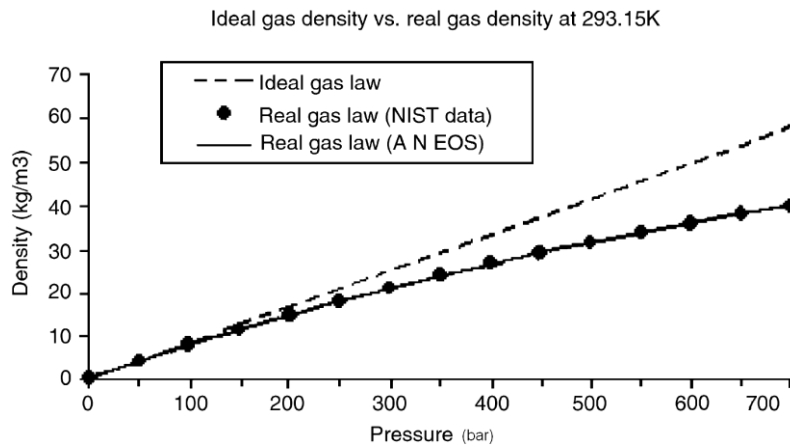
Όπου V_c και X_c είναι η ταχύτητα και η ογκομετρική συγκέντρωση στον άξονα συμμετρίας, r είναι η ακτινική απόσταση από τον άξονα συμμετρίας και οι παράμετροι b_X και b_V δίνονται από τις σχέσεις $b_V = 0,126z$ και $b_X = 0,107z$ (όπου z η αξονική απόσταση από την πηγή). Η ταχύτητα και η ογκομετρική συγκέντρωση στον άξονα συμμετρίας υπολογίζονται βάσει των παρακάτω σχέσεων:

$$V_c = V_1 \left[1 - \exp \left(0,7 - 0,0672 \frac{z}{r_1} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_1}} \right)^{-1} \right] \quad (41)$$

$$X_c = 1 - \exp \left(0,7 - 0,104 \frac{z}{r_1} \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_1}} \right)^{-1} \quad (42)$$

5.5 Σύγκριση μεταξύ υπόθεσης ιδανικού και πραγματικού αερίου

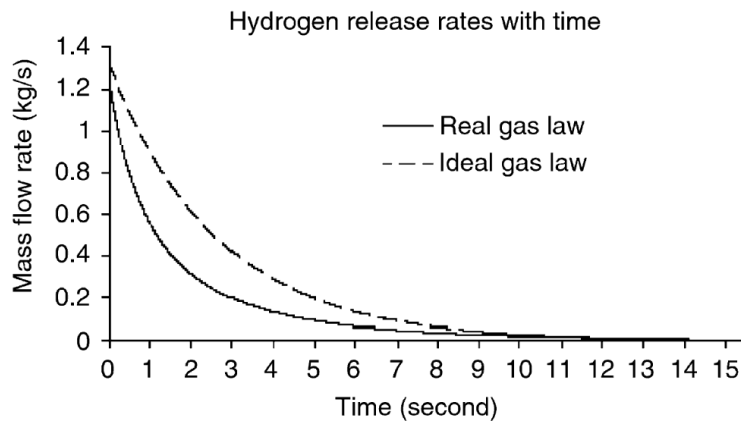
Οι υπολογισμοί των συνθηκών έκλυσης με την υπόθεση τελείου αερίου σε υψηλές πιέσεις μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική υπερεκτίμηση της πυκνότητας και ως εκ τούτου του ρυθμού έκλυσης H_2 που με τη σειρά του οδηγεί σε υπερεκτιμήσεις της έκτασης του αναφλέξιμου νέφους. Στο Σχήμα 6 απεικονίζονται οι υπολογισμοί της πυκνότητας του H_2 συναρτήσει της αρχικής πίεσης ηρεμίας βάσει της υπόθεσης ιδανικού και πραγματικού αερίου (με την Abel-Nobel εξίσωση και βάσει δεδομένων NIST) όπως παρουσιάστηκαν από τους Tchouvelev και συν. (2007). Όπως φαίνεται από το σχήμα, σε πίεση 700 bar, η πυκνότητα H_2 με την υπόθεση ιδανικού αερίου είναι κατά 45% μεγαλύτερη από αυτήν με την υπόθεση πραγματικού αερίου.



Σχήμα 6: Διαφορά πυκνότητας πραγματικού αερίου από αυτήν ιδανικού αερίου συναρτήσει της πίεσης σε θερμοκρασία 293.15 K. (Tchouvelev και συν., 2007)

Οι Tchouvelev και συν. (2007) υπολόγισαν τον ρυθμό έκλυσης H_2 από μια δεξαμενή αποθήκευσης 60 L σε πίεση ηρεμίας 700 bar όπου η διάμετρος του ακροφυσίου ήταν 6 mm υποθέτοντας αδιαβατική μεταβολή. Οι συνθήκες ηρεμίας μέσα στη δεξαμενή καθώς και η ηχητική ροή στο ακροφύσιο υπολογίστηκαν για πραγματικό αέριο. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 7, χρειάζονται 14,14 sec για την ολοκλήρωση της έκλυσης για πραγματικό αέριο ενώ για ιδανικό αέριο ο χρόνος ήταν 15,45 sec. Επίσης, ο αρχικός ρυθμός έκλυσης είναι κατά 6% μεγαλύτερος για ιδανικό αέριο ενώ αυξάνεται περίπου κατά 50% από 2 έως 5 sec μετά την έναρξη της έκλυσης. Τέλος, η συνολική εκλυόμενη μάζα H_2 στην περίπτωση υπόθεσης ιδανικού αερίου είναι κατά 45% μεγαλύτερη.

Αξίζει να σημειωθεί η πρόσφατη δημοσίευση του Nasrifar (2010) ως καλή πηγή αναφοράς των καταστατικών εξισώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του H_2 . Συνεκρίθησαν 11 καταστατικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της πίεσης ατμών, της πυκνότητας ατμών και υγρού, της ειδικής θερμότητας ατμών και υγρού, της ενθαλπίας εξάτμισης και της εντροπίας για το H_2 καθώς επίσης και θερμικές και ογκομετρικές ιδιότητες του αερίου H_2 , της ταχύτητας ήχου H_2 , του συντελεστή Joule-Thompson, κ.α..



Σχήμα 7: Φραγμένος (*choked*) ρυθμός έκλυσης H_2 , αρχική πίεση δεξαμενής 700 bar, διάμετρος ακροφύσιου 6 mm. Ο ρυθμός έκλυσης με την υπόθεση ιδανικού αερίου είναι μεγαλύτερος κατά 53% μετά από 3 s από την έναρξη της έκλυσης (Tchounelev et al., 2007)

Οι Mohamed and Paraschivoiu (2005) μελέτησαν επίσης την επίδραση της υπόθεσης πραγματικού αερίου στις συνθήκες έκλυσης υπό υψηλές πιέσεις. Παρουσίασαν 2 μεθοδολογίες υπολογισμού των συνθηκών έκλυσης: αναλυτική και υπολογιστική. Οι συνθήκες στο ακροφύσιο έκλυσης θεωρήθηκαν και στις 2 μεθοδολογίες κρίσιμες (ταχύτητα ίση με την τοπική ταχύτητα του ήχου). Για την υπόθεση πραγματικού αερίου χρησιμοποίησαν την καταστατική εξίσωση Beattie-Bridgeman. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σφάλμα της καταστατικής εξίσωσης Beattie-Bridgeman όπως και των δεδομένων NIST για συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας από 0,1 MPa έως 35 MPa και 60 K έως 300 K αντίστοιχα είναι μικρότερο από 8% (το μέγιστο εμφανίζεται σε συνθήκες 35 MPa και 300 K). Κατά την ισοεντροπική εκτόνωση του αερίου από τις συνθήκες ηρεμίας στο δοχείο στις συνθήκες στο ακροφύσιο (κρίσιμες συνθήκες) η πίεση ελαττώνεται και το H_2 προσεγγίζει το ιδανικό αέριο. Με την υπόθεση πραγματικού αερίου προβλέπεται μεγαλύτερη τιμή για την ταχύτητα του ήχου στα πρώτα στάδια της έκλυσης σε σύγκριση με την υπόθεση τελείου αερίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ελάττωση της πίεσης στο ακροφύσιο στην περίπτωση πραγματικού αερίου και κατ' επέκτασιν μικρότερη θερμοκρασία.

Η πυκνότητα στο δοχείο με την υπόθεση ιδανικού αερίου είναι μεγαλύτερη από αυτήν με την υπόθεση πραγματικού αερίου. Κατά συνέπεια, το δοχείο περιέχει αρχικά περισσότερη μάζα H_2 . Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για αρχικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας 34,5 MPa και 300 K, η πυκνότητα ιδανικού αερίου είναι 0,76 kg ενώ αυτή του πραγματικού αερίου είναι 0,58 kg. Ακόμη κι αν η ταχύτητα στο ακροφύσιο είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση πραγματικού αερίου, λόγω της υπερεκτίμησης της πυκνότητας H_2 που εκρέει στην περίπτωση ιδανικού αερίου, η παροχή έκλυσης μάζας του ιδανικού αερίου είναι μεγαλύτερη.

Οι διαφορές στις συνθήκες έκλυσης που προκύπτουν μεταξύ της υπόθεσης ιδανικού και πραγματικού αερίου οδηγούν φυσικά σε διαφορές στην εξέλιξη της έκλυσης δηλαδή στην διασπορά του αερίου στον περιβάλλοντα χώρο. Οι Cheng και συν. (2005) μελέτησαν υπολογιστικά την έκλυση και διασπορά H_2 από δεξαμενή πίεσης 40 MPa με διάμετρο διαρροής 6 mm παρουσία ανέμου 0,5 m/s υποθέτοντας ιδανικό και πραγματικό αέριο. Για την περίπτωση πραγματικού αερίου

χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Abel-Nobel. Για τη διασπορά του H₂ στο περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας CFD PHOENICS και το μοντέλο LVEL. Οι διαφορές στην έκταση νέφους συγκέντρωσης ίσης με το LFL και 50% του LFL στα 3 s και 5 s για οριζόντια και κατακόρυφη έκλυση μεταξύ ιδανικού και πραγματικού αερίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Διαφορά έκτασης συγκέντρωσης νέφους LFL και 50% LFL μεταξύ ιδανικού και πραγματικού αερίου

Χρόνος (s)	Συγκέντρωση H ₂	Διαφορά έκτασης νέφους (% $\frac{\text{ιδανικό}-\text{πραγματικό}}{\text{ιδανικό}}$)	
		Οριζόντια έκλυση	Κατακόρυφη έκλυση
3	LFL	7,7	4,6
	50% του LFL	6,3	5,3
5	LFL	25,6	10
	50% του LFL	9,1	5,4

5.6 Γενικά Συμπεράσματα

Για τον ασφαλή σχεδιασμό, τη λειτουργία και την ευρεία χρήση των συσκευών ενεργειακών συστοιχιών και λοιπών μονάδων H₂ απαιτείται αρχικά η εκτίμηση των ορίων του αναφλέξιμου νέφους πιθανών σεναρίων έκλυσης ώστε να καθοριστούν οι αποστάσεις ασφαλείας και να απομακρυνθούν ενδεχόμενες πηγές έναυσης από τις ζώνες επικινδυνότητας.

Μέχρι στιγμής, όσοι υπολογισμοί έχουν δημοσιευτεί με γνώση των πειραματικών αποτελεσμάτων εκ των προτέρων, έχουν γενικά καλή πρόβλεψη. Η δυνατότητα πρόβλεψης φαίνεται να χειροτερεύει στην περίπτωση που τα πειραματικά δεδομένα γίνονται γνωστά μετά τους υπολογισμούς. Από την ανασκόπηση των υπολογιστικών μελετών, αναγνωρίστηκαν τα ακόλουθα ζητήματα ως επικρατή:

- Υπάρχει έλλειψη πειραματικών δεδομένων σχετικών με τη μείωση της συγκέντρωσης ισχυρών τυρβωδών δεσμών H₂ προκυπτουσών από υπερκρίσιμες συνθήκες. Τέτοιου είδους δεδομένα είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση των CFD μεθοδολογιών. Υπάρχουν στην βιβλιογραφία κάποιες σχετικές υπολογιστικές μελέτες. Κατά τον Molkon, (Molkon, 2009) τα μοντέλα LES και RANS δίνουν συχνά παρόμοια αποτελέσματα, ωστόσο στις περιπτώσεις LES απαιτείται πυκνότερο πλέγμα. Επίσης, φαίνεται ότι το RNG μοντέλο, ανταποκρίνεται καλύτερα και ότι σχήματα ανώτερα της 1^{ης} τάξης φαίνεται να βελτιώνουν τις προβλέψεις.
- Συχνά, στις υπερκρίσιμες συνθήκες, οι εκλύσεις μοντελοποιούνται με αντικατάσταση της πραγματικής πηγής από τις λεγόμενες «φαινόμενες» ή θεωρώντας υποηχητική πηγή επέκεινα του δίσκου Mach. Ενώ το υπολογιστικό όφελος είναι σημαντικό διότι έτσι επιταχύνεται ο χρόνος προσομοίωσης, η αξιοπιστία αυτής της στρατηγικής θα πρέπει να αξιολογηθεί περαιτέρω και να συγκριθεί με πειραματικά δεδομένα ρεαλιστικών συνθηκών.

Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

- Θα πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω η επίδραση των προστατευτικών τοίχων στην διασπορά εκλύσεων υψηλής πίεσης καθώς είναι γνωστό ότι οι δέσμες πλησίον στερεών επιφανειών χαρακτηρίζονται από απώλειες συμπαρασύρσης του αέρα με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του αναφλέξιμου νέφους. Θα πρέπει να μελετηθεί συστηματικά ο τρόπος επίδρασης αυτού του φαινομένου στη μεταβολή της συγκέντρωσης της δέσμης η οποία επηρεάζει με τη σειρά της τις απαιτούμενες αποστάσεις ασφαλείας.
- Οι μεθοδολογίες CFD θα πρέπει να αξιολογηθούν με πειραματικά δεδομένα σε σενάρια προσκρουόμενων δεσμών σε τοίχους, πολύπλοκες γεωμετρίες και σήραγγες.
- Η εμφάνιση διαστρωμάτωσης στην περίπτωση ασθενών εκλύσεων H_2 σε κλειστούς χώρους χρήζει περαιτέρω μελέτης. Το φαινόμενο βραδείας μετακίνησης του H_2 από τα ανώτερα στρώματα του χώρου προς το έδαφος πρέπει να διευκρινιστεί. Επίσης πρέπει να γίνουν περισσότερες μελέτες για τον χαρακτηρισμό της κατανομής H_2 σε κλειστούς χώρους από εκλύσεις λόγω διαπερατότητάς του από τα δοχεία αποθήκευσης. Στην περίπτωση ασθενών εκλύσεων ή εκλύσεων λόγω διαπερατότητας του H_2 από τα αυτοκίνητα θα πρέπει να μελετηθεί τόσο πειραματικά όσο υπολογιστικά το ενδεχόμενο διασποράς του H_2 μέσα στα διαμερίσματα επιβατών και η πιθανή εμφάνιση αναφλέξιμου νέφους εντός αυτών.
- Η επίδραση του φυσικού/μηχανικού αερισμού χρήζει περαιτέρω μελέτης. Θα πρέπει να μελετηθεί ιδιαίτερος η επίδραση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού χώρου και η περίπτωση όπου η θερμική κυκλοφορία αέρα μπορεί να εμποδίσει τον φυσικό αερισμό προκληθέντα από δυνάμεις άνωσης.
- Θα πρέπει να μελετηθεί τόσο πειραματικά όσο υπολογιστικά η επίδραση των απωλειών του δικτύου αγωγών μεταξύ του χώρου αποθήκευσης υψηλής πίεσης και της πηγής έκλυσης στην πτώση πίεσης και τη δομή υποεκτονώμενων υπερηχητικών δεσμών (Molkon, 2007).
- Έχουν δημοσιευτεί κάποιες μελέτες που αφορούν σενάρια έκλυσης H_2 σε σταθμούς ανεφοδιασμού. Δυστυχώς, τα πειραματικά δεδομένα για να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες αξιολόγησης CFD, είναι πολύ περιορισμένα.
- Καθορισμός ορίων εφαρμογής υπολογισμού των συνθηκών έκλυσης με την υπόθεση ιδανικού και πραγματικού αερίου εφόσον οι δυο μέθοδοι οδηγούν σε διαφορές στη διασπορά του αερίου στον περιβάλλοντα χώρο.
- Στην προσπάθεια να συγκριθεί η συμπεριφορά του H_2 σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα έχουν δημοσιευτεί υπολογιστικά σενάρια εκλύσεων H_2 με CH_4 . Η εκτίμηση για το ποιο από τα 2 αέρια μπορεί να προκαλέσει επικινδυνότερες συνθήκες δεν είναι εύκολη. Φερ' ειπείν, η περιέχουσα στο αναφλέξιμο νέφος θερμική ενέργεια του H_2 βρέθηκε μεγαλύτερη σε σενάριο ηχητικής έκλυσης σε ανοιχτό χώρο, λόγω των ευρύτερων ορίων ανάφλεξης

του H₂. Κατά συνέπεια, πιθανή έκρηξη του H₂ θα προκαλούσε θεωρητικά περισσότερες καταστροφές από αυτήν του CH₄. Από την άλλη όμως πλευρά, το αναφλέξιμο νέφος του H₂ λόγω της μικρότερης πυκνότητάς του από τον αέρα θα βρίσκεται πιο μακριά από το έδαφος και τα γειτονικά κτίρια σε σχέση με αυτό του CH₄, γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα έναυσης του δεύτερου έναντι του πρώτου.

Η ολοένα αυξανόμενη χρήση των CFD κωδικών ως εργαλεία για τον ασφαλή σχεδιασμό των μονάδων υποδομής τεχνολογιών H₂ θα πρέπει να τεκμηριωθεί μέσω της αξιολόγησής τους έναντι πειραματικών δεδομένων πραγματικής κλιμακας υπό συνθήκες πρακτικού ενδιαφέροντος. Όπως φάνηκε από την ανασκόπηση των υπολογιστικών μελετών, έχουν γίνει μέχρι στιγμής κάποια βήματα προς αυτήν την κατεύθυνση. Ωστόσο, τα προαναφερθέντα ζητήματα χρήζουν συστηματικής μελέτης.

5.7 Βιβλιογραφικές αναφορές

Adams, P., Bengaouer, A., Cariteau, B., Molkov, V. and Venetsanos A.G., (2010), “Allowable hydrogen permeation rate from road vehicles”, International Journal of Hydrogen Energy, [doi:10.1016/j.ijhydene.2010.04.161](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.161)

Awbi, H., (2005), “Ventilation of buildings” 2nd edition, Spon Press, Taylor and Francis Group

Baraldi, D., Papanikolaou, E., Heitsch, M., Moretto, P., Cant, S., Roekaerts, D., Dorfeev, S., Koutchourko, A., Middha, P., Tchouvelev, A., Ledin, S., Wen, J., Venetsanos, A., Molkov, V., (2010), “Gap analysis of CFD modelling of accidental hydrogen release and combustion”, JRC, Institute for Energy, Netherlands

Barley C.D. and Gawlik K., (2009), “Buoyancy-driven ventilation of hydrogen from buildings: Laboratory test and model validation”, Technical Report NREL/TP-550-45804, (<http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45804.pdf>)

Birch A.D., Brown D.R., Dodson M.G. and Swaffield F., (1984), “The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas”, Combustion Science and Technology, Vol. 36, pp. 249-261

Birch A.D., Hughes D.J. and Swaffield F., (1987), “Velocity decay of high pressure jets”, Combustion Science and Technology, Vol. 52, pp. 161-171

Cariteau, B., Brinster, J. and Tkatschenko, I., (2010), “Experiments on the distribution of concentration due to buoyant gas low flow rate release in an enclosure”, International Journal of Hydrogen Energy, [doi:10.1016/j.ijhydene.2010.04.054](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.054) |

Cheng, Z., Agranat, V.M., Tchouvelev, A.V., Houf, W. and Zhubrin, S.V., (2005), “PRD hydrogen release and dispersion, a comparison of CFD results obtained from using ideal and real gas law properties”, 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Cheng, Z., Agranat, V.M., Tchouvelev, A.V., (2005), “Vertical turbulent buoyant helium jet – CFD modeling and validation”, 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Ewan B.C.R. and Moodie K., (1986), “Structure and velocity measurements in under-expanded jets”, Combustion Science and Technology, Vol. 45, pp. 275-288

Gallego, E., Migoya, E., Martín-Valdepeñas, J.M., et al., “An intercomparison exercise on the capabilities of CFD models to predict distribution and mixing of H₂ in a closed vessel”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 2235-2245

Hess K., Leukel W. and Stoeckel A., (1973), “Formation of explosive clouds on overhead release and preventive measure”, Chemie-Ingenieur-Technik, Vol. 45, No. 5

Houf W.G., Evans, G.H. and Schefer R.W., (2009), “Analysis of jet flames and unignited jets from unintended releases of hydrogen”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, Issue 14, pp. 5961-5969

Houf W.G. and Schefer R.W., (2007), “Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 136-151

Hourri, A., Angers, B. and Bénard, P., (2009), “Surface effects on flammable extent of hydrogen and methane jets”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 1569-1577

HySafe, Safety of hydrogen as an energy carrier, Network of Excellence, FP6, 2003-2009, available at: www.hysafe.org

Ivings M., Azhar M., Carey C., Lea C., Ledin S., Sinai Y., Skinner C. and Stephenson P., (2008), “Outstanding safety questions concerning the use of gas turbines for power generation: Final report on the CFD modelling programme of work”, CM/03/08, Health and Safety Laboratory

Jordan, T., Garcia, J., Hansesn, O., Huser, A., Ledin, S., Middha, P., Molkov, V., Travis, J., Venetsanos, A.G., Verbecke, F. and Xiao J., (2007), “Results of the HySafe CFD validation benchmark SBEPV5”, 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Kikukawa, S., (2008), “Consequence analysis and safety verification of hydrogen fueling stations using CFD simulation”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 1425-1434

Kotchourko A., (2009), “Advances in modeling for safety applications”, Topical lecture in the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

Lees F.P., 1996, “Loss prevention in the process industries”, Butterworth-Heinemann, 2nd edition

Lehnasch G., (2005), “Contribution à l’ étude numérique des jets supersoniques sous-détendus”, Thèse, Université de Poitiers

Liu, H. and Schreiber W., (2008), “The effect of ventilation system design on hydrogen dispersion in a sedan”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, Issue 19, pp. 5115-5119

Lowesmith, B.J., Hankinson, G., Spataru, C., Stobbart, M., (2007), “Gas build-up in a domestic property following releases of methane/hydrogen mixtures”, 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Matsuura, K., Kanayama, H., et al. (2008), “Numerical simulation of leaking hydrogen dispersion behavior in a partially open space”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 240-247

Matsuura, K., Nakano, M., Ishimoto, J. (2009), “The sensing-based adaptive risk mitigation of leaking hydrogen in a partially open space”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 8770-8782

Matsuura, K., (2009), “Effects of the geometrical configuration of a ventilation system on leaking hydrogen dispersion and accumulation”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 9869-9878

Mohamed, K. and Paraschivoiu, M., (2005), “Real gas simulation of hydrogen release from a high-pressure chamber”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, pp. 903-912

Molkov V., (2007), “Hydrogen safety research: State-of-the art”, 5th International seminar on fire and explosion hazards, Edinburgh, UK

Nasrifar K., (2010), “Comparative study of eleven equations of state in predicting the thermodynamic properties of hydrogen”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, pp. 3802-3811

Péneau, F., Pedro, G., Oshkai, P., Bénard, P. and Djilali N., (2009), “Transient supersonic release of hydrogen from high pressure vessel: A computational analysis”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34 pp. 5817-5827

Prasad, K., Pitts, W.M. and Yang, J.C., (2009), “A numerical study of hydrogen or helium release and mixing in partially confined spaces”, NHA Annual Hydrogen Conference

Saffers, J-B, Makarov, D. and Molkov V., (2009), “Estimation of an allowable hydrogen permeation rate from road vehicle compressed gaseous hydrogen storage systems in typical garages; Part 3: Modelling and numerical simulation of

hydrogen permeation in a garage with adiabatic walls and still air”, 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

Shapiro, A.H., (1953), “The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow”, Vol. 1, New York: The Ronald Press Co., pp. 116–118

Schefer R.W., Houf W.G., Williams T.C., Bourne B. and Colton J., (2007), “Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 2081-2093

Swain, M.R., Grilliot, E.S. and Swain M.N., (1998), “Risks incurred by hydrogen escaping from containers and conduits”, Proceedings of the 1998 US DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-570-25315

Tchouvelev A.V., (2008), “Knowledge gaps in hydrogen safety – A White Paper”, Hydrogen Implementing Agreement, Task 19 – Hydrogen Safety

Tchouvelev A.V., Cheng Z., Agranat V.M. and Zhubrin S.V., (2007), “Effectiveness of small barriers as means to reduce clearance distances”, International Journal of Hydrogen Energy, 32, pp. 1409-1415

Venetsanos, A.G., Huld, T., Adams, P. and Bartzis, J.G., (2003), “Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment”, Journal of Hazardous Materials, Vol. A105, pp. 1-25

Venetsanos, A.G., Baraldi, D., Adams, P., Heggem, P.S. and Wilkening H., (2008), “CFD modelling of hydrogen release, dispersion and combustion for automotive scenarios”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 21, pp. 162-184

Venetsanos, A.G., Papanikolaou, E., Delichatsios, M., Garcia, J., Hansen, O.R., et al., (2009), “An inter-comparison exercise on the capabilities of CFD models to predict the short and long term distribution and mixing of hydrogen on a garage”, International Journal of Hydrogen Energy, 34, pp. 5912-5923

Venetsanos, A.G., Papanikolaou, E., Cariteau, B., Adams, P. and Bengaouer A., (2010), “Hydrogen permeation from CGH2 vehicles in garages: CFD dispersion calculations and experimental validation”, International Journal of Hydrogen Energy, [doi:10.1016/j.ijhydene.2010.01.135](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.135)

Venetsanos, A.G., Papanikolaou, E., Hansen, O.R., Middha, P., Garcia, J., Heitsch, M., Baraldi, D. and Adams, P., (2010), “HySafe standard benchmark problem SBEP-V11: Predictions of hydrogen release and dispersion from a CGH2 bus in an underpass”, International Journal of Hydrogen Energy, 35, pp. 3857-3867

Wilkening, H. and Baraldi, D., (2007), “CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines”, International Journal of Hydrogen Energy, 32, Issue 13, pp. 2206-2215

Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου

Winters W.S. and Evans G.H., (2006), “Final report for the ASC gas–powder two-phase flow modeling project AD2006-09”, Sandia National Laboratories Report No. SAND2006–7579

Xu, B.P., Zhang, J.P., Wen, J.X., Dembele S. and Karwatzki J., (2005), “Numerical study of a highly under-expanded H₂ jet”, 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

Λίστα Συμβόλων

Χαρακτήρες κεφαλαίων

A	Επιφάνεια ανοίγματος	m^3
C_d	Συντελεστής παροχής ανοίγματος	
Q	Παροχή αερισμού	m^3/s
V	Όγκος	m^3

Χαρακτήρες μικρών γραμμάτων

c	Συγκέντρωση κατ' όγκο	v/v
f	Παράγοντας διαστρωμάτωσης	
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	m/s^2
h	Ύψος	m
q	Κλάσμα μάζας	

Δείκτες

avg	Μέση τιμή (average)	
z_i	Κατακόρυφη απόσταση	

Ελληνικοί χαρακτήρες

ρ	Πυκνότητα	kg/m^3
--------	-----------	----------

Συντομογραφίες

IPG	Installation Permitting Guidance	
LEL	Lower Explosive Limit	

6.1 Εισαγωγή

Η χρήση στατικών μονάδων ενεργειακών συστοιχιών (fuel cells) σε συνδυασμό με το H_2 αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον. Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα EC FP6 HyPer – Installation Permitting Guidance for Hydrogen and Fuel Cells Stationary Applications (HyPer, 2009) είχε ως στόχο τη συνδρομή της ασφαλούς εισαγωγής αυτής της νέας τεχνολογίας ο οποίος υλοποιήθηκε με τη συγγραφή του δημόσιου Εναρμονισμένου Οδηγού Εγκατάστασης (IPG) μικρών μονάδων H_2 -ενεργειακών συστοιχιών. Το πρόγραμμα HyPer περιέλαβε μελέτες πάνω στην σχετική ισχύουσα νομοθεσία και αναγνώρισε τις ελλείψεις στη βιβλιογραφία αυτής της τεχνολογίας. Πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες έλαβαν χώρα προκειμένου να δοθούν περισσότερες πληροφορίες και να διευκρινιστούν θέματα ασφάλειας σχετικά με εγκαταστάσεις τέτοιου μεγέθους. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν πειραματικά ή/και υπολογιστικά φαινόμενα όπως:

- Εκλύσεις υπό υψηλή και χαμηλή πίεση.
- Προβλεπόμενες και καταστροφικές εκλύσεις.
- Ειρηντικές ατμόσφαιρες στο εσωτερικό ή μη του κελύφους του εξοπλισμού/συστήματος.
- Ειρηντικές ατμόσφαιρες στο εσωτερικό ή μη του χώρου εγκατάστασης/υποδοχής της μονάδας.
- Τυρβώδεις ή εν ηρεμία ειρηνικές ατμόσφαιρες.
- Πρώιμη ή όψιμη έναυση.
- Έκρηξη ή φλογοπίδακας (φωτιά πυρσού – jet fire).
- Σενάρια μετριασμού ή μη των επιπτώσεων έκλυσης ή/και έκρηξης ή φλογοπίδακα.

Στα πλαίσια του προγράμματος HyPer έγινε μια μελέτη αξιολόγησης ασφάλειας στο χώρο εγκατάστασης και αποθήκευσης μικρής μονάδας ενεργειακής συστοιχίας H_2 ισχύος 4,8 kWe. Η μελέτη περιέλαβε πειράματα έκλυσης H_2 από την συστοιχία, ογκομετρικής παροχής 40, 90 και 180 l/min. Η θέση έκλυσης βρισκόταν στη βαλβίδα του αγωγού εισόδου ακριβώς πριν το ρυθμιστή πίεσης της ενεργειακής συστοιχίας. Το H_2 αναμένετο να διαρρεύσει από τη συστοιχία στο χώρο εγκατάστασης/υποδοχής και μετά στον περιβάλλοντα εξωτερικό χώρο μέσω των ανοιγμάτων αερισμού. Μελετήθηκαν συνολικά 10 διαφορετικές διατάξεις φυσικού αερισμού και ισάριθμες διατάξεις μηχανικού. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι υπολογιστικές μελέτες των πειραμάτων φυσικού αερισμού καθώς επίσης και μια αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αερισμού του χώρου εγκατάστασης/υποδοχής της μονάδας.

6.2 Περιγραφή των πειραμάτων

Τα πειράματα αφορούσαν την έκλυση και διασπορά H_2 από στατικό σύστημα ενεργειακής συστοιχίας εγκατεστημένης ισχύος 4,8 kW_e για οικιακή χρήση και δημοσιεύτηκαν από τους Cerchiara και συν. (2009). Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός των απαιτήσεων (φυσικού ή μηχανικού) αερισμού του χώρου εγκατάστασης/υποδοχής της συστοιχίας προκειμένου ο χώρος να μην χαρακτηριστεί ως ζώνη 2 βάσει της Ευρωπαϊκής Οδηγίας ATEX (Directive 1999/92/EC) σε περίπτωση μικρής προβλεπόμενης διαρροής. Κατά τις οδηγίες ATEX, ένας χώρος χαρακτηρίζεται ως ζώνη 2 όταν έκλυση ειρηντικού αερίου μπορεί να δημιουργήσει μίγμα συγκέντρωσης 50% του LEL για μικρό χρονικό διάστημα. Οι πειραματιστές μετέφρασαν αυτήν την απαίτηση ως συγκέντρωση H_2 2% κατ' όγκο. Με άλλα λόγια, εξετάστηκε σε κάθε πείραμα αν η διάταξη αερισμού ήταν αρκετά αποτελεσματική ώστε η συγκέντρωση H_2 στο χώρο να είναι μικρότερη από 2%. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τις συνθήκες των πειραμάτων φυσικού αερισμού καθώς επίσης και τις διάφορες διατάξεις των ανοιγμάτων αερισμού που μελετήθηκαν. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, μελετήθηκαν 10 διαφορετικές διατάξεις φυσικού αερισμού οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 1 όπως παρήχθησαν με τη χρήση των γεωμετρικών/γραφικών βιβλιοθηκών OpenCascade και DELTA-B (Venetsanos και συν., 1995). Μελετήθηκαν 4 θέσεις έκλυσης H_2 , 2 κατακόρυφες προς τα πάνω (είτε μέσα στην ενεργειακή συστοιχία είτε έξω από αυτήν) και 2 οριζόντιες (επίσης είτε μέσα είτε έξω από την ενεργειακή συστοιχία). Τα πειράματα περιγράφονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου.

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

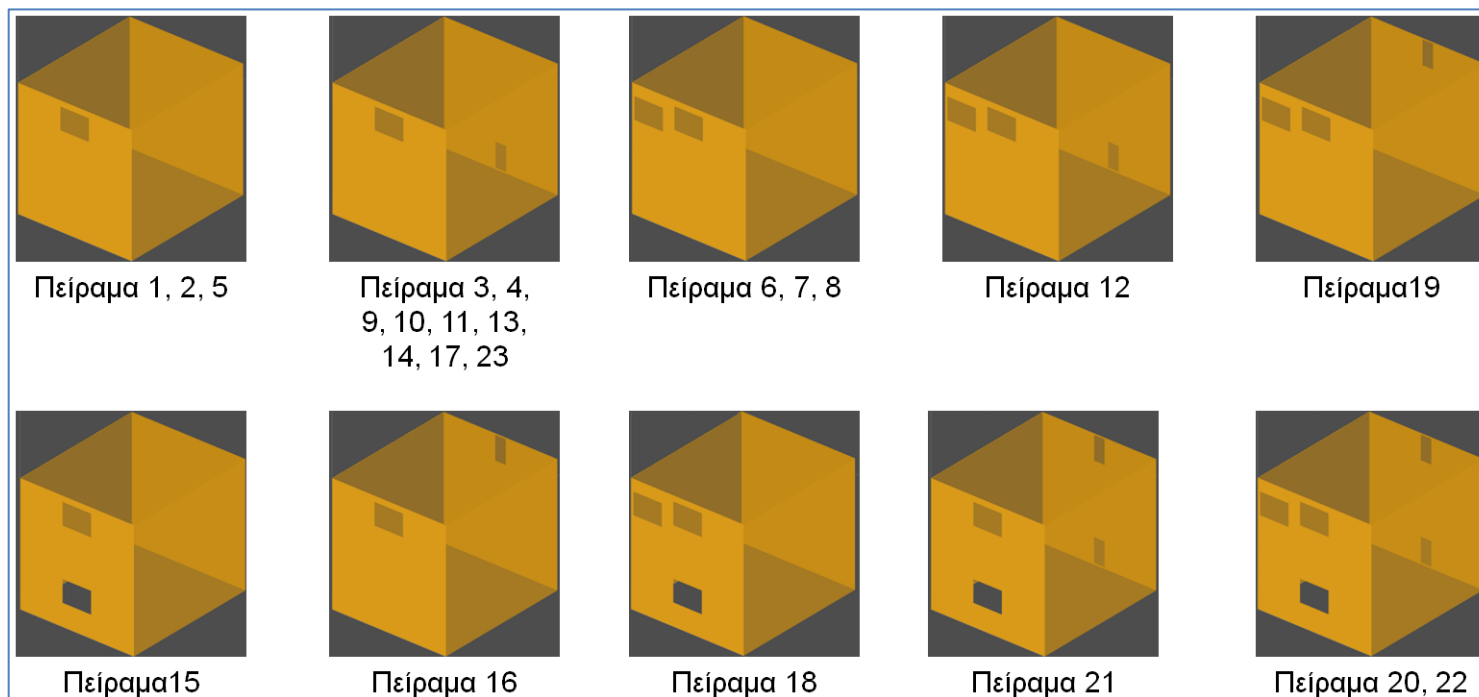
Πίνακας 1: Συνοπτικός πίνακας πειραμάτων φυσικού αερισμού

Πείραμα	Θερμοκρασία (K)	Πυκνότητα H ₂ (kg/m ³)	Ογκομετρική παροχή έκλυσης (l/min)	Μαζική παροχή έκλυσης (10 ⁻⁵ kg/s)	Συνολική μάζα H ₂ (10 ⁻² kg)	Διάταξη αερισμού	Επιφάνεια αερισμού (m ²)	Διάρκεια έκλυσης (s)	Θέση έκλυσης (mm)*	Διάμετρος έκλυσης (10 ⁻³ m)	Διάμετρος σωλήνα (m)	Ταχύτητα έκλυσης (10 ² m/s)
1	288,65	0,0851	40	5,674	6,81	1 (V1s)	0.35	1200	Y _{p_out}	1	1	8,48
2	288,65	0,0851	40	5,674	7,15	1 (V1s)	0.35	1260	Y _{p_out}	1	1	8,48
3	288,65	0,0851	40	5,674	6,81	2 (V1s+V2)	0.35+0.14	1200	Y _{p_out}	1	1	8,48
4	287,75	0,0854	40	5,691	6,83	2 (V1s+V2)	0.35+0.14	1200	Y _{p_out}	1	1	8,48
5	283,15	0,0868	40	5,784	5,21	1 (V1s)	0.35	900	Y _{p_out}	1	1	8,48
6	283,15	0,0868	40	5,784	6,94	3 (V1b)	0.70	1200	Y _{p_out}	1	1	8,48
7	293,15	0,0838	40	5,307	4,78	3 (V1b)	0.70	900	Z _{f_up}	1	1	8,06
8	293,15	0,0838	40	5,307	4,78	3 (V1b)	0.70	900	Y _{f_out}	1	1	8,06
9	293,15	0,0838	40	5,307	4,78	2 (V1s+V2)	0.35+0.14	900	Z _{f_up}	1	1	8,06
10	293,15	0,0838	40	5,307	4,78	2 (V1s+V2)	0.35+0.14	900	Y _{f_out}	1	1	8,06
13	288,65	0,0851	40	5,674	6,65	2 (V1s+V2)	0.35+0.14	1173	Z _{p_up}	1	6	8,48
14	290,15	0,0847	40	5,644	6,78	2 (V1s+V2)	0.35+0.14	1200	Z _{p_up}	1	6	8,48
15	293,15	0,0838	40	5,587	4,30	4 (V1s+V3)	0.35+0.35	770	Z _{p_up}	1	6	8,48
16	295,15	0,0832	40	5,549	4,99	5 (V1s+V4)	0.35+0.14	900	Z _{p_up}	1	6	8,48
17	295,65	0,0831	40	5,539	6,65	2 (V1s+V2)	0.35+0.14	1200	Z _{p_up}	1	6	8,48
11	290,85	0,0845	90	12,67	5,32	2 (V1s+V2)	0.35+0.14	365	Y _{p_out}	6	6	0,53
12	292,35	0,0840	90	12,60	4,70	6 (V1b+V2)	0.70+0.14	373	Y _{p_out}	6	6	0,53
18	298,15	0,0824	90	12,36	11,12	7 (V1b+V3)	0.70+0.35	900	Y _{p_out}	1	6	19
19	301,15	0,0816	90	12,24	11,01	8 (V1b+V4)	0.70+0.14	900	Z _{p_up}	6	6	0,53
20	302,15	0,0813	90	12,20	14,63	9 (V1b+V2+V3+V4)	0.70+0.35+0.14+0.14	1200	Z _{p_up}	6	6	0,53
21	302,15	0,0813	90	12,20	10,98	10 (V1b+V2+V4)	0.35+0.35+	900	Z _{p_up}	6	6	0,53

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

							0.14+0.14					
23	301,65	0,0814	90	12,22	14,66	2 (V1s+V2)	0.35+0.14	1200	Z _{p_up}	6	6	0,53
22	298,15	0,0824	180	24,72	14,83	9 (V1b+V2+V3+V4)	0.70+0.35+0.14+0.14	600	Z _{p_up}	6	6	1,06

* όπου Y_{p_out}: οριζόντια έκλυση μέσα στην ενεργειακή συστοιχία με κατεύθυνση προς τον περιβάλλοντα χώρο, Z_{p_up}: έκλυση μέσα στην ενεργειακή συστοιχία με κατακόρυφη προς τα πάνω κατεύθυνση, Z_{ε_up}: έκλυση στο χώρο εκτός της συστοιχίας με κατακόρυφη προς τα πάνω κατεύθυνση και Y_{ε_out}: οριζόντια έκλυση στο χώρο εκτός της συστοιχίας



Σχήμα 1: Διατάξεις ανοιγμάτων φυσικού αερισμού

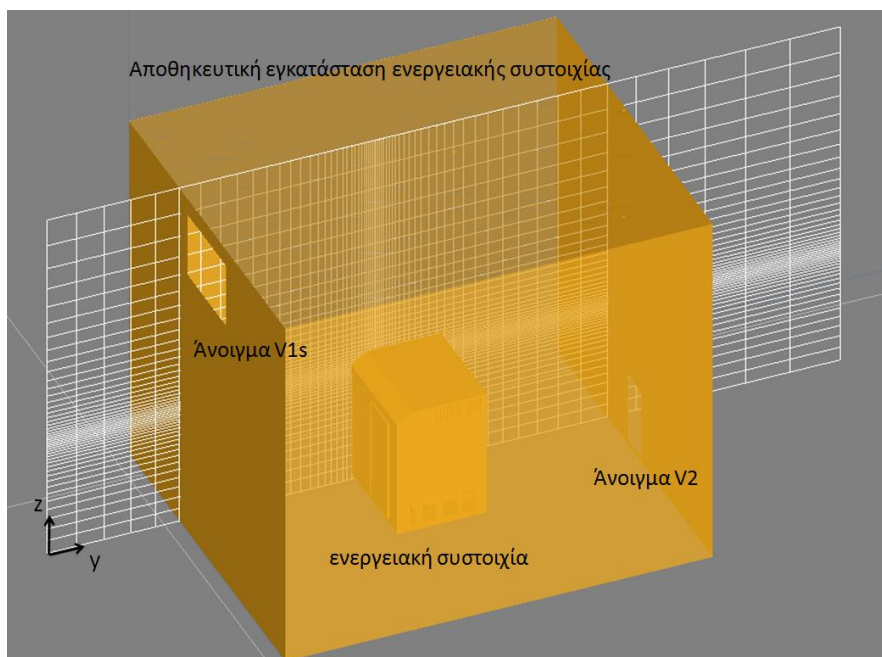
6.3 Προσομοίωση των πειραμάτων

Η αριθμητική επίλυση του πεδίου ροής έγινε με τον υπολογιστικό κώδικα ρευστομηχανικής ADREA-HF (Bartzis, 1991) ο οποίος βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου. Μελέτες επαλήθευσης του κώδικα ADREA-HF σε σενάρια έκλυσης και διασποράς H_2 καθώς επίσης και περιγραφή του κώδικα έχουν δημοσιευτεί από τους Venetsanos και συν. (2003), Gallego και συν. (2007), Papanikolaou και Venetsanos (2005) και Venetsanos και συν. (2010).

Μελετήθηκαν υπολογιστικά 10 από τα πειράματα έκλυσης H_2 με φυσικό αερισμό (Πειράματα 3, 5, 6, 14, 15, 16, 11, 12, 18 και 19). Τα πειράματα αυτά περιέλαβαν 2 από τις 3 εκλύσεις (40 και 90 l/min), 2 κατευθύνσεις έκλυσης μέσα από την ενεργειακή συστοιχία (μια οριζόντια κοντά στον ανεμιστήρα απαγωγής της ενεργειακής συστοιχίας και μια κατακόρυφη προς τα πάνω και κοντά στο πάνω μέρος της συστοιχίας) και 8 από τις 10 διαμορφώσεις ανοιγμάτων φυσικού αερισμού. Η προσομοίωση των πειραμάτων καθώς και η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του φυσικού αερισμού που παρουσιάζεται στη συνέχεια, αναφέρονται περιληπτικά στην εργασία των Papanikolaou και συν (2011).

6.3.1 Υπολογιστικό πεδίο

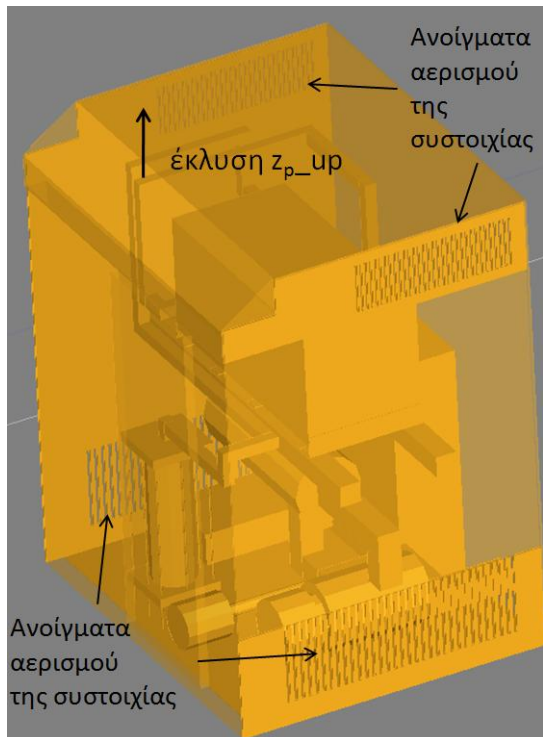
Η χωρική διακριτοποίηση έγινε σε καρτεσιανό υπολογιστικό πλέγμα. Η τεχνική του πορώδους μέσου και της επιφανειακής διαπερατότητας χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του υπολογιστικού πεδίου για την περιγραφή της πειραματικής γεωμετρίας κατηγοριοποιώντας τα υπολογιστικά κελιά σε πλήρως ενεργά (πορώδες 1), πλήρως δεσμευμένα από στερεά σώματα της γεωμετρίας (πορώδες 0) και μερικώς δεσμευμένα/ενεργά (πορώδες μεταξύ 0 και 1). Το υπολογιστικό πεδίο εκτεινόταν στην κατεύθυνση y όταν ο τοίχος της πειραματικής εγκατάστασης στο επίπεδο x-z περιελάμβανε ανοίγματα αερισμού (βλέπε Σχήμα 2).



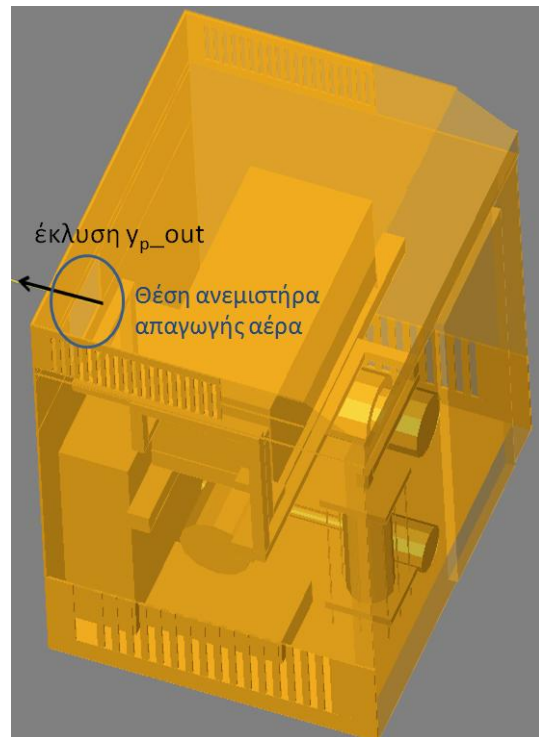
Σχήμα 2: Καρτεσιανό υπολογιστικό πλέγμα

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

Όλες οι λεπτομέρειες της διάταξης του εσωτερικού της ενεργειακής συστοιχίας συμπεριλήφθησαν στη γεωμετρική προεπεξεργασία προκειμένου να μελετηθεί η πιθανή συσσώρευση H_2 μέσα σ' αυτήν. Στις περιπτώσεις όπου η έκλυση είχε κατεύθυνση παράλληλη με τον άξονα y (βλέπε Σχήμα 4: κατεύθυνση y_{p_out}), το ελάχιστο μέγεθος κελιού ήταν κοντά στην έκλυση και σε κατεύθυνση παράλληλη των αξόνων x και z . Αντίστοιχα, όταν η έκλυση είχε κατεύθυνση παράλληλη με τον άξονα z (βλέπε Σχήμα 3: κατεύθυνση z_{p_up}), το ελάχιστο μέγεθος κελιού ήταν κοντά στην έκλυση και σε κατεύθυνση παράλληλη των αξόνων x και y .



Σχήμα 3: Εσωτερικό ενεργειακής συστοιχίας και θέση έκλυσης H_2 z_{p_up}



Σχήμα 4: Εσωτερικό ενεργειακής συστοιχίας και θέση έκλυσης H_2 y_{p_out}

Το ελάχιστο μέγεθος κελιού ήταν 0,012 m. Για εξοικονόμηση του υπολογιστικού κόστους, το μέγεθος των κελιών μακριά από την πηγή αυξανόταν με μέγιστο λόγο αύξησης ίσο με 1,12 στα κελιά που βρίσκονταν εκτός της ενεργειακής συστοιχίας. Ο συνολικός αριθμός των κελιών κυμάνθηκε από 130.000 έως 240.000 κατά περίπτωση. Η γεωμετρική προεπεξεργασία έγινε με τον κώδικα DELTA-B (Venetsanos και συν., 1995).

6.3.2 Καθορισμός βασικών εξισώσεων, αρχικών και οριακών συνθηκών ροής και αριθμητικής μεθοδολογίας επίλυσης

Για τον υπολογισμό του πεδίου ροής επιλύθηκαν αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου οι μη μόνιμες, τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις (για συμπιεστό ρευστό) διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας), ορμής μίγματος (για τις 3 συνιστώσες ταχύτητας) και κλάσματος μάζας H_2 . Η μοντελοποίηση της τύρβης

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

έγινε με το κλασσικό μοντέλο $k-\epsilon$ των Launder and Spalding (Launder and Spalding, 1974) λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίδραση της άνωσης.

Οι αρχικές συνθήκες ροής ήταν ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία με βάση τα πειραματικά δεδομένα (Πίνακας 1). Οι συνθήκες στην πηγή εξαρτήθηκαν επίσης από τα πειραματικά δεδομένα καθώς η ταχύτητα στην πηγή έλαβε τιμή τέτοια ώστε η προκύπτουσα μαζική παροχή έκλυσης H_2 να συμπίπτει με αυτήν του κάθε πειράματος που εξετάστηκε.

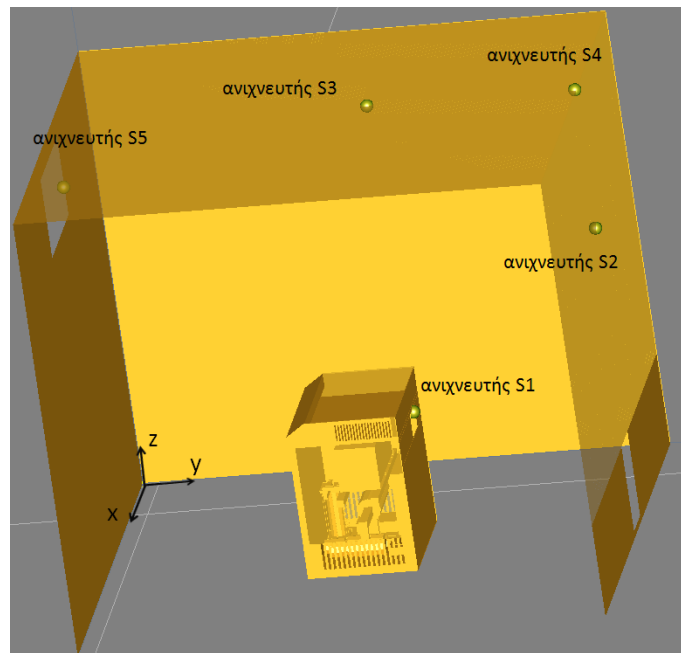
Θεωρήθηκε ότι όλα τα στερεά σώματα είχαν υδροδυναμική τραχύτητα ίση με 1 mm, στις δε επιφάνειές τους χρησιμοποιήθηκαν οι βασικές συναρτήσεις τοιχωμάτων για τον υπολογισμό της ταχύτητας (συνθήκη μη-ολίσθησης), της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της απορρόφησής της. Θεωρήθηκε επίσης ότι σε αυτές, η κάθετη παράγωγος του κλάσματος μάζας H_2 ήταν μηδέν (ομογενής συνθήκη Neumann). Η πίεση θεωρήθηκε σταθερή στο επίπεδο x-y του υπολογιστικού χωρίου (οροφή). Κατά συνέπεια, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στο επίπεδο x-y υπολογίστηκε από την εξίσωση μάζας. Για όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές θεωρήθηκε ότι η παράγωγός τους είναι μηδέν στην περίπτωση εκροής του ρευστού από το υπολογιστικό χωρίο και επιπλέον έλαβαν τιμή ίση με αυτήν τη χρονική στιγμή 0 στην περίπτωση εισροής του.

Το σχήμα ανάντη διαφορών 1^{ης} τάξης χρησιμοποιήθηκε για τη χωρική διακριτοποίηση των όρων μεταφοράς. Για τη χρονική διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε η 1^{ης} τάξεως πλήρως πεπλεγμένη (fully implicit 1st order) μέθοδος. Τέλος χρησιμοποιήθηκε μία αυτόματη διαδικασία μεταβολής του χρονικού βήματος με κριτήριο ευστάθειας λύσεως CFL=5 και με μέγιστο και αρχικό χρονικό βήμα ίσο με 10^{-1} s και 10^{-3} s αντίστοιχα.

6.3.3 Αποτελέσματα

Η σύγκριση των συγκεντρώσεων H_2 κατ' όγκο μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραματικών δεδομένων έγινε σε 5 σημεία του χώρου τα οποία απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5). Ο ανιχνευτής S1 τοποθετήθηκε πίσω από τη συστοιχία και στο κέντρο του ανεμιστήρα απαγωγής αέρα, τον οποίο οι πειραματιστές είχαν αφαιρέσει κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Οι ανιχνευτές S3 και S4 τοποθετήθηκαν κοντά στην οροφή και στο μέσο του χώρου κατά την x κατεύθυνση ενώ ο ανιχνευτής S5 τοποθετήθηκε ακριβώς στο κέντρο του ανοίγματος V1s. Τέλος, ο ανιχνευτής S2 βρισκόταν στο μέσον του ύψους του χώρου (z κατεύθυνση) και σε ίδια απόσταση κατά την x κατεύθυνση με τους ανιχνευτές S3 και S4.

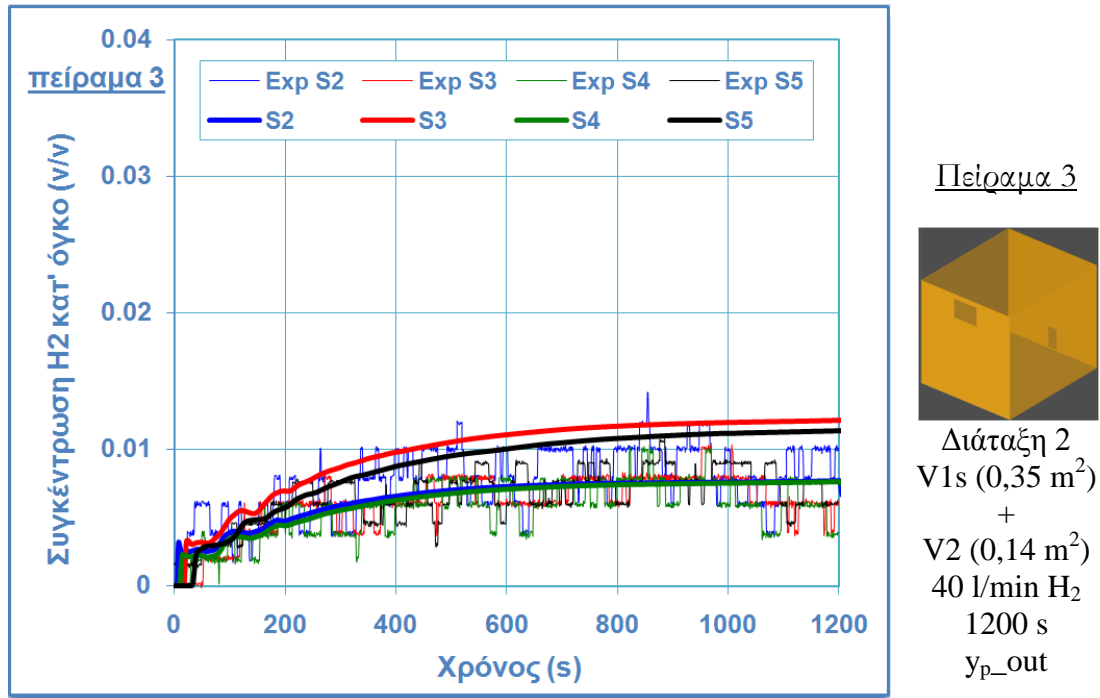
Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό



Σχήμα 5: Θέση ανιχνευτών συγκέντρωσης H_2

Τα παρακάτω σχήματα, από το Σχήμα 6 έως το Σχήμα 9 και από το Σχήμα 14 έως το Σχήμα 19, παρουσιάζουν τη χρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης H_2 κατ' όγκο στους ανιχνευτές S2, S3, S4 και S5 όλων των πειραμάτων που μελετήθηκαν υπολογιστικά. Ο ανιχνευτής S1 δεν χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα πειράματα λόγω των τεχνικών χαρακτηριστικών των ανιχνευτών. Οι ανιχνευτές είχαν εύρος ανίχνευσης από 0% έως 20% H_2 κατ' όγκο. Λόγω της θέσης του ανιχνευτή S1, στα περισσότερα πειράματα η συγκέντρωση H_2 ήταν κατά πολύ μεγαλύτερη με αποτέλεσμα ο ανιχνευτής S1 να «κορεσθεί», όπως ανέφεραν χαρακτηριστικά οι πειραματιστές.

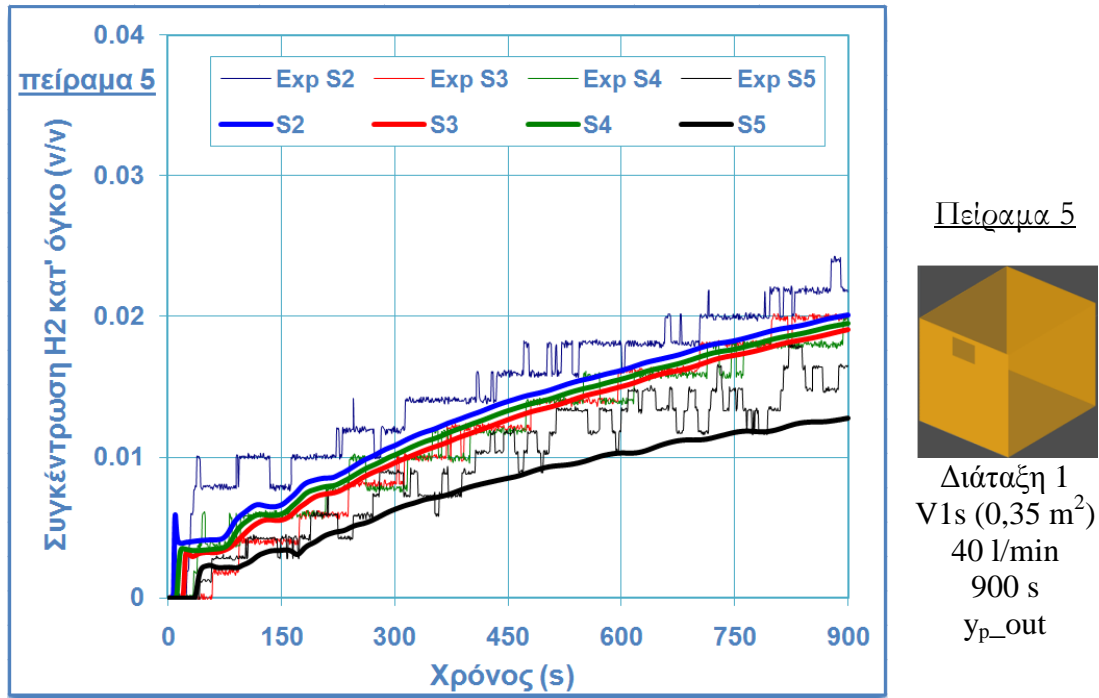
Στο Σχήμα 6 απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις H_2 κατ' όγκο του πειράματος 3. Τα αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά. Η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζεται στους ανιχνευτές S2 και S3 όπου οι μέσες πειραματικές τιμές είναι περίπου 0,01 και 0,008 ενώ οι αριθμητικές (σε συνθήκες σχεδόν μόνιμης κατάστασης) είναι 0,007 και 0,012 αντίστοιχα. Ωστόσο, η υποεκτίμηση του ανιχνευτή S2 και η υπερεκτίμηση του S3 βρίσκεται μέσα στα πλαίσια της ακρίβειας των μετρήσεων η οποία βάσει των τεχνικών προδιαγραφών των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 2% της μέγιστης τιμής που μπορεί να ανιχνευτεί δηλαδή 0,4% H_2 κατ' όγκο.



Σχήμα 6: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 3

Στο Σχήμα 7 φαίνονται οι συγκεντρώσεις H₂ κατ' όγκο του πειράματος 5. Τα αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά σε όλους τους ανιχνευτές με μεγαλύτερη απόκλιση αυτήν στον ανιχνευτή S5 η οποία όμως βρίσκεται και πάλι μέσα στα πλαίσια της ακρίβειας των μετρήσεων. Σύγκριση των συγκεντρώσεων αυτού του πειράματος με την προηγούμενη περίπτωση (Σχήμα 6) δείχνει ότι η διάταξη αερισμού 2 (1 άνοιγμα κοντά στην οροφή και 1 άνοιγμα κοντά στο δάπεδο στον απέναντι τοίχο) είναι πιο αποτελεσματική από την διάταξη 1 όπου χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα άνοιγμα κοντά στην οροφή ελεύθερης επιφάνειας 0,35 m². Στην περίπτωση του πειράματος 5, ο φρέσκος αέρας είναι δυνατόν να εισέλθει στο χώρο από το ίδιο άνοιγμα εκροής του μίγματος H₂/αέρα με αποτέλεσμα η αραιώση του μίγματος H₂/αέρα να είναι λιγότερο αποτελεσματική. Ωστόσο και στις 2 περιπτώσεις ο χώρος δεν χαρακτηρίζεται ως ζώνη 2 κατά ATEX εφόσον η συγκέντρωση του H₂ στον χώρο δεν υπερέβη τα 2% κατ' όγκο.

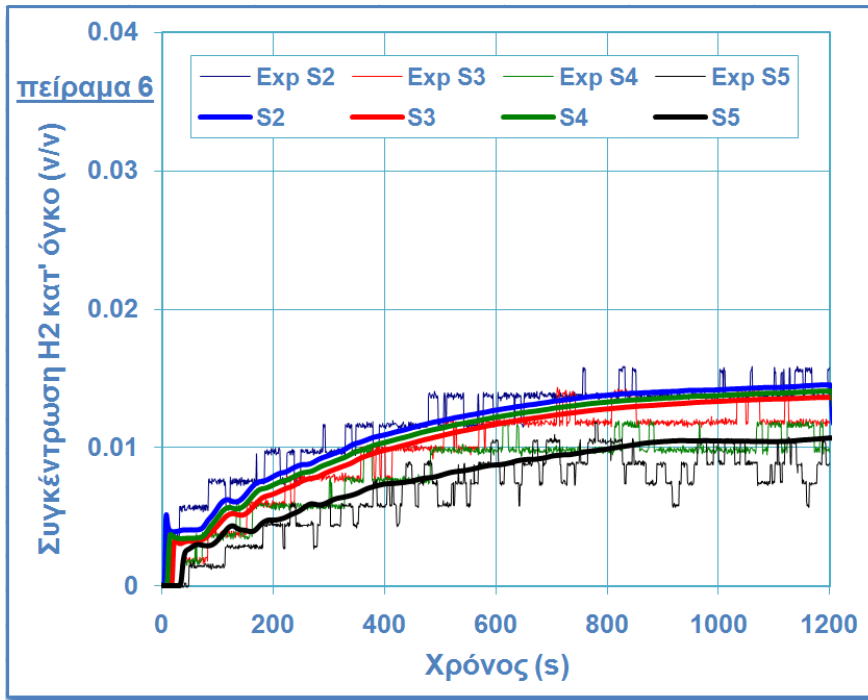
Στο Σχήμα 8 απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις H₂ κατ' όγκο του πειράματος 6. Τα αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται και πάλι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά σε όλους τους ανιχνευτές. Το πείραμα αυτό έχει 2 ανοίγματα κοντά στην οροφή με διπλάσια ελεύθερη επιφάνεια απ' αυτήν του προηγούμενου πειράματος (πειράμα 5). Όπως φαίνεται (και αναμένετο) από το Σχήμα 8, σε σύγκριση με αυτό του πειράματος 5 (Σχήμα 7) διπλασιάζοντας την επιφάνεια του ανοίγματος αερισμού αυξάνεται η αποτελεσματικότητα του αερισμού καθώς οι συγκεντρώσεις H₂ στους ανιχνευτές μειώθηκαν έως και περίπου 30%. Παρόλα αυτά, η διάταξη 2 του πειράματος 3 παραμένει η πιο αποτελεσματική ανάμεσα στις 3 διατάξεις.



Σχήμα 7: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 5

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις H₂ κατ' όγκο του πειράματος 14. Το πείραμα αυτό διαφέρει από το πείραμα 3 μόνο στην κατεύθυνση της έκλυσης H₂ η οποία αυτήν την φορά ήταν κατακόρυφη προς τα πάνω. Οι συγκεντρώσεις H₂ είναι μεγαλύτερες από αυτές του πειράματος 3 και διαφέρουν μεταξύ τους περισσότερο υποδηλώνοντας εντονότερη διαστρωμάτωση στο χώρο. Συγκεκριμένα, σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, οι τιμές των συγκεντρώσεων H₂ της αριθμητικής λύσης του πειράματος 14 είναι 0,006, 0,016, 0,009 και 0,014 στις θέσεις S2, S3, S4 και S5 (διαφορά μέγιστης με ελάχιστης τιμής περίπου 60%) ενώ οι αντίστοιχες του πειράματος 3 είναι 0,007, 0,011, 0,007 και 0,011 (διαφορά μέγιστης με ελάχιστης τιμής περίπου 35%). Θα περίμενε κανείς οι συγκεντρώσεις H₂ του πειράματος 3 να είναι μεγαλύτερες, εφόσον σ' αυτήν την περίπτωση το H₂ εκλύεται οριζόντια και με κατεύθυνση προς το χώρο εγκατάστασης/υποδοχής και ως εκ τούτου δεν παραμένει στη συστοιχία (βλέπε Σχήμα 11). Επίσης, η ταχύτητα του εκλυόμενου H₂ κατά την έξοδο της συστοιχίας είναι μεγαλύτερη από αυτήν στην περίπτωση του πειράματος 14 (βλέπε Σχήμα 13).

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

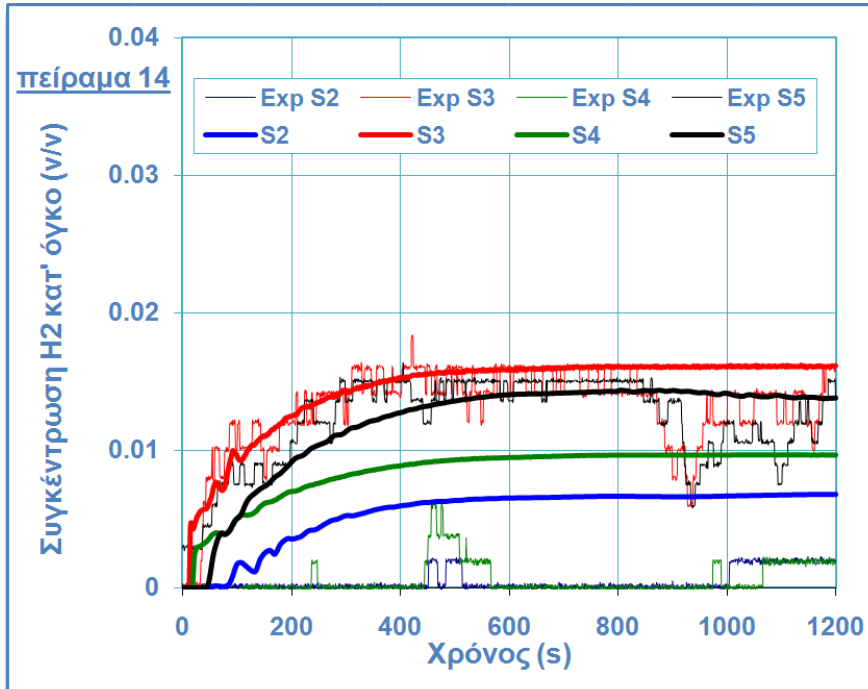


Πείραμα 6



Διάταξη 3
V1b (0,70 m²)
40 l/min
1200 s
y_{p_out}

Σχήμα 8: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 6



Πείραμα 14

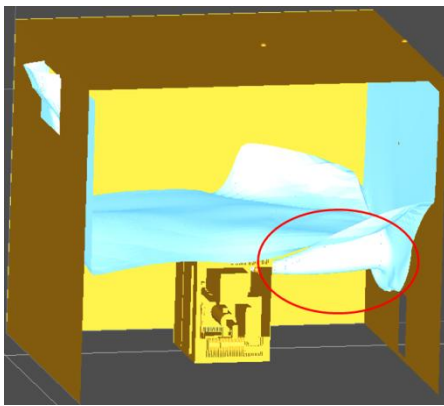


Διάταξη 2
V1s (0,35 m²)
+
V2 (0,14 m²)
40 l/min H₂
1200 s
z_{p_up}

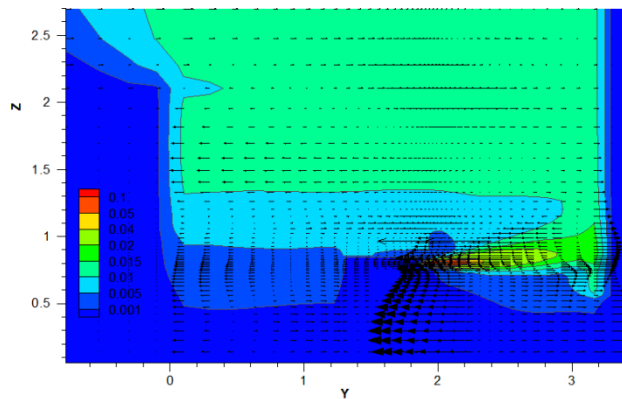
Σχήμα 9: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 14

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

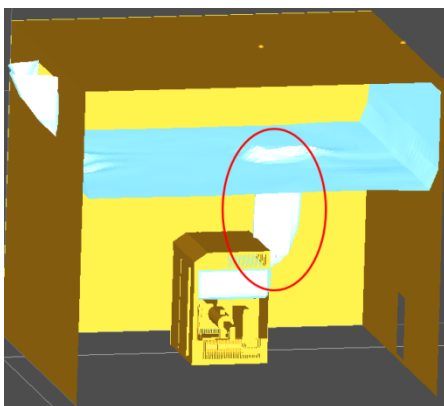
Το H_2 στο πείραμα 3 εξέρχεται από τη συστοιχία και προσκρούει στον απέναντι τοίχο (βλέπε Σχήμα 10 και Σχήμα 11) με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τυρβώδης κινητική ενέργεια στο χώρο. Αύξηση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας συνεπάγεται καλύτερη ανάμιξη του H_2 με τον αέρα και κατά συνέπεια μικρότερες συγκεντρώσεις στο χώρο και ασθενέστερη διαστρωμάτωση (βλέπε Σχήμα 11 σε σχέση με το Σχήμα 13). Στην περίπτωση του πειράματος 14, ενώ κάποιο ποσοστό H_2 παραμένει δεσμευμένο μέσα στη συστοιχία ακόμα και μετά από 900 s από την έκλυση και σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από το LFL του H_2 (βλέπε Σχήμα 13), ένα άλλο ποσοστό με την έξοδό του από την συστοιχία ανέρχεται προς την οροφή (βλέπε Σχήμα 12). Οι ταχύτητες που αναπτύσσονται σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερες από αυτές του πειράματος 3 με αποτέλεσμα η συγκέντρωση του H_2 (ιδιαίτερα στην οροφή του χώρου) να είναι μεγαλύτερη από αυτήν του πειράματος 3 ενώ παράλληλα λόγω της μικρότερης κινητικής ενέργειας στο χώρο, εμφανίζεται



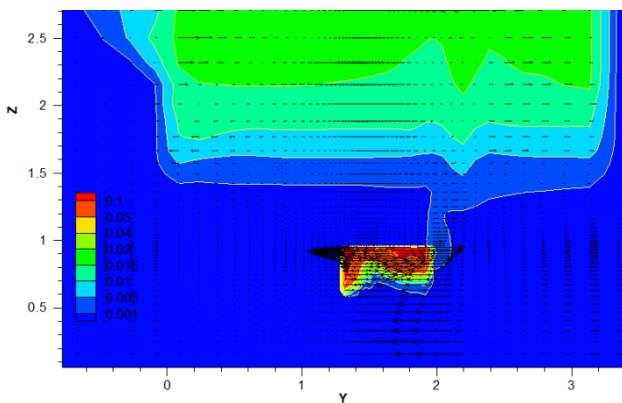
Σχήμα 10: Ισο-επιφάνεια 1% H_2 πειράματος 3 σε χρόνο 900 s από την έκλυση



Σχήμα 11: Κατανομή συγκεντρώσεων H_2 και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο $y-z$ διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 900 s από την έκλυση (πείραμα 3) (Tecplot 8.0)



Σχήμα 12: Ισο-επιφάνεια 1% H_2 πειράματος 14 σε χρόνο 900 s από την έκλυση

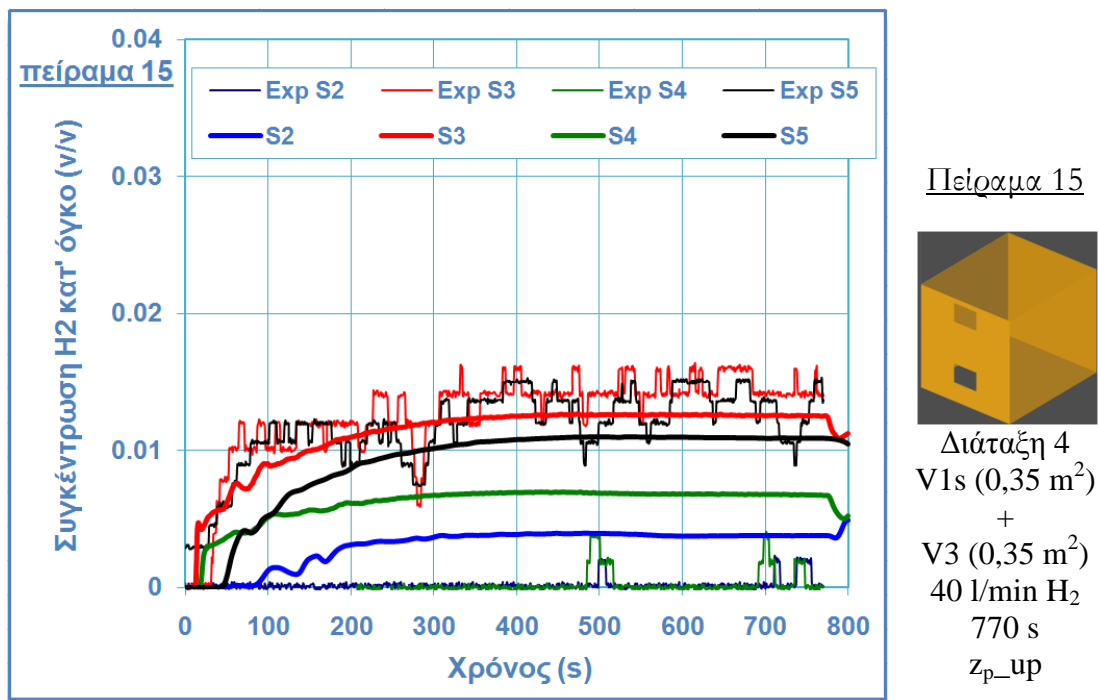


Σχήμα 13: Κατανομή συγκεντρώσεων H_2 και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο $y-z$ διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 900 s από την έκλυση (πείραμα 14) (Tecplot 8.0)

εντονότερα το φαινόμενο της διαστρωμάτωσης.

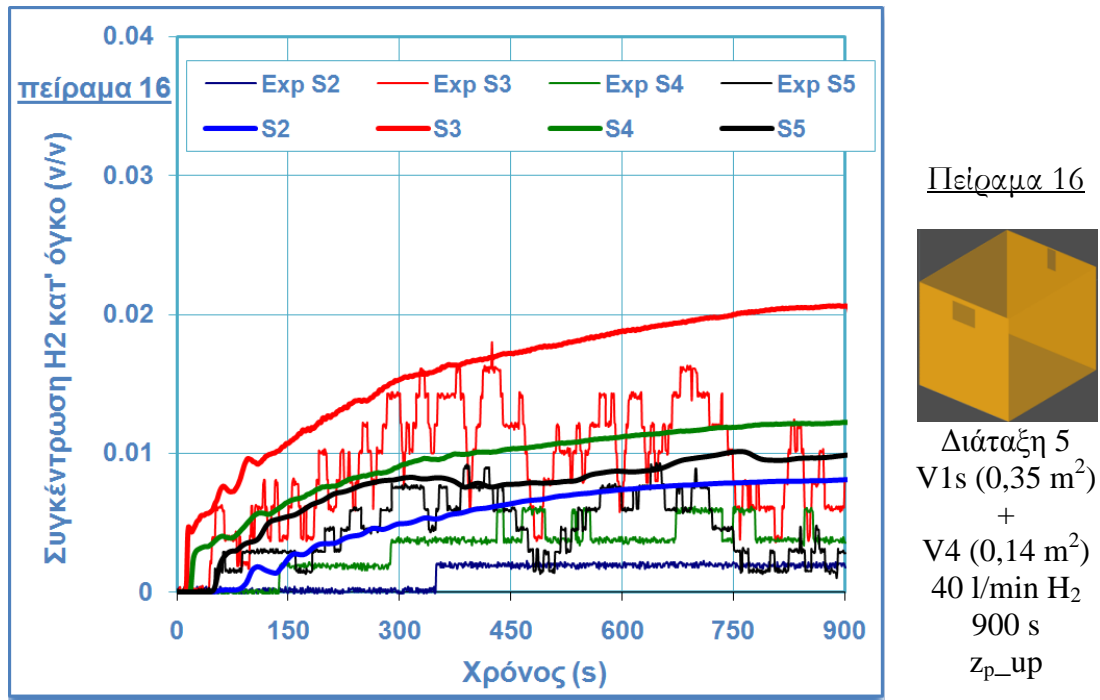
Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

Στο Σχήμα 14 απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις H_2 κατ' όγκο του πειράματος 15. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά με μεγαλύτερη απόκλιση στους ανιχνευτές S2 και S4, στα πλαίσια όμως της ακριβείας των ανιχνευτών. Το πείραμα αυτό διαφέρει από το πείραμα 14 μόνο στην διάταξη αερισμού. Σε αυτήν την περίπτωση τα ανοίγματα κοντά στην οροφή και στο δάπεδο βρίσκονται στον ίδιο τοίχο ενώ επιπλέον το άνοιγμα κοντά στο δάπεδο έχει επιφάνεια 2,5 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του πειράματος 14. Σύγκριση των συγκεντρώσεων H_2 των 2 πειραμάτων (Σχήμα 9 και Σχήμα 14) δείχνει ότι η διάταξη 4 είναι αποτελεσματικότερη από τη διάταξη 2. Ωστόσο οι συγκεντρώσεις H_2 δεν μειώθηκαν κατ' αναλογία με την αύξηση της επιφάνειας του κάτω ανοίγματος.



Σχήμα 14: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 15

Στο Σχήμα 15 φαίνονται οι συγκεντρώσεις H_2 κατ' όγκο του πειράματος 16. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ήταν σε σχετικά καλή συμφωνία με τα πειραματικά. Η μεγαλύτερη απόκλιση ήταν στη θέση S4 (η οποία βρισκόταν κοντά στο άνοιγμα αερισμού V4) μετά από 450 s από την έκλυση όπου η συγκέντρωση H_2 υπερεκτιμήθηκε κατά περίπου 40%. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ η πειραματική εγκατάσταση βρισκόταν σε ανοιχτό χώρο, η επίδραση του ανέμου δεν ελήφθη υπ' όψιν στις προσομοιώσεις καθώς δεν υπήρχαν λεπτομερή πειραματικά δεδομένα και επειδή οι πειραματιστές σχολίασαν ότι ο άνεμος κατά τη διάρκεια των περισσότερων πειραμάτων ήταν αρκετά ασθενής. Ωστόσο, σ' αυτήν την περίπτωση όπου και τα 2 ανοίγματα βρίσκονται στην οροφή έστω και ένας ασθενής άνεμος με κατεύθυνση $-y$ θα μπορούσε να επηρεάσει τη συγκέντρωση H_2 στη θέση S4 η οποία παρουσίαζε απροσδόκητη μείωση από 0,014 στα 461 s σε 0,004 στα 481 s (δηλαδή 3.5 φορές). Το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται περίπου στα 750 s στην ίδια θέση (S4) αλλά και στη θέση S5 τις ίδιες περίπου χρονικές στιγμές.

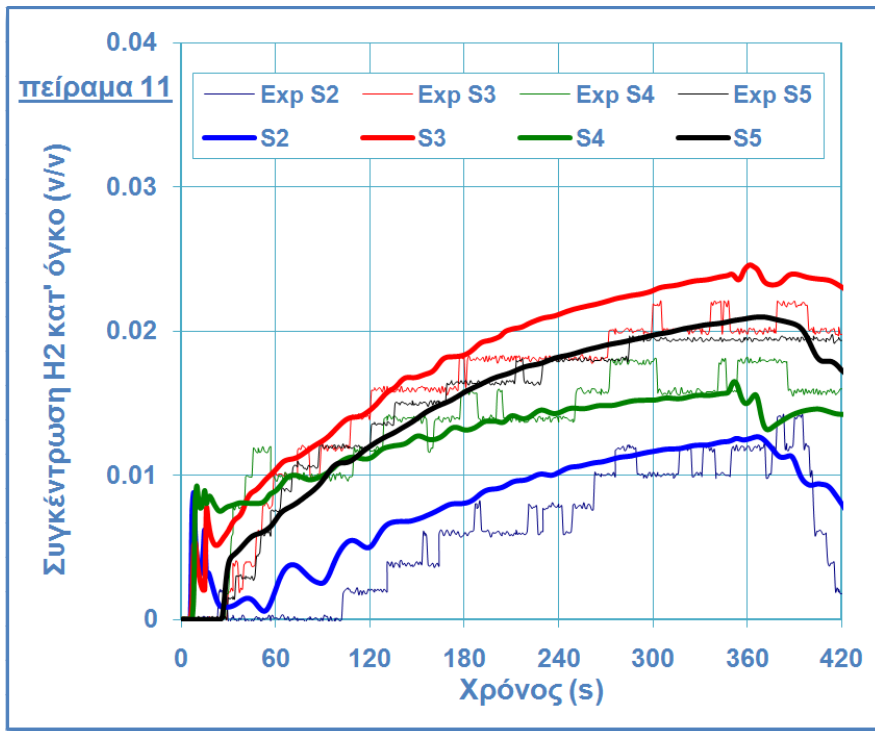


Σχήμα 15: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 16

Στο Σχήμα 16 απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις H_2 κατ' όγκο του πειράματος 11. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά. Το πείραμα 11 διαφέρει από το πείραμα 3 μόνο στην παροχή έκλυσης H_2 η οποία από 40 l/min (πείραμα 3) αυξήθηκε στα 90 l/min (πείραμα 11). Σύγκριση των συγκεντρώσεων H_2 μεταξύ των 2 πειραμάτων δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις του πειράματος 11 σχεδόν διπλασιάστηκαν. Σε αυτήν την περίπτωση και εν αντιθέσει με το πείραμα 3 ο χώρος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ζώνη 2 εφόσον η συγκέντρωση του H_2 σε 2 σημεία (S3 και S5) αγγίζει τα 2% κατ' όγκο.

Στο Σχήμα 17 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις H_2 κατ' όγκο του πειράματος 12. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά. Το πείραμα 12 διαφέρει από το 11 μόνο στη διάταξη αερισμού. Σε αυτήν την περίπτωση διπλασιάστηκε η επιφάνεια του ανοίγματος κοντά στην οροφή (από 0,35 m² σε 0,70 m²). Σύγκριση των συγκεντρώσεων H_2 μεταξύ των 2 πειραμάτων δείχνει ότι ο διπλασιασμός αυτός δεν μείωσε κατ' αναλογία τις συγκεντρώσεις. Η μείωση κυμάνθηκε από 13 % (στη θέση S3) έως 25% (στη θέση S2) στα 350 s. Τέλος, η μεγαλύτερη συγκέντρωση H_2 στο πείραμα 12 αγγίζει οριακά τα 2% κατ' όγκο.

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις H_2 κατ' όγκο του πειράματος 18. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά. Σε σύγκριση με το πείραμα 12, η μεγαλύτερη επιφάνεια αερισμού κοντά στο έδαφος ελάττωσε περισσότερο τις συγκεντρώσεις H_2 .

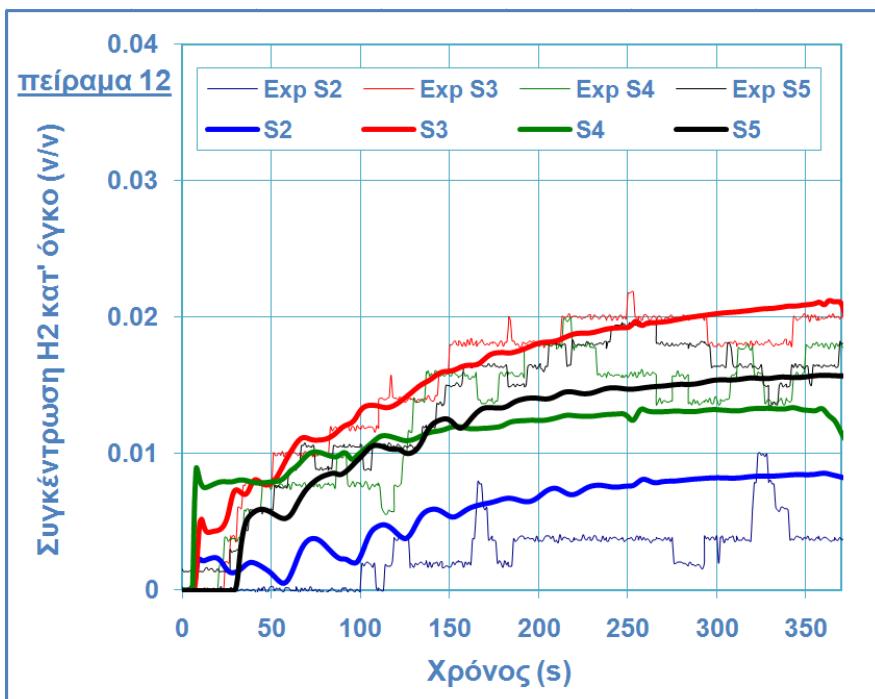


Πείραμα 11



Διάταξη 2
V1s (0,35
m²) + V2
(0,14 m²)
90 l/min
365 s
y_{p_out}

Σχήμα 16: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 11



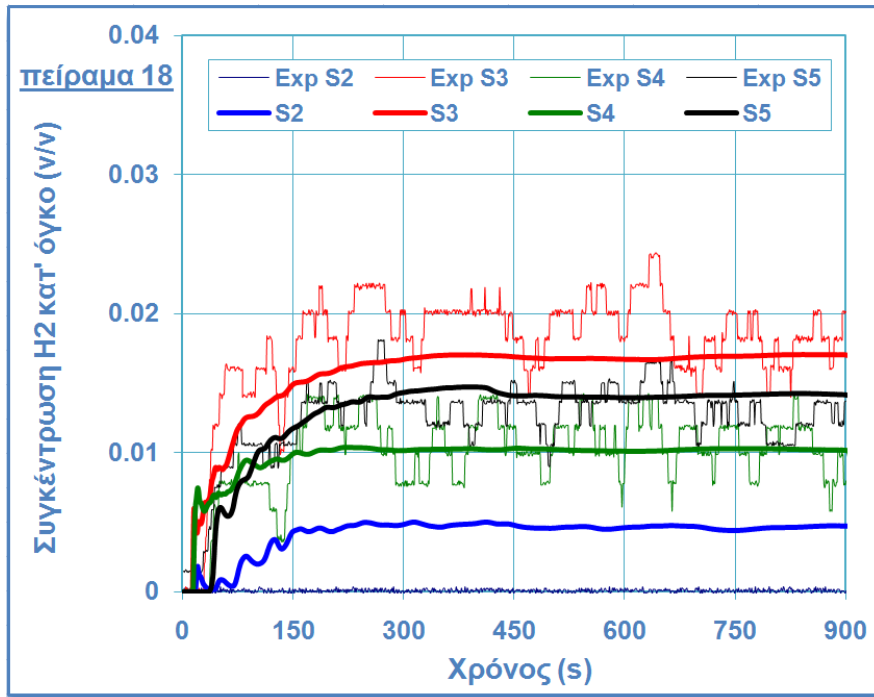
Πείραμα 12



Διάταξη 6
V1b (0,70
m²) + V2
(0,14 m²)
90 l/min
373 s
y_{p_out}

Σχήμα 17: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 12

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

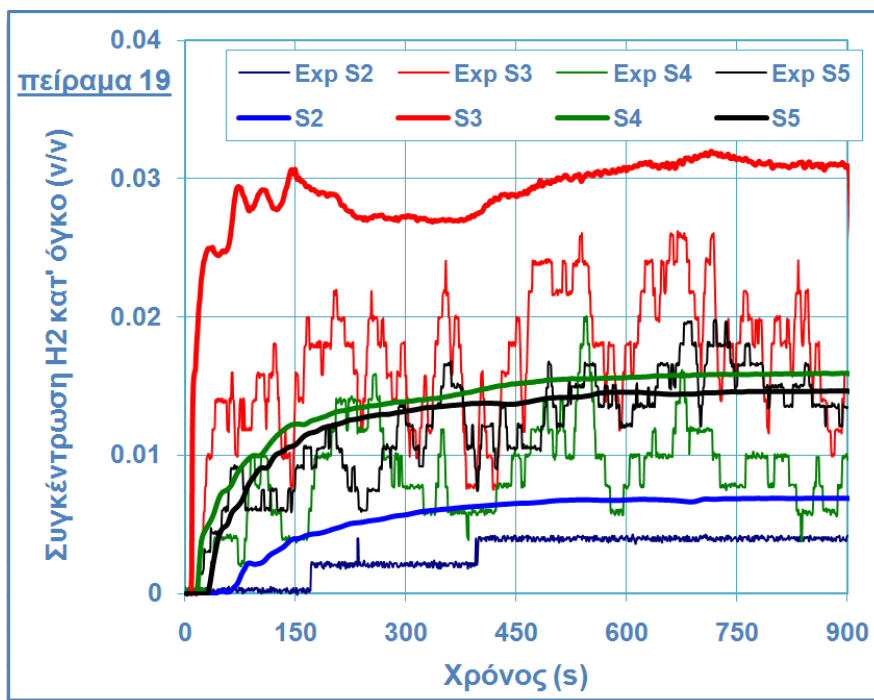


Πείραμα 18



Διάταξη 7
V1b (0,70
m²) + V3
(0,35 m²)
90 l/min
900 s
z_{p-up}

Σχήμα 18: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 18



Πείραμα 19



Διάταξη 8
V1b (0,70
m²) + V4
(0,14 m²)
90 l/min
900 s
z_{p-up}

Σχήμα 19: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων πειράματος 19

Τέλος, στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις H₂ κατ' όγκο του πειράματος 19. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά εκτός από τη θέση S3 όπου η υπερεκτίμηση της προσομοίωσης

ήταν περίπου 50% (ενδεικτικά στα 600 s). Σε αυτήν την περίπτωση τα ανοίγματα αερισμού βρίσκονται μόνο κοντά στην οροφή του κτιρίου όπως και στην περίπτωση του πειράματος 16 όπου σημειώθηκε μεγάλη υπερεκτίμηση στη θέση S3. Ομοίως με το πείραμα 16, η συγκέντρωση H_2 στη θέση S4 όπως μετρήθηκε πειραματικά παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, π.χ. εμφανίζεται μείωση κατά περίπου 65% από τα 353 s στα 395 s και περίπου 40% από τα 713 s στα 720 s. Το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται στις θέσεις S3 και S5. Είναι πιθανό και πάλι, ακόμα και ένας ασθενής άνεμος να προκάλεσε αυτές τις διακυμάνσεις, πράγμα που δεν εμφανίζεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

6.4 Γενική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του φυσικού αερισμού

Οι Barley και συν. (2007) και Barley and Gawlik (2009) επιχείρησαν τον συσχετισμό των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού με τη συγκέντρωση εκλύομένου H_2 , το σχετικό ύψος και το συντελεστή παροχής των ανοιγμάτων και τον παράγοντα διαστρωμάτωσης f ο οποίος είναι ο λόγος της συγκέντρωσης H_2 κοντά στην οροφή του κτιρίου προς την μέση συγκέντρωση H_2 σε όλο το κτίριο. Λεπτομερής περιγραφή των πειραμάτων αλλά και της αναλυτικής μελέτης του φυσικού αερισμού δίνεται στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου. Στις δημοσιεύσεις χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο, με την υπόθεση μόνιμης κατάστασης και ισοθερμοκρασιακών συνθηκών. Τα ανοίγματα θεωρήθηκαν ότι βρίσκονται στον ίδιο τοίχο με ίδια επιφάνεια A και συντελεστή παροχής αερισμού C_d . Επίσης, έγινε η υπόθεση ότι η συγκέντρωση H_2 στο χώρο ενώ μπορεί να μεταβάλλεται καθ' ύψος, είναι ομοιογενής οριζοντίως. Τέλος, ο αερισμός μέσω των ανοιγμάτων προκαλείται μόνο από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου λόγω της έκλυσης του H_2 ενώ άλλα φαινόμενα που μπορεί να τον επηρεάσουν (όπως η ορμή που δημιουργείται κατά την ανοδική κίνηση της δέσμης έκλυσης η οποία εκτρέπεται κατά την πρόσκρουσή της με την οροφή και η αύξηση της θερμοκρασίας του H_2 κατά την εκτόνωσή του στο σημείο έκλυσης – inverse Joule-Thomson effect) θεωρήθηκαν αμελητέα. Τα πειραματικά αποτελέσματα συνειρήθησαν με αυτά του απλοποιημένου μοντέλου σε διάφορες συνθήκες έκλυσης He αποτυπώνοντας γραφικά την συγκέντρωση He κοντά στην οροφή ως προς τον παράγοντα μεγέθους αερισμού F . Όπως φάνηκε από τη σύγκριση, η σχέση που προέκυψε περιέγραφε επαρκώς τη συνθήκη που συνδέει τον παράγοντα F με τον παράγοντα διαστρωμάτωσης f και τη συγκέντρωση c_T του H_2 κοντά στην οροφή του κτιρίου.

Κατ' αναλογία με τη δημοσίευση των Barley and Gawlik (2009), παρουσιάζεται παρακάτω μια εκτίμηση του αερισμού των πειραμάτων της ενεργειακής συστοιχίας συσχετίζοντας την ογκομετρική παροχή αερισμού (Q_{in}) με την ογκομετρική έκλυση H_2 (Q_{H_2}) και τη συγκέντρωση H_2 κοντά στο άνοιγμα V1s (θέση ανιχνευτή S5). Για την εκτίμηση θεωρήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο μηδενικής διάστασης μόνιμης κατάστασης και αρχικά πλήρους ανάμιξης H_2 με τον περιβάλλοντα αέρα (βλέπε Σχήμα 20, αριστερά):

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

$$\text{Ισοζύγιο μάζας H}_2: \rho_{H_2} Q_{H_2} = q_{out} \rho_{out} Q_{out} \quad (1)$$

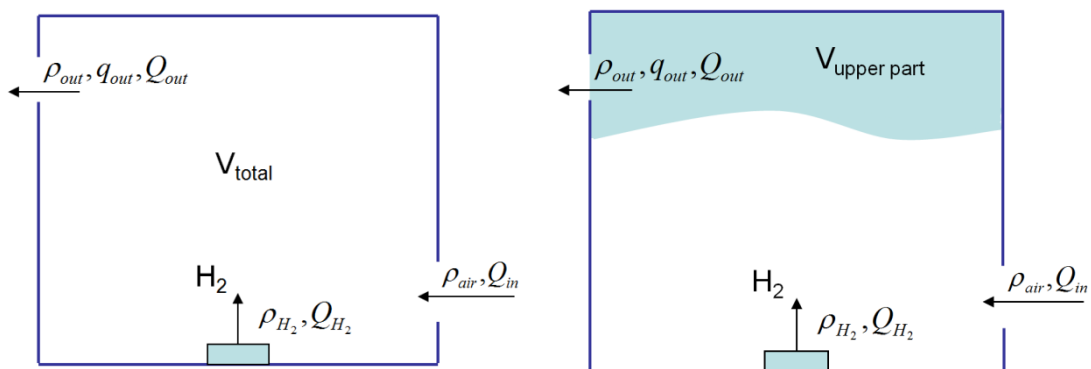
$$\text{Ολικό ισοζύγιο μάζας: } \rho_{air} Q_{in} + \rho_{H_2} Q_{H_2} = \rho_{out} Q_{out} \quad (2)$$

$$\text{Πυκνότητα μίγματος κοντά στην οροφή: } \frac{1}{\rho_{out}} = \frac{q_{out}}{\rho_{H_2}} + \frac{1-q_{out}}{\rho_{air}} \quad (3)$$

$$\text{Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) καταλήγουμε στη σχέση: } c_T = \frac{Q_{H_2}}{Q_{H_2} + Q_{in}} \quad (4)$$

Θεωρώντας ότι μόνο κοντά στην οροφή (και κατ' επέκταση στο άνοιγμα V1s) η συγκέντρωση H₂ είναι ομοιογενής, τότε $c_T^* = \frac{V_{H_2}}{V_{upper\ part}} \xrightarrow{f = \frac{V_{upper\ part}}{V_{total}}} c_T^* = \frac{V_{H_2}}{f V_{total}}$ και τελικά η σχέση (4), για την περίπτωση ανάμιξης H₂ με τον αέρα κοντά στην οροφή (βλέπε Σχήμα 20, δεξιά), παίρνει τη μορφή:

$$c_T^* = \frac{1}{f} \frac{Q_{H_2}}{Q_{H_2} + Q_{in}} \quad (5)$$



Σχήμα 20: Σχηματική αναπαράσταση του απλοποιημένου μοντέλου; Αριστερά: πλήρης ανάμιξη H₂ με τον περιβάλλοντα αέρα, Δεξιά: μερική ανάμιξη H₂ με τον περιβάλλοντα αέρα

Η εκτίμηση του αερισμού έγινε χρησιμοποιώντας τα πειραματικά αποτελέσματα σε σύγκριση με αυτά των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση χρήσης των πειραματικών μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές τιμές συγκέντρωσης H₂ του ανιχνευτή S5 ως c_T^* ενώ για την παροχή Q_{H₂} χρησιμοποιήθηκαν οι παροχές έκλυσης H₂ των πειραμάτων (Πίνακας 1). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δεν μετρήθηκε η παροχή αερισμού στα διάφορα ανοίγματα. Για τον υπολογισμό του Q_{in} χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις οι οποίες προέκυψαν από τη θεωρία του Κεφαλαίου 2: Το φυσικό πρόβλημα – υποκεφάλαιο: Φυσικός αερισμός και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της παροχής αερισμού λόγω διαφοράς πυκνότητας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος:

Πειράματα με 1 μόνο άνοιγμα (πείραμα 5) ή πειράματα με ανοίγματα μόνο κοντά στην οροφή (πειράματα 6, 16, 12 και 19):

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

$$Q_{in} = C_d \frac{A}{2} \left(gh \frac{\rho_{avg}(\rho_{air} - \rho_{avg})}{\rho_{air}(\rho_{aver} + \rho_{air})} \right)^{0.5} \quad (6)$$

Πειράματα με ανοίγματα κοντά στην οροφή και το δάπεδο (πειράματα 3, 14, 15, 11, 12 και 18):

$$Q_{in} = C_d A_1 A_2 \left(2gh \frac{\rho_{air} - \rho_{avg}}{\rho_{air}(\rho_{avg} A_2^2 + \rho_{air} A_1^2)} \right)^{0.5} \quad (7)$$

Όπως φαίνεται από την τελευταία σχέση λαμβάνονται υπ' όψιν τυχόν διαφορές των επιφανειών των άνω ανοιγμάτων με τα κάτω (A_1 και A_2). Για τον υπολογισμό της μέσης πυκνότητας στο χώρο, έγινε χρήση των παρακάτω σχέσεων:

$$\rho_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_{zi} V_i}{\sum_{i=1}^k V_i} \quad (8)$$

$$\rho_{zi} = \rho_{H_2} c_{H_2,zi} + \rho_{air} (1 - c_{H_2,zi}) \quad (9)$$

Για τον υπολογισμό λοιπόν της μέσης συγκέντρωσης ρ_{avg} ο συνολικός όγκος του χώρου χωρίστηκε σε όγκους V_i κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση z_i όπου θεωρήθηκε ότι σε κάθε έναν από αυτούς η πυκνότητα του μίγματος H_2 /αέρα ρ_{zi} είναι ομοιογενής. Για τον υπολογισμό των ρ_{zi} χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές συγκέντρωσης $c_{H_2,zi}$ όπως μετρήθηκαν πειραματικά στους ανιχνευτές S2, S3 και S4. Για τον προσδιορισμό του ύψους z_i των όγκων V_i χρησιμοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις των πειραμάτων όπου σε αυτές είχαν ληφθεί οι τιμές των συγκεντρώσεων H_2 σε 75 σημεία μέσα στο χώρο.

Πίνακας 2: Τιμές παροχής αερισμού Q_{in} , συγκέντρωσης H_2 στη θέση S5 και μέσης πυκνότητας ρ_{avg} από πειραματικά δεδομένα και

Πείραμα	Διάταξη αερισμού	Μέση πυκνότητα ρ_{avg} (kg/m ³)	Παροχή αερισμού Q_{in} (m ³ /s)	Παροχή έκλυσης Q_{H_2} (10 ⁻⁴ m ³ /s)	Συγκέντρωση H_2 % κατ' όγκο στη θέση S5 (πειράματα)	Συγκέντρωση H_2 % κατ' όγκο στη θέση S5 (προσομοιώσεις)
3	2	1,213	0,044	6,67	0,70	1,11
5	1	1,234	0,018	6,67	1,50	1,27
6	3	1,237	0,031	6,67	0,95	1,05
14	2	1,210	0,036	6,67	1,35	1,45
15	4	1,198	0,058	6,67	1,25	1,1
16	5	1,191	0,016	6,67	0,75	1,01
11	2	1,202	0,047	15	1,90	2,04
12	6	1,197	0,049	15	1,80	1,47
18	7	1,176	0,084	15	1,45	1,36
19	8	1,164	0,034	15	1,75	1,47

Στην περίπτωση χρήσης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων,

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

χρησιμοποιήθηκαν οι αριθμητικές τιμές συγκέντρωσης H_2 του ανιχνευτή S5 ως c_T^* ενώ για την παροχή Q_{H_2} χρησιμοποιήθηκαν οι παροχές έκλυσης H_2 των πειραμάτων (Πίνακας 1). Υπολογίστηκαν αριθμητικά οι παροχές εισαγωγής αέρα και απαγωγής μίγματος $H_2/αέρα$ σε κάθε άνοιγμα χωριστά, οι οποίες παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 3 και Πίνακας 4). Στους πίνακες φαίνεται επίσης η συνολική παροχή εισαγωγής αέρα Q_m , προκύπτουσα από το άθροισμα των επιμέρους παροχών σε όλα τα ανοίγματα.

Πίνακας 3: Τιμές παροχής εισαγωγής φρέσκου αέρα και απαγωγής μίγματος $H_2/αέρα$ προσομοιώσεων πειραμάτων έκλυσης H_2 40 l/min

Παροχή ($10^{-3} m^3/s$)	Πείραμα 3	Πείραμα 5	Πείραμα 6	Πείραμα 14	Πείραμα 15	Πείραμα 16
Εισαγωγή από V1	0,69	25,85	12,72	3,13	0	26,31
Απαγωγή από V1	56,1	26,32	33,17	42,8	60,41	21,18
Εισαγωγή από V1_2			33,75			
Απαγωγή από V1_2			13,91			
Εισαγωγή από V2	54,7			39,02		
Απαγωγή από V2	0			0		
Εισαγωγή από V3					59,72	
Απαγωγή από V3					0	
Εισαγωγή από V4						5,75
Απαγωγή από V4						11,36
Συνολική εισαγωγή	55,4	25,9	46,5	42,1	59,7	32,1

Πίνακας 4: Τιμές παροχής εισαγωγής φρέσκου αέρα και απαγωγής μίγματος $H_2/αέρα$ προσομοιώσεων πειραμάτων 90 l/min έκλυσης H_2

Παροχή ($10^{-3} m^3/s$)	Πείραμα 11	Πείραμα 12	Πείραμα 18	Πείραμα 19
Εισαγωγή από V1	4,71	4,35	0,17	21,06
Απαγωγή από V1	61,47	43,38	60,94	34,29
Εισαγωγή από V1_2		22,59	15,69	42,34
Απαγωγή από V1_2		27,38	40,84	15,53
Εισαγωγή από V2	55,36	42,71		
Απαγωγή από V2	0	0		
Εισαγωγή			84,42	

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

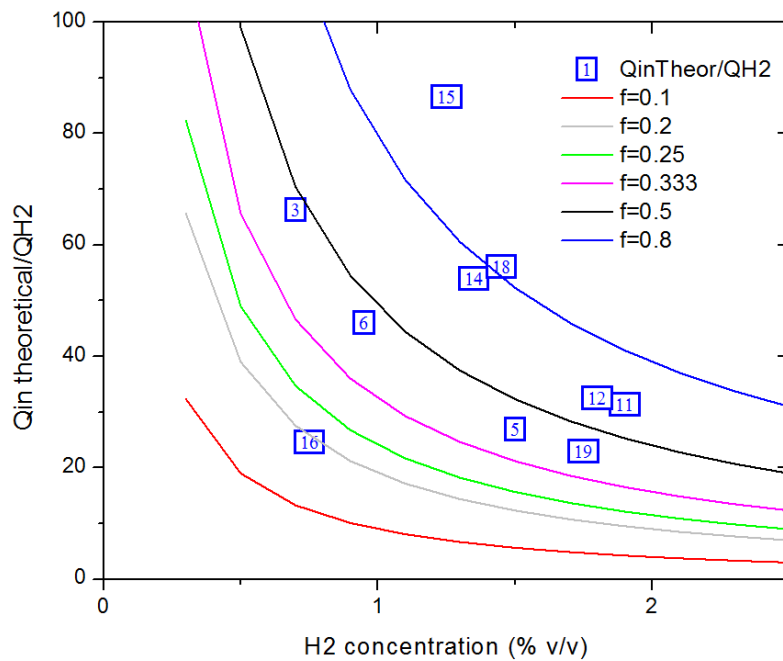
από V3				
Απαγωγή από V3			0	
Εισαγωγή από V4				3,04
Απαγωγή από V4				18,0
Συνολική εισαγωγή	60,1	69,7	100	66,4

Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται ο λόγος Q_{in}/Q_{H_2} (όπου το Q_{in} υπολογίστηκε με βάση τη σχέση (6) ή (7)) συναρτήσει της συγκέντρωσης H_2 στον ανιχνευτή S5 όπως μετρήθηκε στα πειράματα. Η αρίθμηση των τετραγώνων αντιστοιχεί στον αριθμό του πειράματος ενώ οι συνεχείς γραμμές υπολογίστηκαν με βάση την εξίσωση (5) για διάφορες τιμές του παράγοντα διαστρωμάτωσης f . Ο παράγοντας f σχετίζεται με το φαινόμενο της τάσης του H_2 να συσσωρεύεται στην οροφή ενός κλειστού χώρου (στρώμα H_2 /αέρα) λόγω του ανωστιακού χαρακτήρα του και είναι ο λόγος του όγκου του στρώματος H_2 /αέρα προς το συνολικό όγκο του χώρου. Όπως φαίνεται από το σχήμα, τιμή του f ίση με 0,5 φαίνεται να περιγράφει καλύτερα τα πειράματα εκτός από τα 16, 15 και 18. Η διάταξη του πειράματος 16 έχει 2 ανοίγματα αερισμού κοντά στην οροφή σε απέναντι τοίχους με συνολική επιφάνεια ανοιγμάτων 0,49 m² η οποία χρησιμοποιήθηκε στη σχέση (6). Ωστόσο η θεωρητική παροχή αερισμού είχε τιμή 0,016 m³/s η οποία είναι μικρότερη από αυτήν του πειράματος 5 στο οποίο χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα άνοιγμα κοντά στην οροφή, το V1s με επιφάνεια 0,35 m². Επίσης σε αυτήν την περίπτωση η εισαγωγή φρέσκου αέρα και η απαγωγή του μίγματος H_2 /αέρα είναι δυνατόν να εμφανιστεί και στα 2 ανοίγματα αφού και τα 2 βρίσκονται κοντά στην οροφή. Πράγματι, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3, η αριθμητική λύση εμφανίζει παροχή εισόδου αέρα και στο V1s και στο V4 άνοιγμα. Το πείραμα 15 εμφανίζει την μεγαλύτερη παροχή αερισμού από όλα τα πειράματα έκλυσης 40 l/min. Η συγκέντρωση H_2 στη θέση S5 είναι κατά 7% μικρότερη από αυτήν του πειράματος 14 το οποίο έχει κατά 37% μικρότερο αερισμό. Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι στο πείραμα 3 ο αερισμός ήταν κατά 24% μικρότερος αλλά η συγκέντρωση H_2 στη θέση S5 είναι κατά 44% μικρότερη. Σε αυτήν την περίπτωση αποδεικνύεται η επίδραση της αυξημένης τύρβης στην καλύτερη ανάμιξη του H_2 με τον αέρα και κατά συνέπεια στην αραιώση του μίγματος H_2 /αέρα. Υπενθυμίζεται ότι στο πείραμα 3 η έκλυση είχε οριζόντια κατεύθυνση με αποτέλεσμα να προσιρούσει στον απέναντι τοίχο (βλέπε Σχήμα 10 και Σχήμα 11). Τέλος, το πείραμα 18 είχε τη μεγαλύτερη παροχή αερισμού από όλα τα πειράματα έκλυσης 90 l/min και εμφάνισε όπως αναμένετο τη μικρότερη συγκέντρωση H_2 .

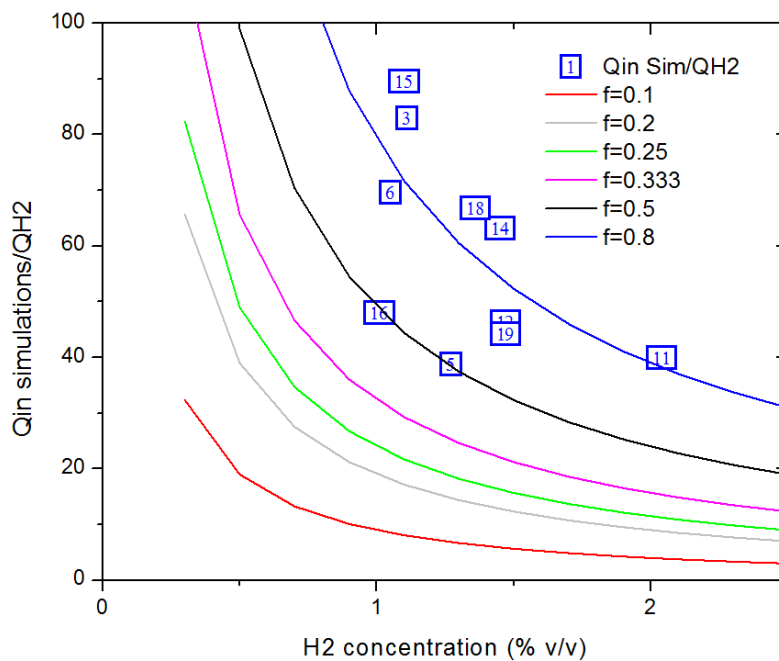
Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται ο λόγος Q_{in}/Q_{H_2} (όπου το Q_{in} υπολογίστηκε από τις προσομοιώσεις) συναρτήσει των αριθμητικών αποτελεσμάτων της συγκέντρωσης H_2 στον ανιχνευτή S5. Όπως φαίνεται από το σχήμα, τιμή του f ίση με 0,8 φαίνεται να περιγράφει καλύτερα τις προσομοιώσεις εκτός από τα 16 και 5 τα οποία βρίσκονται πάνω στην καμπύλη με τιμή του f ίση με 0,5. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των 2 σχημάτων (Σχήμα 21 και Σχήμα 22) ενώ οι τιμές c_T βρίσκονται γενικά σε καλή συμφωνία, η παροχή αερισμού Q_{in} των προσομοιώσεων είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερη. Αυτό είναι εμφανέστερο από το Σχήμα 23 στο οποίο

Κεφάλαιο 6: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό

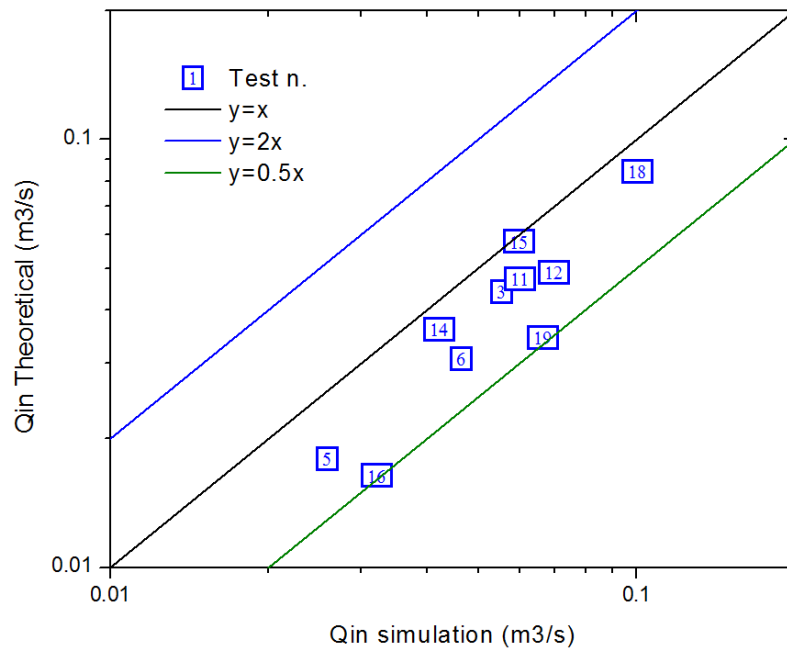
γίνεται άμεση σύγκριση του Q_{in} των προσομοιώσεων με αυτό βάσει των σχέσεων (6) ή (7). Οι τιμές Q_{in} με τη μεγαλύτερη απόκλιση είναι αυτές των πειραμάτων 16 και 19 (τα ανοίγματα βρίσκονταν μόνο κοντά στην οροφή και σε απέναντι τοίχους) και μετά αυτές των 5 και 6 (τα ανοίγματα βρίσκονταν μόνο κοντά στην οροφή και στον ίδιο τοίχο).



Σχήμα 21: Q_{in}/Q_{H2} (θεωρητικά) συναρτήσει της συγκέντρωσης H_2 στη θέση S5



Σχήμα 22: Q_{in}/Q_{H2} (βάσει προσομοιώσεων) συναρτήσει της συγκέντρωσης H_2 στη θέση S5



Σχήμα 23: Σύγκριση της παροχής αερισμού από τις θεωρητικές σχέσεις (6) και (7) $Q_{in} \text{ theoretical}$ με αυτής των προσομοιώσεων $Q_{in} \text{ simulation}$

6.5 Συμπεράσματα

Γενικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ήταν σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά. Πιθανή αιτία των διαφορών μεταξύ των αποτελεσμάτων μπορεί να είναι η επίδραση του ανέμου (ο οποίος δεν μοντελοποιήθηκε). Η επίδραση του ανέμου ενδέχεται να είναι σημαντική ακόμα και όταν ο άνεμος είναι ασθενής ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου όλα τα ανοίγματα αερισμού βρίσκονται κοντά στην οροφή. Επίσης, οι διαφορές μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων μπορεί να οφείλονται στην υπόθεση ισοθερμοκρασιακών συνθηκών των προσομοιώσεων αλλά και στα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Οι ανιχνευτές είχαν ακρίβεια 0,4% H_2 κατ' όγκο ενώ οι συγκεντρώσεις (είτε οι πειραματικές είτε οι αριθμητικές) H_2 δεν ξεπέρασαν τα 3% κατ' όγκο.

Οι προσομοιώσεις των πειραμάτων με έκλυση 40 l/min και κατεύθυνση κατακόρυφη προς τα πάνω έδειξαν ότι ενώ ο χώρος αποθήκευσης της εγκατάστασης δεν είχε συγκέντρωση H_2 μεγαλύτερη από 2%, στο εσωτερικό της ενεργειακής συστοιχίας η συγκέντρωση υπερέβη αυτήν την τιμή σημαντικά. Ο χώρος αποθήκευσης δεν χαρακτηρίζεται ως ζώνη 2. Ωστόσο, είτε όλα τα επιμέρους στοιχεία της ενεργειακής συστοιχίας θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα με βάση τις προδιαγραφές ATEX είτε θα πρέπει να αυξηθεί ο αερισμός της ενεργειακής συστοιχίας ώστε να ελαττωθεί η συγκέντρωση H_2 μέσα σε αυτήν.

Ο αερισμός γενικά επηρεάζεται από τις μετεωρολογικές συνθήκες καθώς επίσης και από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του εσωτερικού με τον εξωτερικό χώρο. Η διαφορά πυκνότητας μπορεί να προκληθεί είτε λόγω διαφοράς θερμοκρασίας είτε λόγω έκλυσης κάποιου ανωστικού αερίου όπως το H_2 . Ενδιαφέρον θα είχε η πειραματική και αριθμητική μελέτη σεναρίων που συνδυάζουν την επίδραση του

ανέμου με αυτήν της διαφοράς πυκνότητας προκειμένου να προταθούν σχέσεις απλοποιημένων μοντέλων για μια γρήγορη και εύχρηστη συνολική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του αερισμού σε περιπτώσεις ατυχημάτων όπως αυτές που μελετήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2: Το φυσικό πρόβλημα – υποκεφάλαιο: Φυσικός αερισμός, έχουν προταθεί μοντέλα για την εκτίμηση του φυσικού αερισμού λόγω ανέμου σε συνδυασμό με τον θερμοτονισμό (διαφορά πυκνότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας). Σχέσεις υπολογισμού του αερισμού είτε λόγω ανέμου είτε λόγω διαφοράς θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται στις Ιταλικές Οδηγίες (CEI EN-60079-10) για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας ATEX ωστόσο δεν έχουν αξιολογηθεί εκτενώς με πειραματικά δεδομένα, δεν περιλαμβάνουν την ενδεχόμενη αύξηση του αερισμού που μπορεί να προκαλέσει η έκλυση ανωστικού αερίου υπό ορισμένες συνθήκες ούτε προτείνονται σχέσεις που συνδυάζουν τα παραπάνω φαινόμενα με την παρουσία ανέμου.

Σ' αυτό το κεφάλαιο επιχειρήθηκε μία σύγκριση της παροχής αερισμού από τις προσομοιώσεις και από θεωρητικές σχέσεις λόγω της έκλυσης με τη χρήση ενός απλοποιημένου μοντέλου μηδενικής διάστασης. Οι θεωρητικές παροχές αερισμού υπολογίστηκαν από σχέσεις που λαμβάνουν υπ' όψιν τη μεταβολή της πυκνότητας στο χώρο λόγω της έκλυσης ανωστικού αερίου. Η παροχή αερισμού από τις θεωρητικές σχέσεις βρέθηκε σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερη απ' αυτήν των προσομοιώσεων. Μεγαλύτερη υποεκτίμηση του αερισμού παρουσιάστηκε στις διατάξεις με ανοίγματα μόνο κοντά στην οροφή και σ' έναν τοίχο, ακολούθως στις διατάξεις με ανοίγματα κοντά στην οροφή και το έδαφος στον ίδιο τοίχο ενώ τέλος στη διάταξη με ίδια ανοίγματα κοντά στην οροφή και το έδαφος ο αερισμός είχε τιμή πολύ κοντά με αυτήν της προσομοίωσης.

6.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

Barely C.D. and Gawlik K., (2009), “Buoyancy-driven ventilation of hydrogen from buildings: Laboratory test and model validation”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 5592-5603

Bartzis J.G., (1991), “ADREA-HF: A three-dimensional finite volume code for vapour cloud dispersion in complex terrain”, EUR Report 13580 EN.

CEI EN 60079-10, (2004), “Electrical apparatus for explosive atmospheres – part 10: classification of hazardous areas”, 2nd edition

Cerchiara G., Mattei N., Schiavetti M. and Carcassi M., (2009), “Natural and forced ventilation study in a enclosure hosting a fuel cell”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, Corsica

Gallego E., Migoya E., Martin-Valdepenas J.M., Crespo A., Garcia J., Venetsanos A.G., Papanikolaou E., Kumar S., Studer E., Dagba Y., Jordan T., Jahn W., Oiset S., Makarov D., (2007), “An Inter-comparison Exercise on the Capabilities of CFD Models to Predict Distribution and Mixing of H₂ in a Closed Vessel”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 32, p. 2235-2245

HyPer Installation Permitting Guidance for Hydrogen and Fuel Cells Stationary Applications, January 2009, available at <http://www.hyperproject.eu/> and also at <http://epshypp.web.its.manchester.ac.uk/>

Launder B.E. and Spalding D.B., (1974), “The numerical computation of turbulent flows”, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, Issue 2, p. 269-289

OpenCascade, available: <http://www.opencascade.org>

Papanikolaou, E. A. and Venetsanos, A. G., (2005), “CFD modeling for helium releases in a private garage without forced ventilation”, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Papanikolaou, E.A., Venetsanos, A.G., Cerchiara, G.M., Carcassi, M. and Markatos, N., (2011), “CFD simulations on small hydrogen releases inside a ventilated facility and assessment of ventilation efficiency”, International Journal of Hydrogen Energy, The 3rd Annual International Conference on Hydrogen Safety, Vol. 36, Issue 3, pp. 2597-2605

Tecplot, version 8.0, διαδικτυακός τόπος: <http://www.tecplot.com/>

Venetsanos A.G., Catsaros N., Wurtz J., Bartzis J.G., (1995), “The DELTA B code. A computer code for the simulation of the geometry of three-dimensional buildings. Code structure and users manual”, EUR Report 16326 EN

Venetsanos A.G., Huld T., Adams P., Bartzis J.G., (2003), “Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment”, J. of Hazardous Materials, Vol. A105, p. 1-25

Venetsanos A.G., Papanikolaou E. and Bartzis J.G., (2010), “The ADREA-HF CFD code for consequence assessment of hydrogen applications”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 8, p. 3908-3918

Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

Λίστα Συμβόλων

Χαρακτήρες κεφαλαίων

C	Συγκέντρωση	m^3/m^3
\bar{C}	Μέση συγκέντρωση	m^3/m^3
C_μ	Σταθερά μοντέλου k-ε (=0,09)	
E	Σταθερά μοντέλου LVEL (=8,6)	
Re	Αριθμός Reynolds	

Χαρακτήρες μικρών γραμμάτων

k	Τυρβώδης κινητική ενέργεια	$m^2 s^{-2}$
l_{mix}	Μήκος ανάμιξης	m
u	Τοπική ταχύτητα	$m s^{-1}$
u^+	Κανονικοποιημένη ταχύτητα	
y	Απόσταση κόμβου από την πλησιέστερη στερεή επιφάνεια	m
y^+	Κανονικοποιημένη απόσταση από τη στερεή επιφάνεια	

Δείκτες

o	Παρατηρούμενη (Observed)
p	Προβλεπόμενη (Predicted)

Εκθέτες

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

+ Εκθέτης που δηλώνει κανονικοποιημένη ποσότητα

Ελληνικοί χαρακτήρες

ϵ	Απορρόφηση τυρβώδους κινητικής ενέργειας	$m^2 s^{-3}$
κ	Σταθερά von Karman (=0,41)	
ν	Κινηματικό ιξώδες	$m^2 s^{-1}$
ρ	Πυκνότητα	$kg m^{-3}$
τ_w	Διατμητική τάση τοιχώματος	$N m^{-2}$
φ	Μεταβλητή	

Συντομογραφίες

BOS	Background Oriented Schlieren
FB	Fractional Bias
LOD	Limit Of Detection
LPG	Liquified Petroleum Gas
MG	Geometric Mean Bias
NMSE	Normalized Mean Square Error
SBEP	Standard Benchmark Exercise Problems
VG	Geometric Mean Variance

7.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια του προγράμματος HySafe Network of Excellence (HySafe, 2009) επιχειρήθηκε η συλλογή πειραμάτων, σχετιών με θέματα ασφάλειας εφαρμογών και χρήσης του H₂ ως φορέα ενέργειας. Τα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των CFD κωδίκων και μοντέλων των εταιρών του HySafe προκειμένου να αναγνωριστούν οι περιοχές που χρήζουν περαιτέρω υπολογιστική ανάπτυξη και να προταθούν Οδηγίες Καλής Πρακτικής (Best Practice Guidelines) για σενάρια σχετικά με θέματα ασφάλειας H₂. Η σύγκριση και αξιολόγηση των κωδίκων και μοντέλων έγινε συστηματικά με μία σειρά από μελέτες καλούμενες «Μελέτες Προτύπων Προβλημάτων Αναφοράς» (SBEP).

Στα πλαίσια των SBEPs επελέγησαν τα πειράματα του Swain (1998) τα οποία αφορούσαν εκλύσεις He (αντί του H₂ για θέματα ασφάλειας) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό. Ο Swain (1998) διεξήγαγε μια πειραματική και υπολογιστική μελέτη για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων αερισμού οικιακών χώρων στάθμευσης προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για αυτοκίνητα με H₂. Μελετήθηκε η καταλληλότητα των υπαρχόντων χώρων στάθμευσης και η ανάγκη για πιθανές τροποποιήσεις αυτών. Για το πειραματικό

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

μέρος, κατασκευάστηκε ένας μονοθέσιος χώρος στάθμευσης και ένα μοντέλο αυτοκινήτου πραγματικής κλίμακας. Η εγκατάσταση ήταν τοποθετημένη σε εσωτερικό χώρο για την εξάλειψη της επίδρασης του ανέμου και της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και βάσει των αποτελεσμάτων έγιναν στο χώρο διάφορες τροποποιήσεις. Οι τροποποιήσεις περιέλαβαν αρχικά τη μετατροπή των ανοιγμάτων αερισμού ξεινώνοντας από ένα μόνο άνοιγμα σε έναν από τους τοίχους και καταλήγοντας σε διπλά ανοίγματα είτε ελεύθερα είτε με περσίδες. Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση του μηχανικού αερισμού και ενός συστήματος ανίχνευσης H_2 . Σε όλα τα πειράματα η έκλυση He ήταν σταθερή και ίση με 7.200 lt/hr τοποθετημένη κάτω από το αμάξωμα του μοντέλου του αυτοκινήτου. Για το υπολογιστικό μέρος, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας FLUENT. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι οι διαφορές μεταξύ του H_2 και He δεν ξεπέρασε το 15%. Οι μεγαλύτερες διαφορές εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια μη μόνιμης κατάστασης και προτού οι συγκεντρώσεις λάβουν τη μέγιστη τιμή. Εκτενής περιγραφή των πειραμάτων του Swain (Swain, 1998) έχει γίνει στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου.

Έχει επιχειρηθεί στο παρελθόν η πειραματική και υπολογιστική μελέτη των φυσικών φαινομένων κατά την έκλυση και διασπορά H_2 σε κλειστούς χώρους με αερισμό ή μη. Επί παραδείγματι, οι Gallego και συν. (2007) παρουσίασαν μια υπολογιστική μελέτη έκλυσης, ανάμιξης και διασποράς H_2 σε ερμητικά κλειστό χώρο. Τα φυσικά φαινόμενα, παρόντα σε τέτοιου είδους σενάρια είναι:

- Περιοχή έντονης συναγωγής στη δέσμη H_2 όπου λαμβάνει χώρα ανάμιξη του περιβάλλοντα αέρα με το H_2 .
- Ανακυκλοφορία λόγω της πρόσκρουσης της δέσμης H_2 στην οροφή του χώρου και δημιουργία δεσμών στα τοιχώματα με παράλληλη ανάμιξη του H_2 με τον περιβάλλοντα αέρα.
- Φυσική συναγωγή λόγω της ανομοιομορφής κατανομής της πυκνότητας προκύπτουσας από τη διαρροή H_2 και πιθανότατα λόγω της υπόθεσης αδιαβατικών παράπλευρων τοιχωμάτων κατά τους υπολογισμούς.
- Η διάχυση είναι αρχικά τυρβώδης και μετέπειτα μοριακή.

Οι κίνδυνοι που ελλοχεύουν κατά τη διαρροή αναφλέξιμου αερίου σε κλειστούς χώρους με αερισμό, όπως επί παραδείγματι σε χώρους στάθμευσης, εξαρτώνται τόσο από το συνολικό όγκο έκλυσης του αερίου όσο από την ένταση της έκλυσης (Swain, Filoso και συν., 2003). Επίσης, η θέση των ανοιγμάτων στο χώρο επηρεάζει σημαντικά την εξέλιξη της έκλυσης. Ανοίγματα τοποθετημένα κοντά στην οροφή επιτρέπουν την διαφυγή του H_2 στον εξωτερικό χώρο με την προϋπόθεση ύπαρξης ανοιγμάτων κοντά στο έδαφος για την εισαγωγή φρέσκου αέρα και την αντικατάσταση του μίγματος H_2 /αέρα. Οι Swain, Grilliot and Swain (1999) παρουσίασαν μια πειραματική και υπολογιστική μελέτη έκλυσης και διασποράς H_2 σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό. Βάσει των υπολογισμών με τον κώδικα FLUENT συμπέραναν ότι είναι δόκιμη η αξιολόγηση κωδικών CFD με πειράματα He για την μετέπειτα χρήση των κωδικών σε σενάρια έκλυσης και διασποράς H_2 . Οι Agranat και

συν. (2004) προσομοίωσαν τα πειράματα των Swain, Grilliot και Swain (1999) με τον κώδικα PHOENICS. Τα αποτελέσματα ήταν συγκρίσιμα με αυτά του κώδικα FLUENT (Swain, Grilliot και Swain, 1999). Στη δημοσίευση των Swain και Shriber (1998) παρουσιάστηκε μια σύγκριση των κινδύνων που προκύπτουν από την έκλυση H_2 , φυσικού αερίου, LPG και βενζίνης σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης. Μελετήθηκαν 2 ειδών εκλύσεις, η πρώτη ήταν έκλυση πολύ μικρής επιφάνειας ενώ η δεύτερη αντιπροσώπευε μεγάλου μήκους αλλά μικρού εύρους σχισμή στη γραμμή παροχής καυσίμου. Μόνο το LPG και η βενζίνη δημιούργησαν σημαντικής έντασης αναφλέξιμο νέφος. Οι Breitung και συν. (2001) χρησιμοποίησαν τον κώδικα GASFLOW για τον υπολογισμό της έκλυσης κρυογενικού H_2 από δεξαμενή αυτοκινήτου βρισκόμενο σε χώρο στάθμευσης. Οι Parsons and Brinckerhoff (2004) χρησιμοποίησαν έναν κώδικα CFD για να εκτιμήσουν τις απαιτούμενες τροποποιήσεις (και στη συνέχεια τα αντίστοιχα κόστη) για την ασφαλή στάθμευση αυτοκινήτων H_2 σε 4 περιπτώσεις (υπέργειος εμπορικός χώρος στάθμευσης πολλαπλών ορόφων, υπόγειος εμπορικός χώρος στάθμευσης πολλαπλών ορόφων, οικιακός διαθέσιος χώρος στάθμευσης και εμπορικός σταθμός επισκευής και συντήρησης). Οι Paillere και συν. (2005) υπογράμμισαν την σημασία χρήσης κωδίκων CFD σε μελέτες εκτίμησης κινδύνου, το σχεδιασμό συστημάτων μετριασμού κινδύνων και αξιολόγησαν τον κώδικα εσωτερικής ανάπτυξης/διαχείρισης (in-house) σε σενάρια έκλυσης, διασποράς και καύσης H_2 . Οι Barley και συν. (2007) παρουσίασαν ένα απλοποιημένο μοντέλο που συνδέει τις παραμέτρους σχεδιασμού (επιφάνεια ανοιγμάτων, ύψος, συντελεστής παροχής στα ανοίγματα) με την παροχή έκλυσης H_2 μέσα σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό προκालούμενο λόγω διαφοράς άνωσης. Παρουσίασαν επίσης αριθμητικά αποτελέσματα σεναρίων έκλυσης H_2 σε διαθέσιμο χώρο στάθμευσης. Σε μεταγενέστερη εργασία, οι Barley and Gawlik (2009) παρουσίασαν πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα (CFD και απλοποιημένου αλγεβρικού μοντέλου) σεναρίων ασθενούς έκλυσης He μέσα σε πραγματικής κλιμακας δωμάτιο σε συνθήκες οιοει μόνιμες και ισοθερμοκρασιακές. Οι Barley and Gawlik (2009) επισήμαναν την επίδραση των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου στην συγκέντρωση He μέσα στο χώρο. Η επίδραση της θερμοκικής ανακυκλοφορίας μπορεί να έχει είτε ευεργετικές είτε αρνητικές επιπτώσεις στην αραιώση του εκλυόμενου αερίου λόγω φυσικού αερισμού. Οι Gupta και συν. (2007) δημοσίευσαν πειραματικά δεδομένα έκλυσης και διασποράς He (αντί H_2) σε χώρο στάθμευσης απουσία αερισμού. Εξετάστηκε η επίδραση της παροχής έκλυσης He και των αρχικών συνθηκών στη διασπορά και ανάμιξη μέσα στο χώρο. Επισήμαναν ότι ο κίνδυνος έκλυσης H_2 επηρεάζεται ισχυρότερα από το συνολικό όγκο έκλυσης παρά από την ένταση (παροχή) της πηγής. Οι Lowesmith και συν. (2007) παρουσίασαν πειραματικά δεδομένα έκλυσης μίγματος H_2/CH_4 σε διάφορες αναλογίες μέσα σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό. Παρατηρήθηκε ότι η διασπορά και ανάμιξη του εκλυθέντος μίγματος επηρεάζεται τόσο από τον αερισμό λόγω άνωσης όσο λόγω παρουσίας ανέμου. Οι Lacomme και συν. (2007) δημοσίευσαν πειραματικά δεδομένα υποχηχητικής έκλυσης H_2 σε κλειστό χώρο. Έγινε επίσης σύγκριση των συγκεντρώσεων στο χώρο από εκλύσεις H_2 και He. Επισημάνθηκε ότι το He μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του H_2 ωστόσο περισσότερα πειράματα σύγκρισης μεταξύ των 2 αερίων είναι απαραίτητα. Στη δημοσίευση των Venetsanos και συν. (2009) παρουσιάστηκε μια συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων

προσομοιώσεων από 12 εταιρείους του HySafe πειραμάτων κατακόρυφης έκλυσης H_2 1 g/s σε χώρο στάθμευσης. Οι προσομοιώσεις έγιναν πριν και μετά τη δημοσίευση των πειραματικών δεδομένων προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητα πρόβλεψης των διαφόρων μοντέλων/κωδίκων. Τα αποτελέσματα πριν τη δημοσίευση των πειραματικών δεδομένων διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Μετά τη δημοσίευση των πειραμάτων, οι διαφορές μειώθηκαν δραστικά. Στη δημοσίευση των Parakonstantinou και συν. (2003) παρουσιάστηκε μια αριθμητική μελέτη έκλυσης CO σε χώρο στάθμευσης χωρητικότητας 110 αυτοκινήτων με και χωρίς μηχανικό αερισμό. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι η χρήση CFD μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική για το σχεδιασμό του χώρου και του απαραίτητου αερισμού του. Επίσης, οι Duci και συν. (2004) παρουσίασαν αριθμητικά αποτελέσματα έκλυσης CO σε τυπικών διαστάσεων χώρο στάθμευσης για 3 διαφορετικές παροχές αερισμού.

Όπως φαίνεται από την παραπάνω ανασκόπηση, οι εκλύσεις H_2 σε κλειστούς χώρους και ιδιαίτερα σε χώρους στάθμευσης τυγχάνει προσοχής ενώ παράλληλα έχει υπογραμμιστεί η σπουδαιότητα χρήσης CFD κωδίκων ως εργαλεία για την εκτίμηση κινδύνου και το σχεδιασμό χώρων στάθμευσης. Από την άλλη πλευρά, ατυχήματα συναφών σεναρίων αφορούν συνήθως ασθενείς συνθήκες ροής (στρωτή ή μεταβατική) των οποίων η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου δεν είναι εύκολη. Επιπλέον, ζητήματα όπως η επιλογή πυκνότητας του πλέγματος επίλυσης και κατάλληλων συνοριακών συνθηκών χρήζουν προσοχής. Η ανάπτυξη λοιπόν μεθόδων Καλής Πρακτικής CFD κωδίκων βασιζόμενων σε εκτεταμένη μελέτη σχετικών σεναρίων είναι σημαντική. Το παρόν κεφάλαιο είναι μια απόπειρα συλλογής πληροφοριών σ' αυτήν την κατεύθυνση. Τρία από τα πειράματα του Swain (Swain, 1998) μελετήθηκαν υπολογιστικά χρησιμοποιώντας το μοντέλο k-ε (Papanikolaou και Venetsanos, 2005) ενώ παρουσιάζονται επίσης προσομοιώσεις με το μοντέλο LVEL. Ακόμη, παρουσιάζεται μια εκτενέστερη υπολογιστική μελέτη και σύγκριση 4 διαφορετικών μεθοδολογιών (Papanikolaou, 2010) προκειμένου να αξιολογηθούν οι διάφορες μέθοδοι και να προταθούν Οδηγίες Καλής Πρακτικής για τέτοιου είδους σενάκια.

Τέλος, όπως επισημάνθηκε από τους Barley and Gawlik (2009), η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού με εξωτερικού χώρου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τον αερισμό και κατά συνέπεια τη συγκέντρωση H_2 . Στα πειράματα του Swain (1998) η πειραματική εγκατάσταση βρισκόταν σε εσωτερικό χώρο με αποτέλεσμα οι συνθήκες να θεωρηθούν ισοθερμοκρασιακές. Ως εκ τούτου, η επίδραση θερμοκρασιών διαφορών δεν ήταν δυνατό να μελετηθεί πειραματικά και κατά συνέπεια ούτε υπολογιστικά. Σε μελέτες CFD σεναρίων φυσικού αερισμού πραγματικών συνθηκών κρίνεται σκόπιμο να ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση της διαφοράς θερμοκρασίας.

7.2 Περιγραφή των πειραμάτων

Τα πειράματα αφορούσαν την έκλυση και διασπορά He παροχής 7.200 lt/h επί 2 h (ως υποκατάστατο του H_2 για θέματα ασφαλείας) από πρότυπο αυτοκινήτου και δημοσιεύτηκαν από τον Swain (1998). Η παροχή των 7.200 lt/h θεωρήθηκε από τον πειραματιστή ως η μέγιστη δυνατή έκλυση η οποία δεν είναι ανιχνεύσιμη από τον ανιχνευτή συγκέντρωσης H_2 επί του αυτοκινήτου ή από τον αισθητήρα πίεσης για τον

υπολογισμό της κατανάλωσης H_2 κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής. Το αυτοκίνητο θεωρήθηκε ότι έχει ισχύ 50 kW που σημαίνει ότι αναμένεται κατανάλωση της τάξεως των 36.000 lt/h κατά τη λειτουργία του σε πλήρη ισχύ. Διαρροή ίση με 7.200 lt/h αντιστοιχεί σε 20% πώση της μέγιστης ισχύος. Εφόσον στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο ένα 10 με 12% της μέγιστης ισχύος καταναλώνεται σε έναν τυπικό κύκλο οδήγησης, η συγκεκριμένη διαρροή θα προκαλούσε αύξηση της κατανάλωσης στο διπλάσιο. Ο σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός των απαιτήσεων αερισμού οικιακών χώρων στάθμευσης προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για αυτοκίνητα με H_2 . Μελετήθηκε η καταλληλότητα των υπαρχόντων χώρων στάθμευσης και η ανάγκη για πιθανές τροποποιήσεις αυτών. Για το πειραματικό μέρος, κατασκευάστηκε ένας μονοθέσιος χώρος στάθμευσης, διαστάσεων 6,4 m × 3,7 m × 2,8 m, και ένα μοντέλο αυτοκινήτου πραγματικής κλίμακας. Η εγκατάσταση ήταν τοποθετημένη σε εσωτερικό χώρο για την εξάλειψη της επίδρασης του ανέμου και της μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Στην πόρτα βρίσκονταν ανοίγματα μεταβαλλόμενου ύψους ενώ 4 ανιχνευτές συγκέντρωσης βρίσκονταν στις 4 γωνίες του χώρου. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η πειραματική περιγραφή δεν περιέλαβε την αβεβαιότητα των μετρήσεων, ούτε τα χαρακτηριστικά των ανιχνευτών όπως ακρίβεια και όρια ανίχνευσης. Επίσης δεν έγινε αναφορά στην επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Κάποιες από τις μετρήσεις συγκέντρωσης He ήταν πολύ μικρές, ιδιαίτερα στους ανιχνευτές που βρίσκονταν κοντά στο έδαφος (από 0% έως 0,4%) οι οποίες συνήθως περιέχουν σημαντικό πειραματικό σφάλμα. Τα πειράματα περιγράφονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου.

7.3 Στατιστικοί δείκτες επίδοσης υπολογιστικών μεθοδολογιών

Συνήθως χρησιμοποιούνται στατιστικοί δείκτες για την εκτίμηση της επίδοσης διάφορων υπολογιστικών μεθόδων έναντι κοινών πειραματικών δεδομένων, ιδιαιτέρως όταν τα δεδομένα είναι πολυπληθή. Σ' αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν 4 στατιστικοί δείκτες επίδοσης με τους οποίους έγινε η σύγκριση των 4 μεθοδολογιών CFD με τα πειραματικά δεδομένα του Swain (1998). Οι δείκτες αυτοί, συνιστώμενοι από τον Hanna (1989) και τους Hanna και συν. (1993), χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση επίδοσης μοντέλων ατμοσφαιρικής διασποράς αλλά πρόσφατα έχουν χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές (όπως π.χ. στους Escanciano και συν., 2009, Garcia και συν., 2010 και Tam και συν., 2008). Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των δεικτών και του πιο διαδεδομένου γραφήματος παρουσίασης ελέγχου της επίδοσης των υπολογιστικών μεθοδολογιών.

- Κλασματική μεροληψία (FB): είναι το μέσο σφάλμα το οποίο ορίζει το υπόλοιπο της πραγματικής (πειραματικής) τιμής της μέσης συγκέντρωσης $\overline{C_o}$ από την μέση προβλεπόμενη $\overline{C_p}$. Η μεροληψία κανονικοποιείται προκειμένου να αδιαστατοποιηθεί. Ο δείκτης FB έχει τιμή 0 για ιδανική επίδοση μοντέλου ενώ η μέγιστη και ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει είναι +2 και -2 αντίστοιχα. Αρνητικές τιμές του δείκτη σηματοδοτούν υπερεκτίμηση του μοντέλου ενώ το αντίστροφο ισχύει για θετικές τιμές. Συνέπεια της μη γραμμικότητας του δείκτη είναι ότι εάν ένα μοντέλο τείνει να υπερεκτιμά ή να υποεκτιμά σημαντικά λόγω διαφορετικών παραγόντων,

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

η διασπορά της κλασματικής μεροληψίας θα είναι μικρή. Μικρή διασπορά του δείκτη μπορεί με τη σειρά του να ληφθεί λανθασμένα ως ένδειξη καλής αξιοπιστίας ενός μοντέλου.

$$FB = \frac{2(\overline{C_o} - \overline{C_p})}{\overline{C_o} + \overline{C_p}} \quad (1)$$

- Κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (NMSE): αυτός ο δείκτης δίνει έμφαση στη διασπορά επί του συνόλου των δεδομένων (dataset) και παρέχει μια εκτίμηση για τη συνολική απόκλιση ανάμεσα στις πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές. Μικρές τιμές του δείκτη δηλώνουν καλή επίδοση και απουσία μεροληψίας προβλέψεων είτε μεγαλύτερων είτε μικρότερων των πειραματικών. Ο δείκτης NMSE έχει τιμή 0 για ιδανική επίδοση μοντέλου.

$$NMSE = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{\overline{C_o} \overline{C_p}} \quad (2)$$

- Μέση γεωμετρική μεροληψία (MG): είναι μέτρο της σχετικής διασποράς ενός μοντέλου. Τιμές του δείκτη ίσες με 0,5 και 2,0 υποδηλώνουν υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση της μέσης τιμής κατά παράγοντα 2. Ο δείκτης MG έχει τιμή 1 για ιδανική επίδοση μοντέλου.

$$MG = \exp[(\ln \overline{C_o} - \ln \overline{C_p})] \quad (3)$$

- Μέση γεωμετρική διασπορά (VG): είναι μέτρο της σχετικής διασποράς ενός μοντέλου. Ο δείκτης VG έχει τιμή 1 για ιδανική επίδοση μοντέλου. Τιμή ίση με 1,6 υποδηλώνει διασπορά κατά παράγοντα 2 μεταξύ της πειραματικής και προβλεπόμενης τιμής.

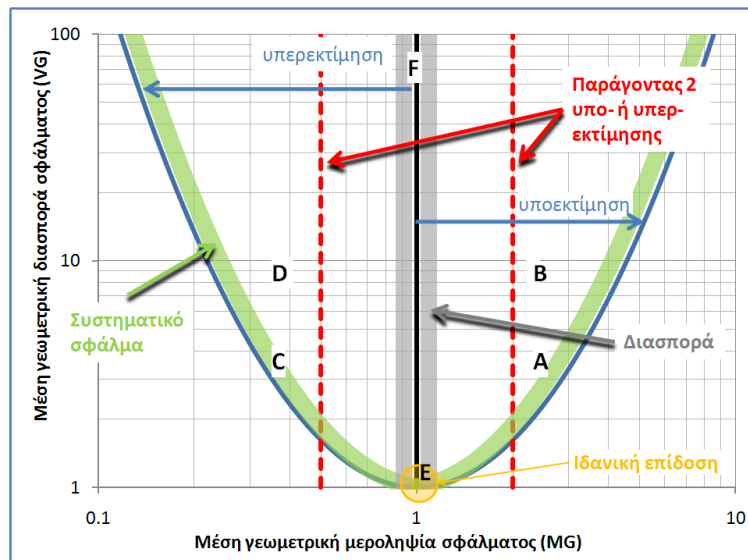
$$VG = \exp \left[\left(\ln \frac{\overline{C_o}}{\overline{C_p}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Οι δείκτες FB και MG είναι μέτρο της μέσης μεροληψίας και χαρακτηρίζουν συστηματικά σφάλματα (υπερ-εκτίμηση ή υπό-εκτίμηση) ενώ οι δείκτες NMSE και VG είναι μέτρο της διασποράς και χαρακτηρίζουν τόσο συστηματικά όσο τυχαία σφάλματα. Οι Chang and Hanna (2004), όρισαν τις παρακάτω τιμές αποδοχής επίδοσης των μοντέλων:

- Μέση μεροληψία: $\pm 30\%$ της μέσης τιμής η οποία μεταφράζεται σε: $|FB| < 0,3$ και $0,7 < MG < 1,3$
- Τυχαία διασπορά κατά περίπου έναν παράγοντα μεταξύ 2 και 3 η οποία μεταφράζεται σε: $NMSE < 1.5$ και $VG < 4$

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1) φαίνεται ένα τυπικό γράφημα για την έλεγχο της επίδοσης μοντέλων με τη χρήση των στατιστικών δεικτών MG και VG. Ένα τέτοιο τυπικό γράφημα περιέχει παράλληλες παραβολές σταθερής διασποράς. Η παραβολή που φαίνεται στο Σχήμα 1 αντιπροσωπεύει μηδενική διασπορά. Όλα τα σημεία πρέπει να βρίσκονται είτε πάνω στην παραβολή είτε στον εσωτερικό χώρο που αυτή οριοθετεί. Προβλέψεις μοντέλων που έχουν σημεία κοντά στην παραβολή

χαρκτηρίζονται από συστηματικά σφάλματα (και απουσία διασποράς) ενώ αυτά κοντά στον κάθετο άξονα $x=1$ χαρακτηρίζονται από έντονη διασπορά. Παραδείγματος χάριν, το σημείο Α αντιπροσωπεύει αποτελέσματα μοντέλου που υποεκτιμά συστηματικά και έχει πολύ μικρή πιθανότητα υπερεκτίμησης. Το σημείο Β βρίσκεται πάνω από το Α και έχει μεγάλη τιμή διασποράς. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο ενώ εμφανίζει τάση υποεκτίμησης, έχει μεγάλο εύρος προβλέψεων δηλαδή κάποια αποτελέσματα υπερεκτίμησαν τα πειραματικά ενώ τα περισσότερα υποεκτίμησαν. Το μοντέλο Β είναι λιγότερο προβλέψιμο από το Α. Τα σημεία C και D αντιπροσωπεύουν μοντέλα με τα ίδια χαρακτηριστικά των μοντέλων Α και Β αλλά με τάση υπερεκτίμησης. Το σημείο F έχει πολύ μεγάλη τιμή διασποράς. Μοντέλα με αυτήν την συμπεριφορά δεν είναι αξιόπιστα καθώς συμπεριφέρονται ουσιαστικά ως «γεννήτριες τυχαίων αριθμών». Μοντέλα με ιδανική επίδοση παράγουν σημεία κοντά στο ελάχιστο της παραβολής (δηλαδή κοντά στο σημείο (1,1)) όπως το σημείο Ε. Οι προβλέψεις αυτού του μοντέλου είναι συστηματικά ακριβείς. Τέλος, οι διακεκομμένες κάθετες κόκκινες γραμμές οριοθετούν την εσωτερική περιοχή με υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση κατά παράγοντα 2 ο οποίος θεωρείται συχνά ως όριο αποδοχής της μεροληψίας των προβλέψεων.



Σχήμα 1: Τυπικό γράφημα σύγκρισης επίδοσης μοντέλων με τη χρήση των στατιστικών δεικτών MG και VG

7.4 Προσομοίωση των πειραμάτων

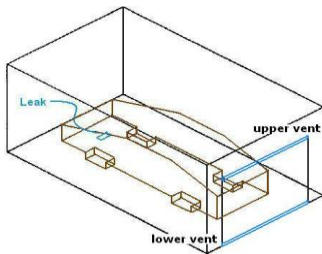
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η υπολογιστική μελέτη τριών από τα πειράματα του Swain (1998). Στην 1^η φάση γίνεται μια σύγκριση της επίδοσης του μοντέλου k-ε με το LVEL. Στην 2^η φάση παρουσιάζεται μια συστηματική σύγκριση διαφόρων μεθοδολογιών CFD. Σ' αυτή τη φάση δίνεται περισσότερο έμφαση στην επίδραση της υπόθεσης συμμετρίας, της πύκνωσης του πλέγματος και της επέκτασης του υπολογιστικού χωρίου πέραν των φυσικών ορίων του χώρου στάθμευσης στα αποτελέσματα. Στην 3^η φάση, παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις των 3 πειραμάτων του Swain (1998) με τον κώδικα CFD ADREA-HF, οι οποίες αναφέρονται ως αποτελέσματα NCSR, χρησιμοποιώντας το μοντέλο k-ε σε σύγκριση με 3 διαφορετικές μεθοδολογίες εταιρών του HySafe με τους εμπορικούς κώδικες

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

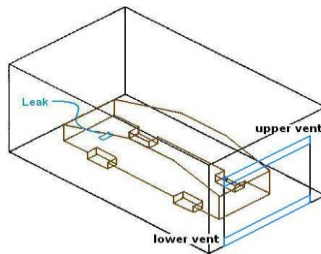
FLACS, CFX 11 και FLUENT. Τα αποτελέσματα που αναφέρονται ως αποτελέσματα NCSRD ελήφθησαν με τη χρήση του υπολογιστικού κώδικα ρευστομηχανικής ADREA-HF (Bartzis, 1991). Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει το ύψος των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού των εν λόγω πειραμάτων ενώ στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2, Σχήμα 3 και Σχήμα 4) φαίνεται η θέση της έκλυσης και των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού. Τέλος, ο Πίνακας 2 παρουσιάζει συνοπτικά τις τρεις φάσεις που θα αναπτυχθούν σ' αυτό το κεφάλαιο.

Πίνακας 1: Ύψος ανοιγμάτων μελετηθέντων πειραμάτων του Swain (Swain, 1998)

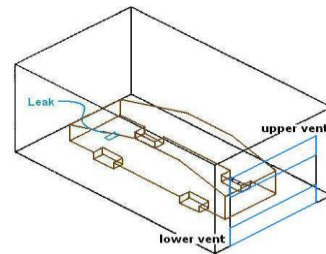
Πείραμα	Ύψος ανοιγμάτων (m)
1 – μικρά ανοίγματα	0,063
2 – μεσαία ανοίγματα	0,241
3 – μεγάλα ανοίγματα	0,495



Σχήμα 2: Μικρά ανοίγματα (0,063 m)



Σχήμα 3: Μεσαία ανοίγματα (0,241 m)



Σχήμα 4: Μεγάλα ανοίγματα (0,495 m)

Πίνακας 2: Περίληψη των προσομοιώσεων

	Πείραμα 1 (μικρά ανοίγματα)	Πείραμα 2 (μεσαία ανοίγματα)	Πείραμα 3 (μεγάλα ανοίγματα)
Μοντέλο k-ε	Σύγκριση με πειράματα	Σύγκριση με πειράματα	Σύγκριση με πειράματα
Μοντέλο LVEL	Σύγκριση με πειράματα και k-ε μοντέλο	Σύγκριση με πειράματα και k-ε μοντέλο	Σύγκριση με πειράματα και k-ε μοντέλο
Μοντέλο k-ε	Επίδραση υπόθεσης συμμετρίας, πυκνώσης πλέγματος, επέκτασης υπολογιστικού χωρίου πέραν των ορίων του χώρου, σύγκριση με υπόθεση στρωτής ροής	2 ^η φάση	1 ^η φάση 3 ^η φάση
Μοντέλο k-ε	Σύγκριση μεθοδολογίας NCSRD με άλλες μεθοδολογίες CFD	Σύγκριση μεθοδολογίας NCSRD με άλλες μεθοδολογίες CFD	Σύγκριση μεθοδολογίας NCSRD με άλλες μεθοδολογίες CFD

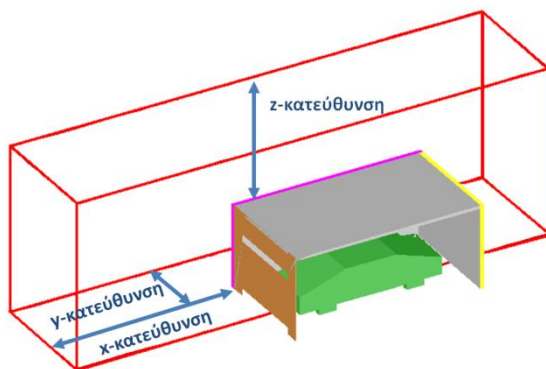
7.4.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Η χωρική διακριτοποίηση έγινε σε καρτεσιανό υπολογιστικό πλέγμα. Η τεχνική του πορώδους μέσου και της επιφανειακής διαπερατότητας χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του υπολογιστικού πεδίου για την περιγραφή της πειραματικής

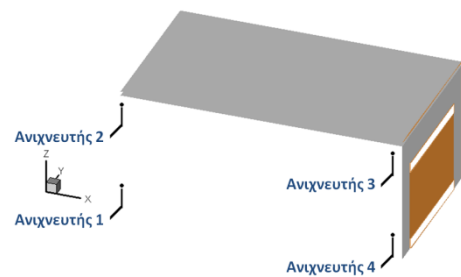
Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

γεωμετρίας. Η γεωμετρική προεπεξεργασία έγινε με τον κώδικα DELTA-B (Venetsanos και συν., 1995).

Λόγω της θέσης της πηγής και των ανιχνευτών συγκέντρωσης, έγινε η υπόθεση συμμετρίας για την εξοικονόμηση υπολογιστικού κόστους. Το υπολογιστικό πεδίο επεκτάθηκε πέραν της πειραματικής εγκατάστασης όσο το μήκος της στην κατεύθυνση x, το μισό του πλάτους της στην κατεύθυνση y και όσο το ύψος της στην κατακόρυφη κατεύθυνση (Σχήμα 5). Κατά συνέπεια οι ανιχνευτές τοποθετήθηκαν στο ίδιο επίπεδο (Σχήμα 6). Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των υπολογιστικών πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις ενώ στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 7 και Σχήμα 8) φαίνονται τα πλέγματα στο επίπεδο y-z των πειραμάτων 1 και 3.



Σχήμα 5: Διαστάσεις υπολογιστικού πεδίου (Tecplot 8.0)

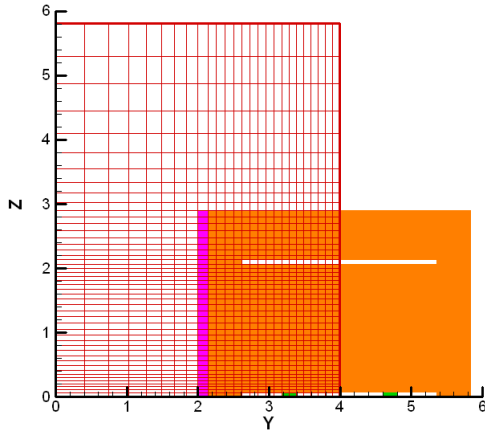


Σχήμα 6: Θέση των τεσσάρων ανιχνευτών συγκέντρωσης He (Tecplot 8.0)

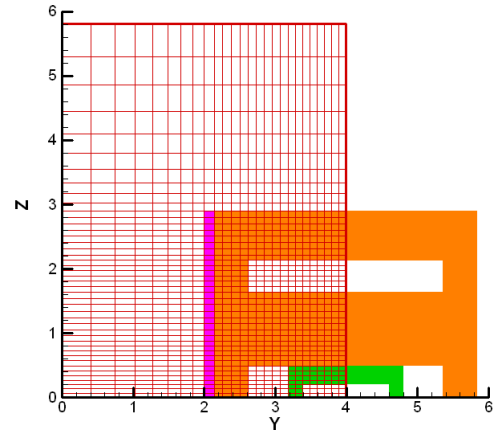
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά υπολογιστικού πλέγματος

Πλέγμα	Πείραμα 1	Πείραμα 2	Πείραμα 3
Διαστάσεις (πλήθος κελιών)	88×26×48	88×26×50	88×26×44
Διαστάσεις πεδίου (m)		16,427×3,992×5,813	
Πλήθος ενεργών κελιών	101.887	106.218	93.552
Μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος κελιού στην z-κατεύθυνση (m)	0,04 κοντά στην πηγή 0,51 στην οροφή του πεδίου	0,038 κοντά στην πηγή 0,51 στην οροφή του πεδίου	0,065 κοντά στην πηγή 0,52 στην οροφή του πεδίου
Μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος κελιού στην x-κατεύθυνση (m)		0,02 κοντά στην πόρτα 0,92 στα άκρα του πεδίου	
Μέγιστο και ελάχιστο μέγεθος κελιού στην y-κατεύθυνση (m)	0,1 κοντά στην πηγή και στο επίπεδο συμμετρίας	0,4 στο άλλο ακραίο επίπεδο	

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό



Σχήμα 7: Υπολογιστικό πλέγμα στο επίπεδο y - z του πειράματος 1 (Tecplot 8.0, γεωμετρική επεξεργασία με τον κώδικα DELTA-B)



Σχήμα 8: Υπολογιστικό πλέγμα στο επίπεδο y - z του πειράματος 3 (Tecplot 8.0, γεωμετρική επεξεργασία με τον κώδικα DELTA-B)

7.4.2 Καθορισμός βασικών εξισώσεων, αρχικών και οριακών συνθηκών ροής και αριθμητικής μεθοδολογίας επίλυσης

Για τον υπολογισμό του πεδίου ροής επιλύθηκαν αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου οι μη μόνιμες, τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις (για συμπιεστό ρευστό) διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνεχείας), ορμής μίγματος (για τις 3 συνιστώσες ταχύτητας) και κλάσματος μάζας He. Η μοντελοποίηση της τύρβης έγινε είτε με το κλασσικό μοντέλο k - ϵ των Launder and Spalding (Launder and Spalding, 1974) λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίδραση της άνωσης είτε με το μοντέλο “μηδενικής εξίσωσης” LVEL.

Το αρχικό πεδίο ροής θεωρήθηκε στάσιμο, με ομοιόμορφο πεδίο θερμοκρασίας ίσο με 293 K ενώ το πεδίο πίεσης θεωρήθηκε υδροστατικό. Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών k και ϵ στην περίπτωση χρήσης του μοντέλου k - ϵ ήταν πολύ μικρές (της τάξεως 10^{-10}).

Η ταχύτητα στην πηγή έλαβε τιμή τέτοια (0,1 m/s) ώστε η προκύπτουσα ογκομετρική παροχή έκλυσης He να συμπίπτει με αυτήν των πειραμάτων λαμβάνοντας υπ' όψιν την υπόθεση συμμετρίας ($\frac{7.200 \text{ lt/h}}{2} = 3.600 \frac{\text{lt}}{\text{h}} = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται λεπτομερώς οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στις προσομοιώσεις. Θεωρήθηκε ότι όλα τα στερεά σώματα είχαν υδροδυναμική τραχύτητα ίση με 1 mm, στις δε επιφάνειές τους χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσεις τοιχωμάτων για τον υπολογισμό των 3 συνιστωσών της ταχύτητας και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της απορρόφησής της (στην περίπτωση του k - ϵ μοντέλου). Οι διαφορές των οριακών συνθηκών μεταξύ του μοντέλου k - ϵ με το LVEL βρίσκονται μόνο στις συναρτήσεις τοιχωμάτων που εφαρμόστηκαν στις υπολογισθείσες από τον κώδικα DELTA-B στερεές επιφάνειες ενώ φυσικά στο μοντέλο LVEL οι μεταβλητές k και ϵ δεν χρησιμοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

Πίνακας 4: Οριακές συνθήκες

	Επιφάνειες στερεών επιφανειών (28)	Στερεή επιφάνεια χωρίου (έδαφος)	Πηγή	Ελεύθερες επιφάνειες χωρίου (5)					
				Δυτική πλευρά	Ανατολική ή πλευρά	Νότια πλευρά	Επίπεδο συμμετρίας	Οροφή	
Μεταβλητή φ	u	Συνάρτηση τοιχώματος	Συνάρτηση τοιχώματος	$u = 0$ $\partial u / \partial z = 0$	$\partial u / \partial x = 0$	$\partial u / \partial x = 0$	*	$\partial u / \partial y = 0$	*
	v	Συνάρτηση τοιχώματος	Συνάρτηση τοιχώματος	$v = 0$ $\partial v / \partial z = 0$	*	*	$\partial v / \partial y = 0$	$v = 0$	*
	w	Συνάρτηση τοιχώματος	Συνάρτηση τοιχώματος	$w = 0.1$ $\partial w / \partial z = 0$	*	*	*	$\partial w / \partial y = 0$	*1
	q	$\partial q_1 / \partial n = 0$	$\partial q_1 / \partial z = 0$	$q_1 = 1$ $\partial q_1 / \partial z = 0$	*	*	*	$\partial q_1 / \partial y = 0$	*
	P	$\partial P / \partial n = 0$	$\partial P / \partial z = 0$	$P = 101325 Pa$ $\partial P / \partial z = 0$	$\partial P / \partial x = 0$	$\partial P / \partial x = 0$	$\partial P / \partial y = 0$	$\partial P / \partial y = 0$	$\partial P / \partial z = 0$
	T	$\partial T / \partial n = 0$	$\partial T / \partial z = 0$	$\partial T / \partial z = 0$	$\partial T / \partial x = 0$	$\partial T / \partial x = 0$	$\partial T / \partial y = 0$	$\partial T / \partial y = 0$	$\partial T / \partial z = 0$
	k	Συνάρτηση τοιχώματος	Συνάρτηση τοιχώματος	$k = 0$ $\partial k / \partial z = 0$	*	*	*	$\partial k / \partial y = 0$	*
	ε	Συνάρτηση τοιχώματος	Συνάρτηση τοιχώματος	$\varepsilon = 0$ $\partial \varepsilon / \partial z = 0$	*	*	*	$\partial \varepsilon / \partial y = 0$	*

*1 Η πίεση θεωρήθηκε σταθερή σε αυτό το επίπεδο του χωρίου (οροφή) και κατά συνέπεια, η συνιστώσα της ταχύτητας w υπολογίστηκε από την εξίσωση μάζας.

*2 η παράγωγος της μεταβλητής είναι μηδέν στην περίπτωση που το ρευστό εξέρχεται του υπολογιστικού χωρίου και επιπλέον είχε τιμή ίση με αυτήν τη χρονική στιγμή 0 στην περίπτωση που το ρευστό εισέρχεται.

Γενικά στη συνάρτηση τοιχώματος λαμβάνεται η υπόθεση ότι η ροή στην περιοχή κοντά σε στερεή επιφάνεια μπορεί να διαιρεθεί σε μία περιοχή στρωτής ροής και μετά σε περιοχή τυρβώδους ροής στην δε περίπτωση του μοντέλου k-ε είναι η εξής:

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & \text{για } y^+ < y_0^+ \\ \frac{1}{\kappa} \ln(9y^+) & \text{για } y^+ > y_0^+ \end{cases} \quad (5)$$

Με $u^+ = \frac{u(C_\mu^{1/4} k^{1/2})}{\tau_w / \rho}$, $y^+ = \frac{y(C_\mu^{1/4} k^{1/2})}{\nu}$ και τέλος $y_0^+ = 11,6$ για λείες στερεές επιφάνειες. Στην περίπτωση του μοντέλου LVEL η συνάρτηση τοιχώματος που χρησιμοποιήθηκε προκύπτει από το νόμο του Spalding και είναι η εξής:

$$y^+ = u^+ + \frac{1}{E} \left[e^{\kappa u^+} - 1 - \kappa u^+ - \frac{(\kappa u^+)^2}{2} - \frac{(\kappa u^+)^3}{6} - \frac{(\kappa u^+)^4}{24} \right] \quad (6)$$

Το σχήμα ανάντη διαφορών 1ης τάξης χρησιμοποιήθηκε για τη χωρική διακριτοποίηση των όρων μεταφοράς. Για τη χρονική διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε η 1ης τάξεως πλήρως πεπλεγμένη (fully implicit 1st order) μέθοδος. Τέλος το μέγιστο χρονικό βήμα ήταν 10^{-1} s ενώ το αρχικό χρονικό βήμα ήταν 10^{-3} s.

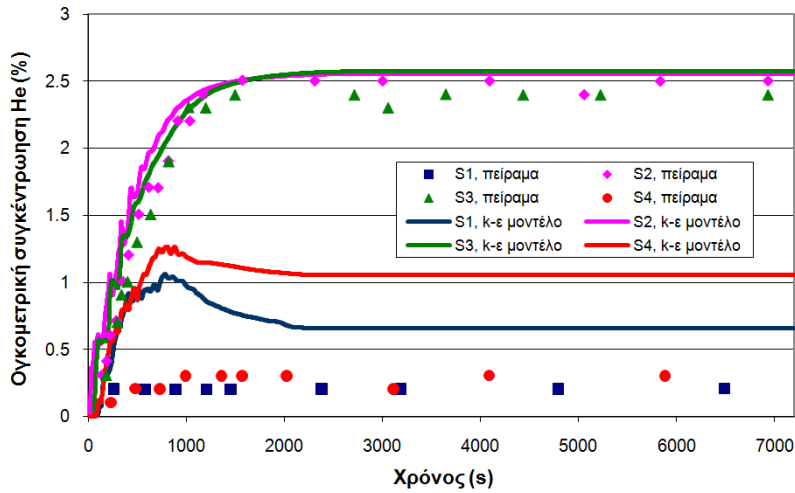
7.4.3 Αποτελέσματα 1^{ης} φάσης: Σύγκριση μοντέλων k-ε και LVEL με πειραματικά δεδομένα

Σ' αυτήν την φάση έγινε σύγκριση της επίδοσης των μοντέλων k-ε και LVEL με τα πειραματικά δεδομένα των 4 ανιχνευτών συγκέντρωσης He. Οι ανιχνευτές S1 και S4 ήταν τοποθετημένοι κοντά στο έδαφος (ο ανιχνευτής S4 βρισκόταν κοντά στο κάτω άνοιγμα αερισμού) ενώ οι S2 και S3 κοντά στην οροφή (ο ανιχνευτής S3 βρισκόταν κοντά στο άνω άνοιγμα αερισμού).

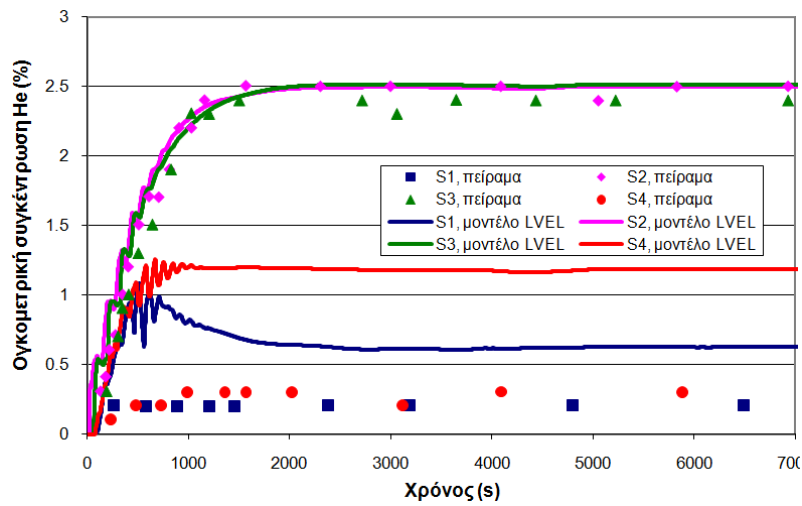
Τα παρακάτω σχήματα, Σχήμα 9 και Σχήμα 10, παρουσιάζουν τη χρονική εξέλιξη της ποσοστιαίας συγκέντρωσης He κατ' όγκο με τα μοντέλα k-ε και LVEL αντίστοιχα σε σύγκριση με τα δεδομένα του πειράματος 1 (μικρά ανοίγματα ύψους 0,063 m). Όπως φαίνεται από τα σχήματα τα αριθμητικά αποτελέσματα και των 2 μοντέλων βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά για τους ανιχνευτές στην οροφή. Τα αποτελέσματα υπερεκτιμούν τη συγκέντρωση He στους ανιχνευτές κοντά στο έδαφος. Πιθανή εξήγηση είναι η υποεκτίμηση της παροχής φρέσκου αέρα από το κάτω άνοιγμα στο χώρο με συνέπεια την ασθενέστερη ανάμιξή του με το He που βρισκόταν κοντά στο έδαφος. Μικρότερη παροχή αέρα στο κάτω άνοιγμα ισοδυναμεί με ασθενέστερες ταχύτητες εισόδου του φρέσκου αέρα και κατά συνέπεια ασθενέστερη παράσυρση και ανάμιξη του He από την πηγή και κατά μήκος της οριζόντιας κατεύθυνσης. Μια άλλη παράμετρος είναι το όριο ανίχνευσης των πειραματικών μετρήσεων το οποίο δεν αναφέρθηκε στην περιγραφή των πειραμάτων. Οι πειραματικές συγκεντρώσεις στα κάτω ανοίγματα ήταν της τάξεως των 0.2% He οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν πολύ κοντά στα όρια ανίχνευσης τυπικών ανιχνευτών συγκέντρωσης.

Στο Σχήμα 11 και Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι κατανομές συγκεντρώσεων He και το πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση με το μοντέλο k-ε και LVEL αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από τα σχήματα, φρέσκος αέρας εισέρχεται από το κάτω άνοιγμα και κατευθύνεται οριζοντίως κάτω από το αμάξωμα. Το μίγμα He/αέρα εξέρχεται από το πάνω άνοιγμα. Το νέφος του μίγματος He/αέρα που εξέρχεται του χώρου έχει μεγαλύτερη οριζόντια έκταση στην περίπτωση του μοντέλου LVEL. Το αναφλέξιμο νέφος και στις 2 περιπτώσεις εντοπίζεται κοντά στην πηγή (κάτω από το αμάξωμα) ενώ εκτείνεται κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση μπροστά από το αυτοκίνητο. Η κατακόρυφη έκταση του αναφλέξιμου νέφους με το μοντέλο k-ε είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτήν με το μοντέλο LVEL. Αυτό έχει ως συνέπεια το νέφος με συγκέντρωση μεγαλύτερη από 2% He του μοντέλου LVEL να έχει μεγαλύτερο μέγεθος από αυτό του k-ε. Από την σύγκριση της έκτασης των 2 αναφλέξιμων νεφών και του εξερχόμενου μίγματος φαίνεται ότι το μοντέλο LVEL προβλέπει ελαφρώς εντονότερη ανάμιξη του He με τον περιβάλλοντα αέρα. Οι ταχύτητες του εξερχόμενου νέφους είναι μικρότερες και αυτό φαίνεται από τη μεγαλύτερη οριζόντια έκτασή του.

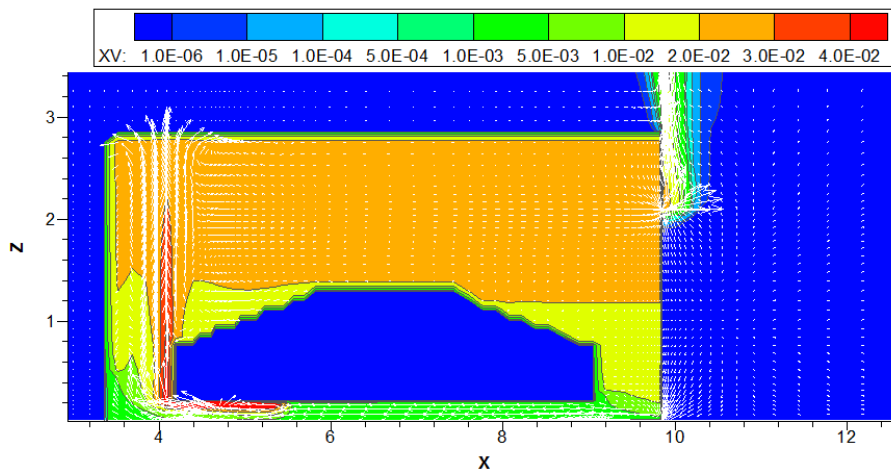
Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό



Σχήμα 9: Σύγκριση μοντέλου $k-\epsilon$ με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 1, μικρά ανοίγματα – 0,063 m)

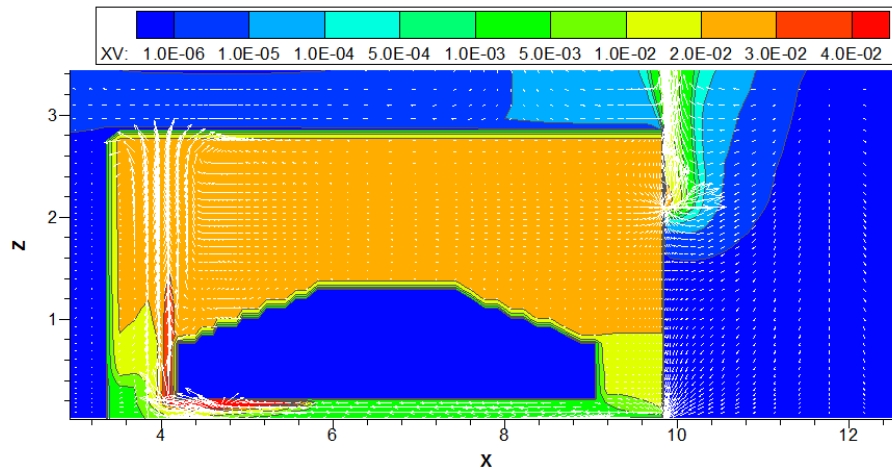


Σχήμα 10: Σύγκριση μοντέλου LVEL με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 1, μικρά ανοίγματα – 0,063 m)



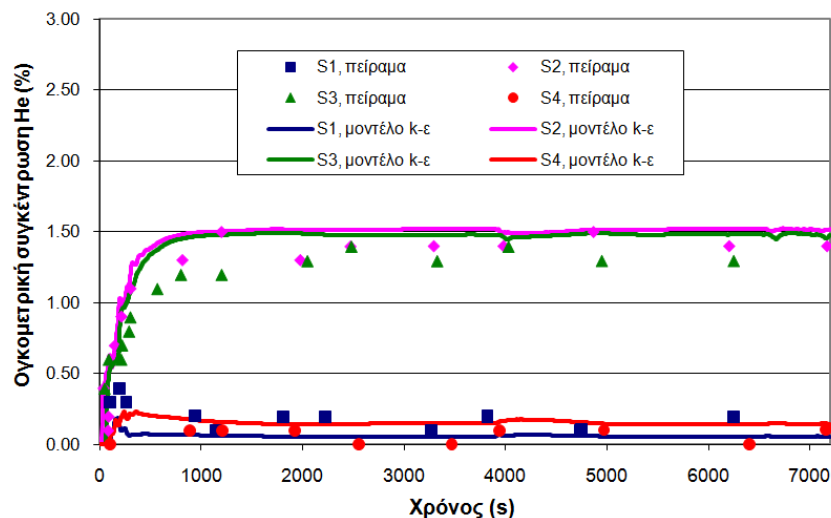
Σχήμα 11: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο $x-z$ διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 1 – $k-\epsilon$ μοντέλο) (Tecplot 8.0)

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό



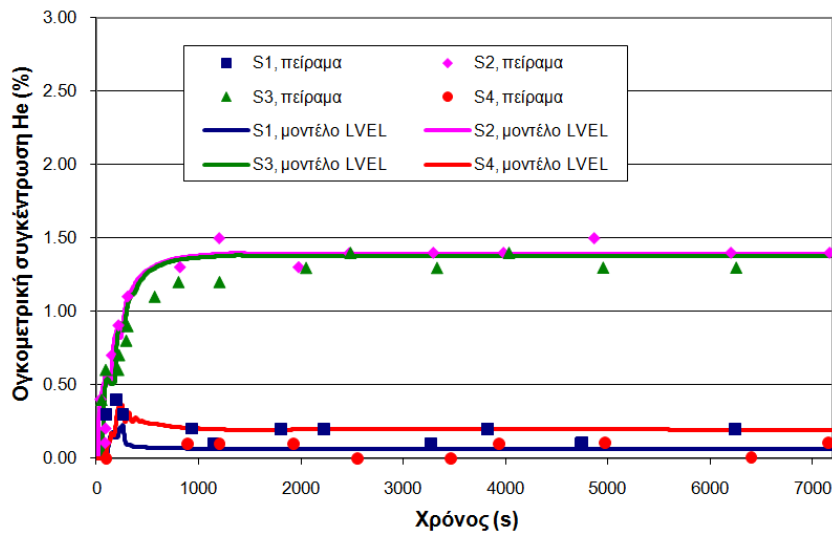
Σχήμα 12: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 1 – LVEL μοντέλο) (Tecplot 8.0)

Τα παρακάτω σχήματα, Σχήμα 13 και Σχήμα 14, παρουσιάζουν τη χρονική εξέλιξη της ποσοστιαίας συγκέντρωσης He κατ' όγκο με τα μοντέλα k-ε και LVEL σε σύγκριση με τα δεδομένα του πειράματος 2 (μεσαία ανοίγματα ύψους 0,241 m). Τα αριθμητικά αποτελέσματα και των 2 μοντέλων βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά για τους ανιχνευτές στην οροφή ενώ οι προβλέψεις στους ανιχνευτές κοντά στο έδαφος βελτιώθηκαν συγκριτικά με αυτές του πειράματος 1. Στο Σχήμα 15 και Σχήμα 16 παρουσιάζονται οι κατανομές συγκεντρώσεων He και το πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση με το μοντέλο k-ε και LVEL αντίστοιχα. Και σε αυτήν την περίπτωση, το νέφος του μίγματος He/αέρα που εξέρχεται του χώρου έχει μεγαλύτερη οριζόντια έκταση στην περίπτωση του μοντέλου LVEL. Η αύξηση των ανοιγμάτων κατά 4 φορές σε σύγκριση με το πείραμα 1 είχε σαν αποτέλεσμα το αναπλέξιμο νέφος να βρίσκεται κοντά στην πηγή αλλά αυτή τη φορά με μικρότερη κατακόρυφη έκταση. Τόσο οι πειραματικές, όσο οι υπολογιστικές τιμές των συγκεντρώσεων He μέσα στο χώρο είναι μικρότερες από αυτές του πειράματος 1 λόγω του μεγαλύτερου βαθμού αερισμού.

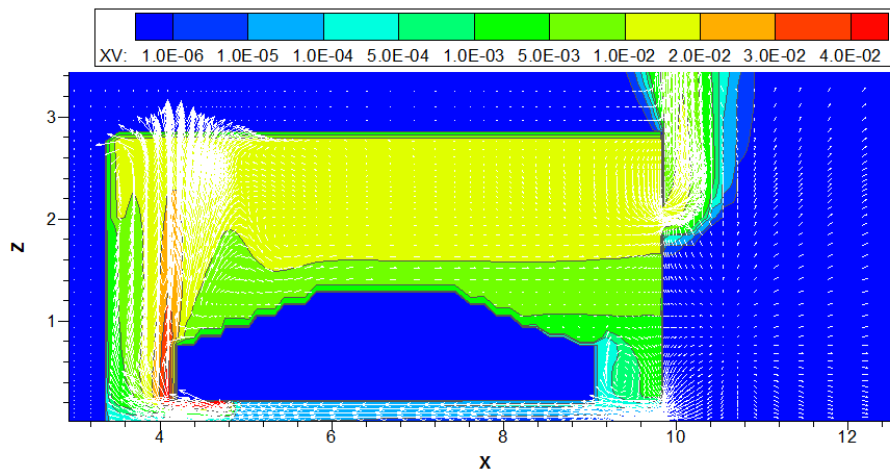


Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

Σχήμα 13: Σύγκριση μοντέλου $k-\epsilon$ με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 2, μεσαία ανοίγματα – 0,241 m)

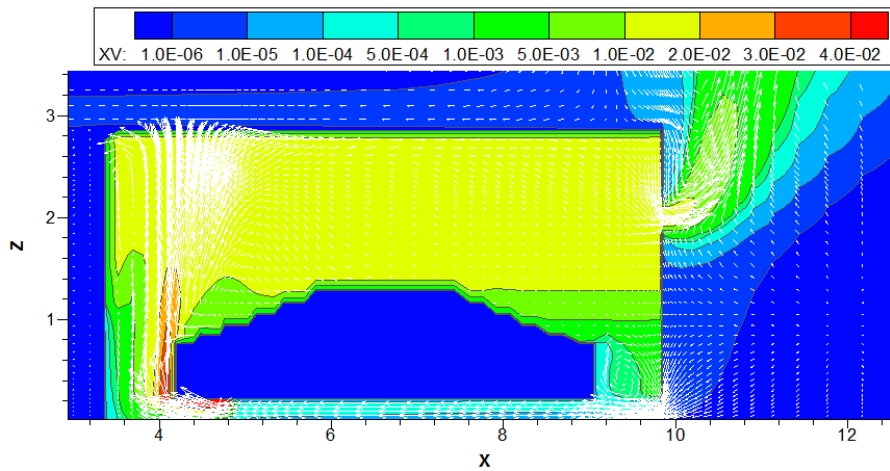


Σχήμα 14: Σύγκριση μοντέλου $LVEL$ με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 2, μεσαία ανοίγματα – 0,241 m)



Σχήμα 15: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο $x-z$ διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 2 – $k-\epsilon$ μοντέλο) (Tecplot 8.0)

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

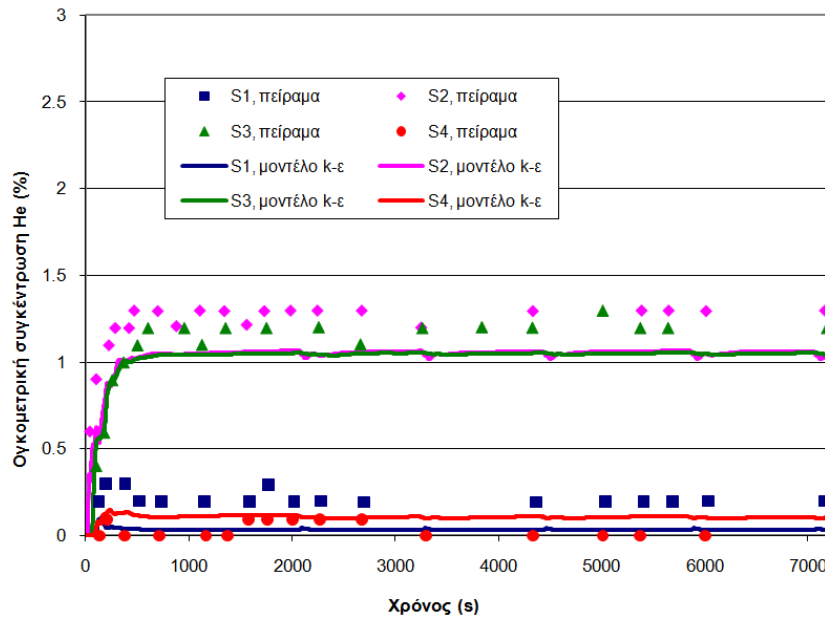


Σχήμα 16: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 2 – LVEL μοντέλο) (Tecplot 8.0)

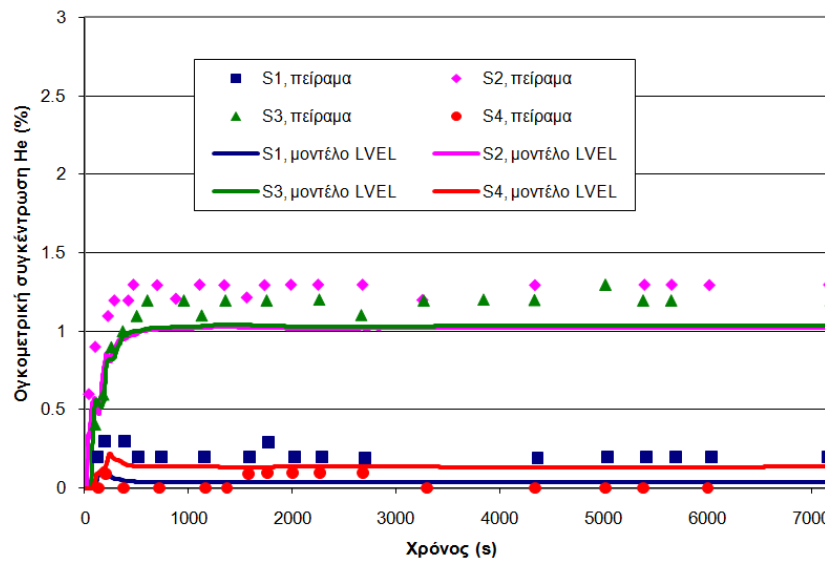
Τα παρακάτω σχήματα, Σχήμα 17 και Σχήμα 18, παρουσιάζουν τη χρονική εξέλιξη της ποσοστιαίας συγκέντρωσης He κατ' όγκο με τα μοντέλα k-ε και LVEL σε σύγκριση με τα δεδομένα του πειράματος 3 (μεγάλα ανοίγματα ύψους 0,495 m). Τα αριθμητικά αποτελέσματα και των 2 μοντέλων βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά για τους ανιχνευτές στην οροφή, παρουσιάζοντας μια μικρή υποεκτίμηση. Οι προβλέψεις στον ανιχνευτή 1 (κοντά στο έδαφος και την πηγή) παρουσίασαν υποεκτίμηση ενώ στον ανιχνευτή 4 υπερεκτίμηση (κοντά στο έδαφος και στο κάτω άνοιγμα). Αυτή τη φορά το ύψος των ανοιγμάτων ήταν 2 φορές μεγαλύτερο από αυτό του προηγούμενου πειράματος. Τόσο οι πειραματικές, όσο οι υπολογιστικές τιμές των συγκεντρώσεων He μέσα στο χώρο είναι μικρότερες από αυτές του πειράματος 2 κατά περίπου 30% λόγω του μεγαλύτερου βαθμού αερισμού.

Στο Σχήμα 19 και Σχήμα 20 παρουσιάζονται οι κατανομές συγκεντρώσεων He και το πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση με το μοντέλο k-ε και LVEL αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από τα σχήματα υπάρχει έντονη ανακυκλοφορία στην περιοχή μεταξύ του αυτοκινήτου και του κάτω ανοίγματος ενώ παράλληλα το μοντέλο k-ε προβλέπει έντονη ανακυκλοφορία κοντά στην οροφή και σε οριζόντια απόσταση κοντά στην πηγή. Επίσης, και τα 2 μοντέλα προβλέπουν μέρος του κάτω ανοίγματος ως έξοδο του He.

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

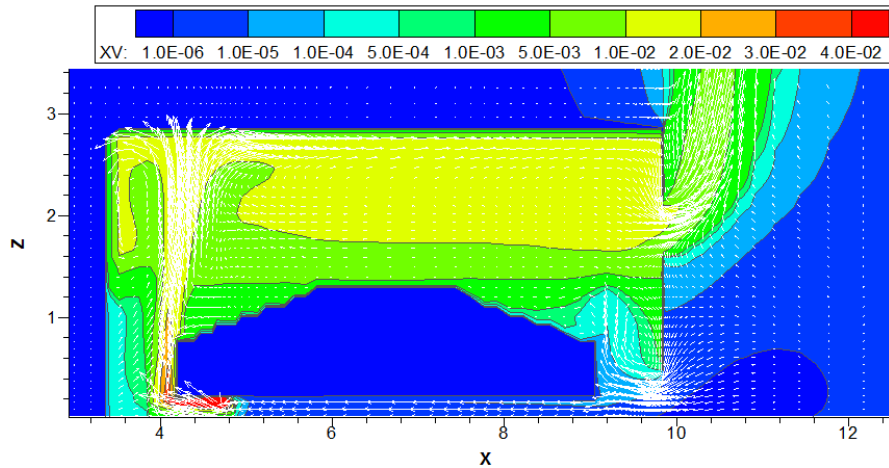


Σχήμα 17: Σύγκριση μοντέλου $k-\epsilon$ με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 3, μεγάλα ανοίγματα – 0,495 m)

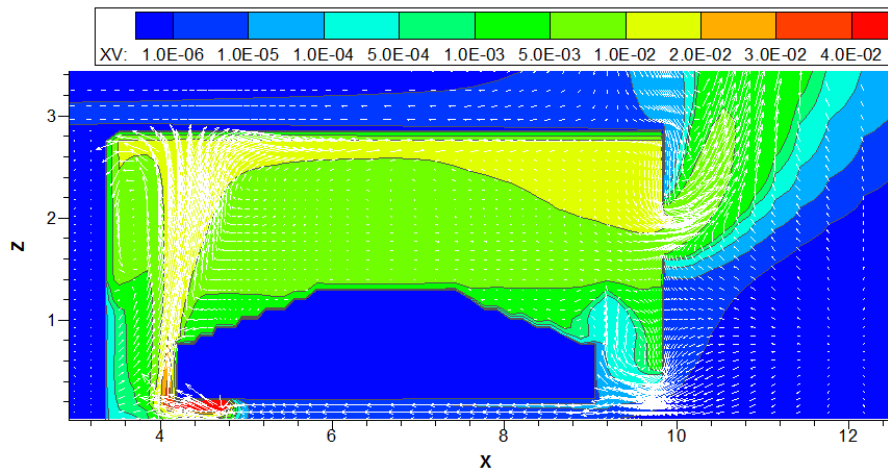


Σχήμα 18: Σύγκριση μοντέλου LVEL με πειραματικά δεδομένα (πείραμα 3, μεγάλα ανοίγματα – 0,495 m)

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό



Σχήμα 19: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x - z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 3 – k - ϵ μοντέλο) (Tecplot 8.0)



Σχήμα 20: Κατανομή συγκεντρώσεων He και πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x - z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την y κατεύθυνση σε χρόνο 3.600 s από την έκλυση (πείραμα 3 – LVEL μοντέλο) (Tecplot 8.0)

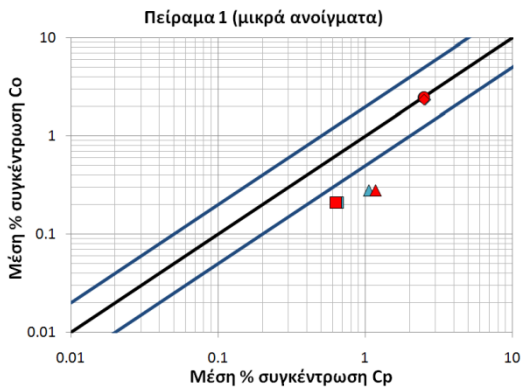
Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 21, Σχήμα 22 και Σχήμα 23) συγκρίνεται η μέση συγκέντρωση He του μοντέλου k - ϵ και του LVEL με τα πειραματικά δεδομένα. Οι μέσες συγκεντρώσεις ελήφθησαν μετά από περίπου 1.500 s από την έναρξη της έκλυσης, σε χρόνο δηλαδή που επικρατούν συνθήκες σχεδόν μόνιμης κατάστασης. Σημεία που βρίσκονται στη μαύρη διαγώνιο των σχημάτων αντιπροσωπεύουν πλήρη ταύτιση αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά ενώ οι 2 μπλε διαγώνιες οριοθετούν την περιοχή υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης κατά παράγοντα 2. Τα αποτελέσματα στους άνω ανοιχτούς σχεδόν ταυτίζονται με τα δεδομένα για τα πειράματα 1 και 2 ενώ εμφανίζουν μια μικρή υποεκτίμηση στο πείραμα 3. Ωστόσο η επίδοση και των 2 μοντέλων είναι πολύ καλή. Στην περίπτωση των κάτω ανοιγμάτων, και τα 2 μοντέλα υπερεκτιμούν τα πειραματικά τόσο κοντά στο άνοιγμα όσο κοντά στην πηγή στο πείραμα 1. Στο πείραμα 2 και τα δύο μοντέλα έχουν την ίδια συμπεριφορά: υπερεκτιμούν τη συγκέντρωση στον ανοιχτή κοντά στο άνοιγμα ενώ

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

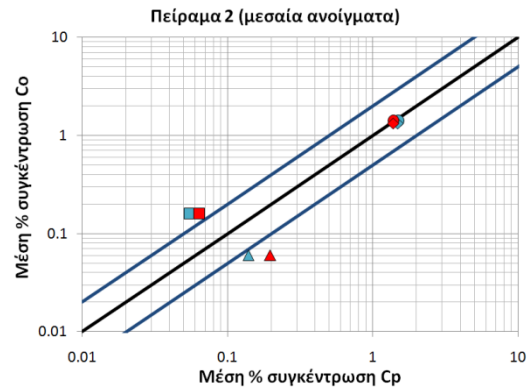
υποεκτιμούν κοντά στην πηγή. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση του πειράματος 3 αλλά με μεγαλύτερο βαθμό υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης αντίστοιχα.

Τα απλούστερα μοντέλα περιγραφής της τύρβης είναι τα αλγεβρικά μοντέλα. Τα μοντέλα κάνουν χρήση της υπόθεσης τυρβώδους συνεκτικότητας του Boussinesq για τον υπολογισμό του ταυυστή τάσεων Reynolds (Reynolds stress tensor) ως το γινόμενο μιας τυρβώδους συνεκτικότητας (eddy viscosity) επί του ταυυστή του ρυθμού παραμόρφωσης (strain-rate tensor). Για λόγους υπολογιστικής απλούστευσης, η τυρβώδης συνεκτικότητα υπολογίζεται με τη χρήση ενός χαρακτηριστικού μήκους ανάμιξης (mixing length) το οποίο είναι ανάλογο της μέσης ελεύθερης διαδρομής του ρευστού. Η τυρβώδης συνεκτικότητα, εναντιθέση με τη μοριακή, δεν εξαρτάται από το ρευστό αλλά από τη ροή. Επειδή το χαρακτηριστικό μήκος ανάμιξης και κατ' επέκτασιν η τυρβώδης συνεκτικότητα, όπως υπολογίζεται από τα αλγεβρικά μοντέλα, εξαρτάται από τη ροή κατά περίπτωση αυτές οι 2 ποσότητες πρέπει να υπολογιστούν εκ των προτέρων. Γι' αυτό το λόγο τα αλγεβρικά μοντέλα εξ ορισμού θεωρούνται ημιτελή (Wilcox, 1994). Το μοντέλο LVEL ανήκει στην κατηγορία των αλγεβρικών μοντέλων και κάνει χρήση της υπόθεσης του χαρακτηριστικού μήκους ανάμιξης του Prandtl. Στην υπόθεση του Prandtl, η τυρβώδης κίνηση του ρευστού θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα από ένα συσσωμάτωμα σωματιδίων τα οποία κινούνται ως μια μονάδα. Σε μια απλή διατμητική ροή, τα συσσωμάτωμα διατηρούν την ορμή της κατεύθυνσης x για μια κάθετη απόσταση l_{mix} την οποία αποκάλεσε μήκος ανάμιξης. Επίσης, υπέθεσε ότι για ροές κοντά σε στερεές επιφάνειες το μήκος ανάμιξης είναι ανάλογο της απόστασης από την επιφάνεια. Γενικά τα αλγεβρικά μοντέλα έχουν περιορισμένο εύρος εφαρμογής ενώ η διατύπωσή τους είναι εμπειρική. Ωστόσο ο Wilcox (Wilcox, 1994) αναφέρει ότι τα αλγεβρικά μοντέλα μπορούν να προβλέψουν με σημαντική ακρίβεια απλές ροές κατά τις οποίες οι μεταβολές της ροής είναι βραδείες. Στα 3 πειράματα του Swain (Swain, 1998) η έκλυση είναι ασθενής (της τάξεως των 0,1 m/s) και κατά συνέπεια οι μεταβολές στη ροή θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως βραδείες. Όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα οι προβλέψεις των 2 μοντέλων (k-ε και του αλγεβρικού μοντέλου LVEL) σε αυτές τις συνθήκες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Οι αποκλίσεις των προβλέψεων στους κάτω ανιχνευτές εκτός από τυχών υπολογιστικά σφάλματα μπορούν να αποδοθούν σε πειραματικά εφόσον οι συγκεντρώσεις είναι τόσο μικρές που βρίσκονται κοντά στο όριο ανίχνευσης τυπικών ανιχνευτών συγκέντρωσης.

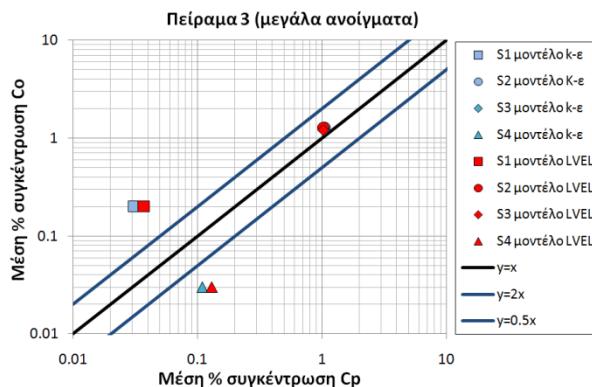
Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό



Σχήμα 21: Σύγκριση μέσης συγκέντρωσης Ηε πειράματος 1 με τα μοντέλα k-ε και LVEL



Σχήμα 22: Σύγκριση μέσης συγκέντρωσης Ηε πειράματος 2 με τα μοντέλα k-ε και LVEL



Σχήμα 23: Σύγκριση μέσης συγκέντρωσης Ηε πειράματος 3 με τα μοντέλα k-ε και LVEL

7.4.4 Μελέτη της επίδρασης υπόθεσης συμμετρίας, πύκνωσης πλέγματος και επέκτασης του υπολογιστικού χωρίου

Η επιλογή των διαστάσεων του υπολογιστικού χωρίου και των χαρακτηριστικών του πλέγματος είναι δυνατόν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Από την μια πλευρά, οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου ουσιαστικά καθορίζουν το μέγεθος της επίδρασης των οριακών συνθηκών στον υπολογισμό του πεδίου ροής. Σε σενάρια έκλυσης μέσα σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό είναι κοινή πρακτική η τοποθέτηση των ορίων του υπολογιστικού χωρίου μακριά από τον κλειστό χώρο και ιδιαίτερα μακριά από τα ανοίγματα ούτως ώστε οι οριακές συνθήκες να «πηραίνουν τη λύση στο ελάχιστο». Παραδείγματος χάριν, οι Matsuura και συν. (2008) για τον υπολογισμό έκλυσης H_2 παρόμοιας έντασης σε κλειστό χώρο με αερισμό επέκτειναν το υπολογιστικό χωρίο κατά 2,5 φορές επί των διαστάσεων του χώρου σε όλες τις κατευθύνσεις. Από την άλλη πλευρά, όπως αναφέρεται στην εργασία ERCOFTAC (2000), τα σφάλματα προσομοιώσεων με τα ίδια σχήματα διακριτοποίησης εξαρτώνται τόσο από το πλήθος των κελιών όσο από τον τρόπο που αυτά κατανέμονται στο χώρο (επιλογή πύκνωσης σε σημεία που αναμένονται έντονες μεταβολές των κλίσεων των φυσικών ποσοτήτων ροής ή αραιώσης σε σημεία που αναμένεται μικρή μεταβολή των φυσικών χαρακτηριστικών, βαθμός ομοιομορφίας

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

του πλέγματος στις 3 διαστάσεις ο οποίος καθορίζεται από τον λόγο ανάπτυξης μεγέθους γειτονικών κελιών – aspect ratio). Σφάλματα αυτού του είδους προκύπτουν σε όλες τις υπολογιστικές μεθόδους και σχετίζονται με την προσέγγιση των διακριτών μεταβαλλόμενων παραμέτρων στο χώρο από πολώνυμα για την μεταβολή κατά μήκος των κελιών.

Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά πλέγματος των διαφόρων προσομοιώσεων του πειράματος 1 που έγιναν για την μελέτη της επίδρασης της υπόθεσης συμμετρίας, της επέκτασης του πλέγματος κατά την κατακόρυφη και οριζόντια κατεύθυνση, της πυκνώσης και της ομοιομορφίας του πλέγματος στο πεδίο ροής. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση Π0 είναι η προσομοίωση που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο (7.4.1), στην προσομοίωση Π1 το πλέγμα ήταν το ίδιο αλλά επεκτάθηκε μόνο κατά την x και z κατεύθυνση, στην προσομοίωση Π2 το πλέγμα ήταν το ίδιο με τα δυο προηγούμενα αλλά επεκτάθηκε κατά την x και y κατεύθυνση, στην προσομοίωση Π3 το πλέγμα ήταν το ίδιο με τα προηγούμενα αλλά χωρίς την υπόθεση συμμετρίας, στην προσομοίωση Π4 το πλέγμα επεκτάθηκε κατά την x, y και z κατεύθυνση αλλά ήταν αραιότερο από αυτό των προηγούμενων περιπτώσεων (το πλήθος των κελιών μέσα στο χώρο στάθμευσης ήταν περίπου ίσο με 2/3 των προηγούμενων περιπτώσεων) και τέλος στην προσομοίωση Π5 το πλέγμα επεκτάθηκε κατά την x, y και z κατεύθυνση αλλά ήταν πυκνότερο από αυτό των Π0, Π1, Π2 και Π3 (το πλήθος των κελιών μέσα στο χώρο στάθμευσης ήταν περίπου 4 φορές πυκνότερο). Σε όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο k-ε με τα ίδια υπολογιστικά χαρακτηριστικά της παραγράφου 7.4.1.

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά υπολογιστικού χωρίου και πλέγματος των 5 προσομοιώσεων του πειράματος 1 (μικρά ανοίγματα)

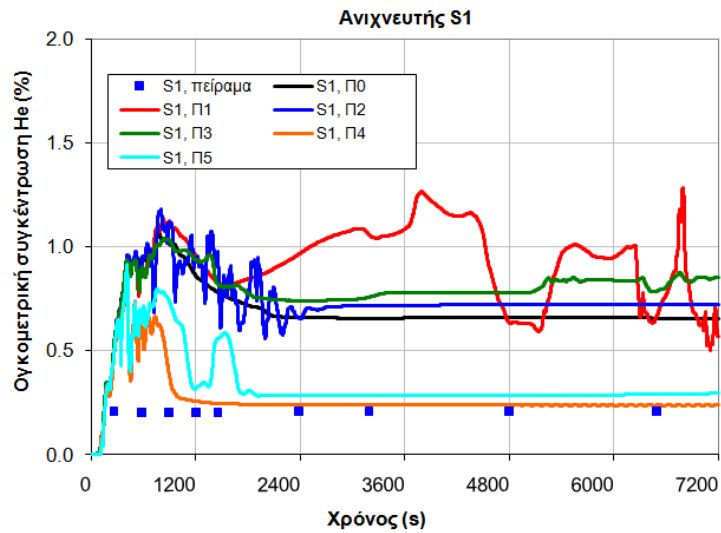
	Συνολικό πλήθος κελιών	Πλήθος κελιών στο χώρο	X-κατεύθυνση		Y-κατεύθυνση		Z-κατεύθυνση		Παρατηρήσεις
			Ελάχιστο στο χώρο στάθμευσης (m)	Μέγιστο στο χώρο στάθμευσης (m)	Ελάχιστο στο χώρο στάθμευσης (m)	Μέγιστο στο χώρο στάθμευσης (m)	Ελάχιστο στο χώρο στάθμευσης (m)	Μέγιστο στο χώρο στάθμευσης (m)	
			Λόγος μεταβολής πλέγματος (στο χώρο στάθμευσης)		Λόγος μεταβολής πλέγματος (στο χώρο στάθμευσης)		Λόγος μεταβολής πλέγματος (στο χώρο στάθμευσης)		
0	101.887 (88×26×48)	29.683	0,02 πόρτα 0,05 έκλυση	0,26 αυτοκίνητ ο	0,1 έκλυση	0,12 τοιχώμα	0,04 έκλυση	0,11 οροφή	Συμμετρία, επέκταση πλέγματος κατά x, y και z
			0,83-1,2		0,85 - 1,0		0,83-1,2		
1	59.455 (78×18×48)	29.683	0,02 πόρτα 0,05 έκλυση	0,26 αυτοκίνητ ο	0,1 έκλυση	0,12 τοιχώμα	0,04 έκλυση	0,11 οροφή	Συμμετρία, επέκταση πλέγματος μόνο κατά x και z
			0,83-1,2		0,85-1,0		0,84-1,16 (1 κελί στο άνω και κάτω άνοιγμα)		
2	69.127 (78×26×38)	29.683	0,02 πόρτα 0,05 έκλυση	0,26 αυτοκίνητ ο	0,1 έκλυση	0,12 τοιχώμα	0,04 έκλυση	0,11 οροφή	Συμμετρία, επέκταση πλέγματος μόνο κατά x και y
			0,83-1,2		0,85-1,0		0,84-1,16 (1 κελί στο άνω και κάτω άνοιγμα)		
3	178.814 (78×52×48)	59.366	0,02 πόρτα 0,05 έκλυση	0,26 αυτοκίνητ ο	0,1 έκλυση	0,12 τοιχώμα	0,04 έκλυση	0,11 οροφή	Όχι υπόθεση συμμετρίας
			0,83-1,2		0,85-1,0		0,84-1,16 (1 κελί στο άνω και κάτω άνοιγμα)		

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

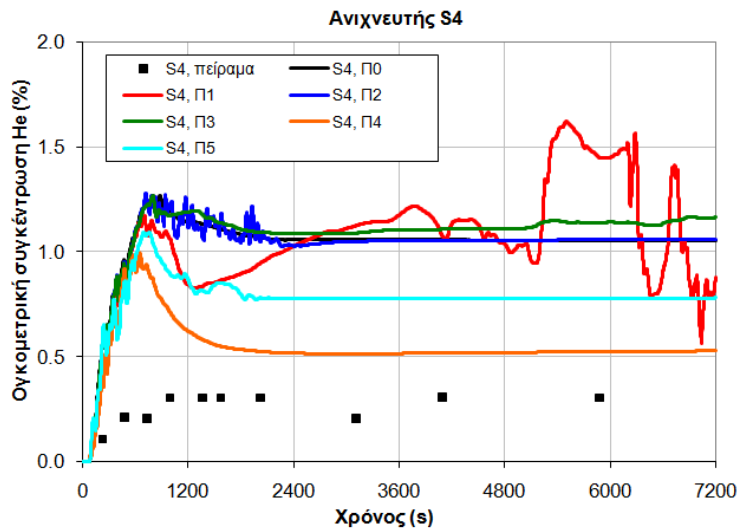
4	56.163 (71×25×34)	18.661	0,1 έκλυση	0,147 ανοίγματα	0,1 έκλυση	0,139 τοιχώμα	0,1 έκλυση	0,149 οροφή	Συμμετρία, ομοιόμορφο πλέγμα στο χώρο στάθμευσης, επέκταση πλέγματος κατά x, y και z
			1,01		1,02		1,02 (1 κελί μερικώς ελεύθερο στο άνω και κάτω άνοιγμα)		
5	148.572 (114×46×53)	107.126	0,05 έκλυση	0,1 ανοίγματα	0,05 έκλυση	0,07 τοιχώμα	0,051	0,1	Συμμετρία, ομοιόμορφο πλέγμα στο χώρο στάθμευσης, πυκνότερο από περίπτωση 4, επέκταση πλέγματος κατά x, y και z
			1,01		1,01		1,02 (2 κελιά στο κάτω άνοιγμα, 1 κελί στο άνω)		

Τα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 24 έως Σχήμα 27) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε σύγκριση με τα πειραματικά στις 4 θέσεις των ανιχνευτών. Όπως φαίνεται από τα σχήματα η απουσία επέκτασης του πλέγματος εκτός του χώρου στάθμευσης κατά την οριζόντια κατεύθυνση (y-κατεύθυνση) δημιουργεί μεγάλες διακυμάνσεις στη συγκέντρωση He (προσομοίωση Π1) και στις 4 θέσεις των ανιχνευτών. Εκτός από την περίπτωση Π1, όλες οι υπόλοιπες προσομοιώσεις προέβλεψαν παρόμοιες συγκεντρώσεις στους άνω ανιχνευτές (Σχήμα 26 και Σχήμα 27). Το ενδιαφέρον μετατοπίζεται λοιπόν στις προβλέψεις των κάτω ανιχνευτών των προσομοιώσεων Π0, Π2, Π3, Π4 και Π5 οι οποίες υπερεκτιμούν όλες τις πειραματικές μετρήσεις. Όπως φαίνεται από τα σχήματα, τα αποτελέσματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 2 ομάδες. Η μία περιλαμβάνει τις προσομοιώσεις Π0, Π2 και Π3 οι οποίες έχουν το ίδιο πλέγμα μέσα στο χώρο αλλά στο Π2 το πλέγμα δεν επεκτάθηκε κατά την z κατεύθυνση, στο Π3 δεν ελήφθη υπ' όψιν η υπόθεση συμμετρίας. Σε αυτήν την ομάδα οι προβλέψεις απέχουν περισσότερο από τις πειραματικές σε σχέση με τις προβλέψεις των Π4 και Π5. Στην προσομοίωση Π4 όπως αναφέρθηκε, το πλέγμα μέσα στον χώρο ήταν αραιότερο από αυτό των Π0, Π1, Π2 και Π3 ωστόσο οι προβλέψεις βρίσκονται πιο κοντά στις πειραματικές από αυτές της 1^{ης} ομάδας. Σε όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το σχήμα ανάντη διαφορών 1^{ης} τάξης για τη χωρική διακριτοποίηση των όρων μεταφοράς. Αυτό το σχήμα είναι γνωστό ότι λόγω του σημαντικού σφάλματος αποκοπής είναι δυνατό να δημιουργήσει τη λεγόμενη αριθμητική ή αλλιώς υπολογιστική διάχυση (numerical diffusivity) η οποία μπορεί να είναι πιο έντονη από την πραγματική μοριακή ή τυρβώδη διάχυση ιδιαίτερα σε αραιά πλέγματα. Πιθανότατα στην περίπτωση Π4 η βελτίωση των αποτελεσμάτων στους κάτω ανιχνευτές να οφείλεται στην εμφάνιση της αριθμητικής διάχυσης. Ωστόσο αυτό το σχήμα παράγει θεωρητικά καλά αποτελέσματα σε σενάρια όπου οι μεταβολές των φυσικών ποσοτήτων της ροής δεν είναι μεγάλες, κάτι που αναμένεται στα πειράματα του Swain. Τέλος, η προσομοίωση Π5 (με το πυκνότερο πλέγμα) έδωσε προβλέψεις πολύ κοντά στις πειραματικές και στους 4 ανιχνευτές.

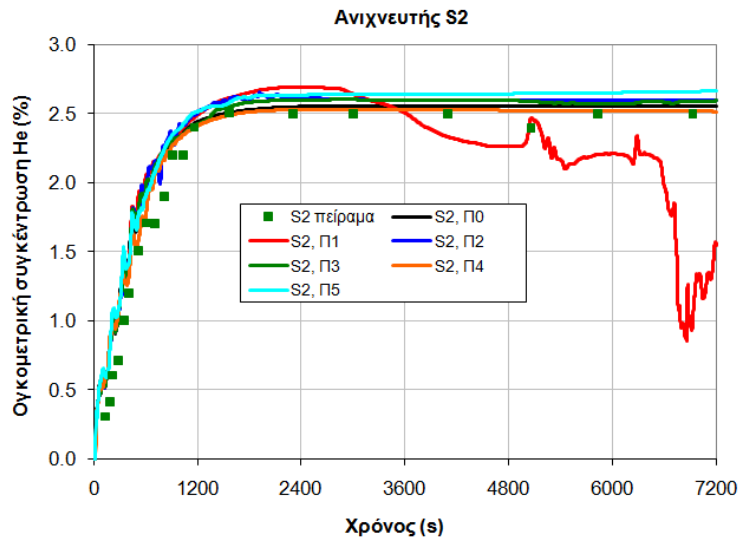
Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό



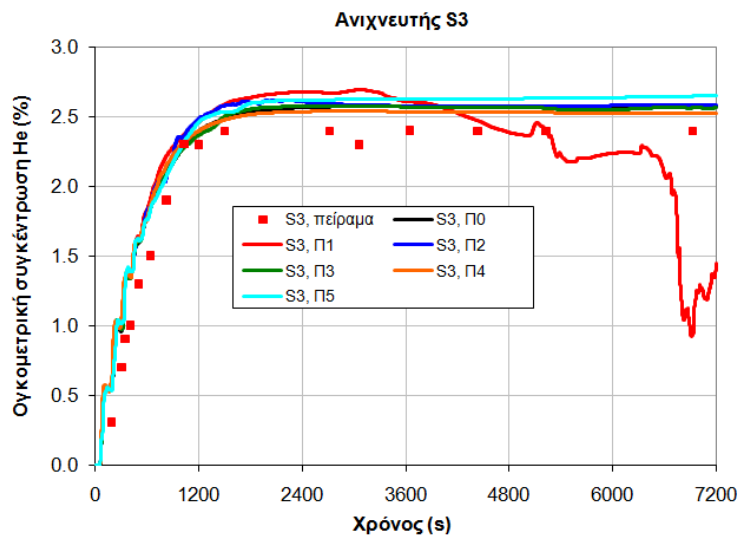
Σχήμα 24: Ογκομετρική συγκέντρωση He (%) των προσομοιώσεων (πείραμα 1- κάτω ανιχνευτής S1, κοντά στην πηγή)



Σχήμα 25: Ογκομετρική συγκέντρωση He (%) των προσομοιώσεων (πείραμα 1- κάτω ανιχνευτής S4, κοντά στο άνοιγμα αερισμού)



Σχήμα 26: Ογκομετρική συγκέντρωση He (%) των προσομοιώσεων (πείραμα 1- άνω ανιχνευτής S3)



Σχήμα 27: Ογκομετρική συγκέντρωση He (%) των προσομοιώσεων (πείραμα 1- άνω ανιχνευτής S4, κοντά στο άνοιγμα αερισμού)

7.5 Σύγκριση μεταξύ προσομοιώσεων με τον κώδικα ADREA-HF και με άλλους CFD κώδικες

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις των τριών πειραμάτων του Swain (Swain, 1998) με τον κώδικα CFD ADREA-HF χρησιμοποιώντας το μοντέλο k-ε σε σύγκριση με 3 διαφορετικές υπολογιστικές μεθοδολογίες άλλων κωδικών CFD (Παρανικολαου, 2010) από τους εταιρους του HySafe προκειμένου να αξιολογηθούν οι μεθοδολογίες και να προταθούν Οδηγίες Καλής Πρακτικής για τέτοιου είδους σενάρια. Συγκεκριμένα, το μοντέλο k-ε χρησιμοποιήθηκε από δυο εταιρους (DNV και UPM) ενώ ο τρίτος (JRC) υπέθεσε στρωτή ροή αλλά παράλληλα χρησιμοποίησε το μοντέλο SST και το τροποποιημένο για μικρούς αριθμούς Reynolds μοντέλο SST. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφόρων μεθοδολογιών (Πίνακας 6 και Πίνακας 7).

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

Πίνακας 6: Βασικά χαρακτηριστικά μεθοδολογιών CFD I (κώδικας, μοντέλο και σχήματα διακριτοποίησης)

Εταιρικός	CFD κώδικας	Μοντέλο	Σχήματα διακριτοποίησης C: όροι μεταφοράς, T: χρονικοί όροι
DNV	FLACS 9	k-ε $\sigma_k=1,0, \sigma_\epsilon=1,3, \sigma=0,7$	C: σχήμα K 2 ^{ης} τάξης (μίγμα σχήματος ανάντη και κεντρικών διαφορών) T: 1 ^{ης} τάξης κατάντη Euler
JRC	CFX 11 SP1	Στρωτή ροή, SST, τροποποιημένο για μικρούς αριθμούς Reynolds SST	C: σχήμα 2 ^{ης} τάξης T: 2 ^{ης} τάξης κατάντη Euler
NCSR D	ADREA-HF	k-ε $\sigma_k=1,0, \sigma_\epsilon=1,3, \sigma=0,72$	C: 1 ^{ης} τάξης ανάντη T: 1 ^{ης} τάξης πεπλεγμένη
UPM	FLUENT	k-ε	C: 2 ^{ης} τάξης ανάντη T: 1 ^{ης} τάξης πεπλεγμένη

Πίνακας 7: Βασικά χαρακτηριστικά μεθοδολογιών CFD II (χαρακτηριστικά πλέγματος, χρονικό βήμα, αρχικές και οριακές συνθήκες)

Εταιρικός	Υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα	Χρονικό βήμα, CPU	Αρχικές και οριακές συνθήκες
DNV	Επέκταση κατά 10% (Π1, Π2) και 55% (Π3) στην x κατεύθυνση Π1: 13.000 κελιά, 40×13×25, ελάχιστο: 0,1 m στην x, 0,2 m στην y, 0,06 m στην z μέγιστο: 0,31 m στην x, 0,38 m στην y, 0,18 m στην z Π2: 14.560 κελιά, 40×13×28, ελάχιστο: 0,1 m στην x, 0,2 m στην y, 0,04 m στην z μέγιστο: 0,31 m στην x, 0,38 m στην y, 0,18 m στην z Π3: 16.575 κελιά, 51×13×25, ελάχιστο: 0,1 m στην x, 0,2 m στην y, 0,06 m στην z μέγιστο: 0,28 m στην x, 0,38 m στην y, 0,18 m στην z	Χρονικό βήμα: 0,01 s 2CPU DELL Intel Xeon 2,66 GHz (ο κώδικας χρησιμοποιεί 1 CPU), 2GB RAM Χρόνος υπολογισμού: 100 h (Π1), 230 h (Π2), 100 h (Π3)	Θερμοκρασία: 20°C, έκλυση: 3,284·10 ⁻⁴ kg/s, επιφάνεια έκλυσης 0,02 m ² , έδαφος και λοιπές στερεές επιφάνειες: συνθήκη μη ολίσθησης και λογαριθμικός νόμος, λοιπές επιφάνειες: ατμοσφαιρική πίεση και μηδενική κλίση για λοιπές μεταβλητές
JRC	Αρχικά αποτελέσματα: επέκταση κατά 50% και 100% στην x και z κατεύθυνση, 418.945 κελιά (81.374 κόμβοι), Τελικά αποτελέσματα: επέκταση κατά 100% στην x και y κατεύθυνση και 300% στην z, 399.002 κελιά (77.082 κόμβοι) έως 453.074 (88.819 κόμβοι)	Προσαρμοστική τεχνική επιλογής χρονικού βήματος (ελάχιστο: 0,1 s και μέγιστο: 1 s), 8 Intel Xeon 3 GHz, χρόνος υπολογισμού: 106 h	Θερμοκρασία: 15°C, έκλυση: 3,4·10 ⁻⁴ kg/s, παράπλευρες επιφάνειες: συμμετρία, οροφή: συνθήκη ανοιχτού συνόρου, ανατολικά: συνθήκη εξόδου, έδαφος και λοιπές στερεές επιφάνειες: συνθήκη μη ολίσθησης
NCSR D	Υπόθεση συμμετρίας, επέκταση κατά 100% (x και z κατεύθυνση) και 50% (y κατεύθυνση), ομοιομορφία πλέγματος, Π1: 31.411 κελιά, Π2: 36.411 κελιά, Π3: 22.364 κελιά	Μέγιστο επιτρεπόμενο βήμα: 0,1 s, Intel Xeon CPU 5150@3GHz, 4GB RAM, χρόνος υπολογισμού: 17 h (Π1), 15 h (Π2), 10 h (Π3)	Θερμοκρασία: 20°C, έκλυση: 0,1 m/s, επιφάνεια έκλυσης 0,01 m ² , συμμετρία, σταθερή πίεση στην οροφή, βασικές συναρτήσεις τοίχου στις στερεές επιφάνειες, συνθήκη ανοιχτού συνόρου στις λοιπές επιφάνειες

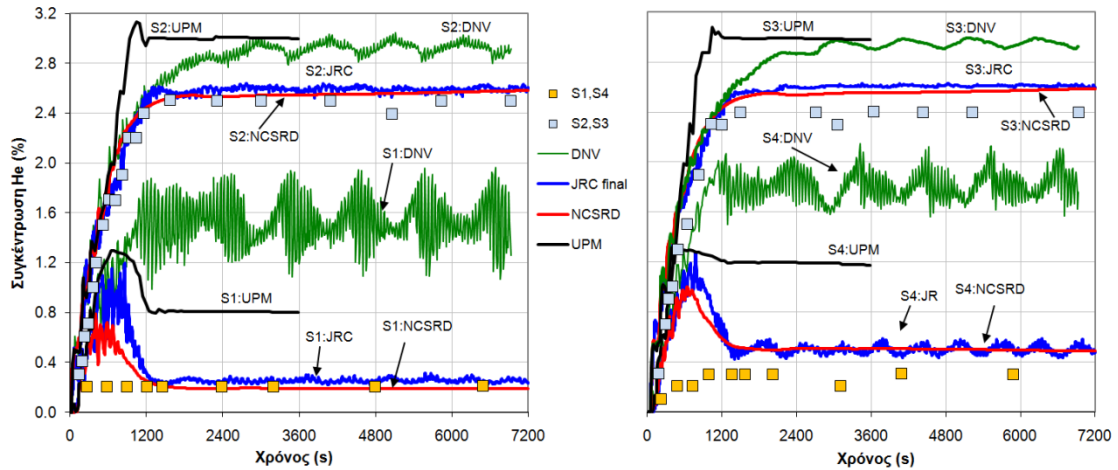
Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

UPM	Επέκταση κατά 50% στην x κατεύθυνση, 320.272 κελιά	Χρονικό βήμα: 0,1 s, χρόνος υπολογισμού: 80 h, 4 CPU Intel Xeon 2,66 GHz	Θερμοκρασία: 20°C, έκλυση: $3,2 \cdot 10^{-4}$ kg/s, επιφάνεια έκλυσης 0,02 m ² , έδαφος και λοιπές στερεές επιφάνειες: συνθήκη μη ολίσθησης, λοιπές επιφάνειες: συνθήκη ανοιχτού συνόρου (ατμοσφαιρική πίεση)
-----	--	--	---

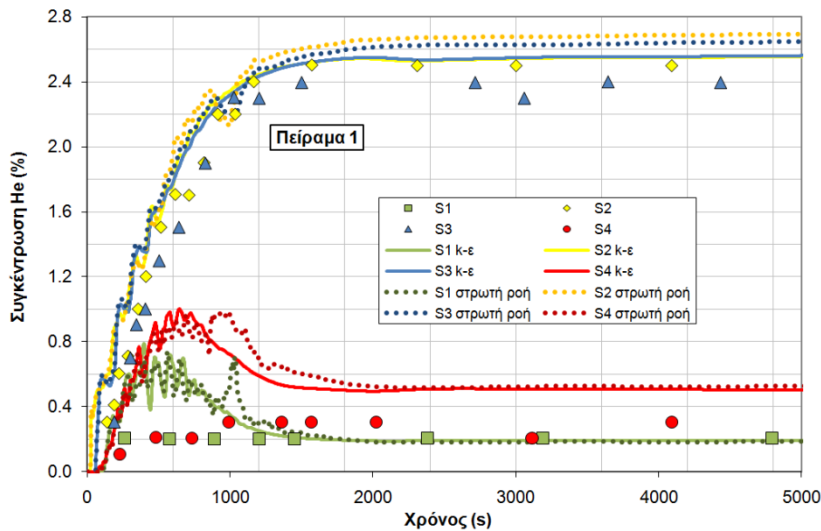
Στο Σχήμα 28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ποσοστιαίων συγκεντρώσεων He στους ανιχνευτές κοντά στην πηγή και τα ανοίγματα του πειράματος 1 (μικρά ανοίγματα). Γενικά, όλα τα αριθμητικά αποτελέσματα υπερεκτίμησαν τα πειραματικά. Η μικρότερη υπερεκτίμηση ήταν στους άνω ανιχνευτές και ιδιαίτερα αυτή των αποτελεσμάτων του NCSR D και JRC. Για τους κάτω ανιχνευτές, την μικρότερη υπερεκτίμηση εμφάνισαν και πάλι οι υπολογισμοί του NCSR D και JRC ενώ οι άλλοι 2 εταίροι υπερεκτίμησαν τα πειραματικά κατά παράγοντα μεγαλύτερο του 2. Οι υπολογισμοί του JRC και NCSR D έγιναν μοντελοποιώντας τη ροή είτε ως στρωτή είτε με το μοντέλο k-ε αντίστοιχα. Οι υπόλοιποι εταίροι χρησιμοποίησαν το μοντέλο k-ε. Όπως φαίνεται, η επιλογή του μοντέλου δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Προς επαλήθευση αυτής της διαπίστωσης επανελήφθη από το NCSR D το πείραμα 1 με τα ίδια υπολογιστικά χαρακτηριστικά αλλά υποθέτοντας στρωτή ροή. Τα αποτελέσματα των 2 προσομοιώσεων ήταν σχεδόν παρόμοια όπως φαίνεται από το Σχήμα 29. Μια μικρή αύξηση των συγκεντρώσεων παρατηρείται στην περίπτωση στρωτής ροής, πράγμα αναμενόμενο λόγω της ασθενέστερης διάχυσης. Από την άλλη πλευρά, το JRC επανέλαβε το πείραμα 1 χρησιμοποιώντας το μοντέλο SST. Τα αποτελέσματα ήταν και σ' αυτήν την περίπτωση παρόμοια με αυτά της στρωτής ροής. Τα αποτελέσματα του DNV παρουσιάζουν διακυμάνσεις οι οποίες είναι εντονότερες στους κάτω ανιχνευτές. Σ' αυτήν την περίπτωση, η επέκταση του υπολογιστικού χωρίου πέραν του χώρου στάθμευσης ήταν η μικρότερη σε σχέση με τους υπολογισμούς των υπολοίπων εταιρών (επέκταση μόνο κατά 10% στην x κατεύθυνση). Επίσης, το DNV διαπίστωσε βραδύτερη σύγκλιση όταν το υπολογιστικό χωρίο είχε ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις με αυτές του χώρου στάθμευσης. Επιπλέον, η αρχική προσομοίωση του JRC με επέκταση του χωρίου κατά 50% και 100% στην x και z κατεύθυνση αντίστοιχα, παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν του DNV. Στο Σχήμα 30 και στο Σχήμα 31 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες συγκεντρώσεις He της αρχικής και τελικής προσομοίωσης του JRC. Ομοίως με την περίπτωση της προσομοίωσης του DNV, οι διακυμάνσεις είναι εντονότερες στους κάτω ανιχνευτές. Από τα 2 σχήματα φαίνεται όχι μόνο η σημαντική μείωση των διακυμάνσεων με την επέκταση του χωρίου στις 3 διαστάσεις, αλλά επίσης η βελτίωση των αποτελεσμάτων αφού πλέον οι μέσες τιμές της ποσοστιαίας συγκέντρωσης He της τελικής προσομοίωσης βρίσκονται πλησιέστερα στις πειραματικές. Όπως φαίνεται, οι διαφορετικές διαστάσεις των υπολογιστικών χωρίων που επελέγησαν από τους εταίρους (και κατά συνέπεια οι οριακές συνθήκες) επηρέασαν την κατανομή της πίεσης στα ανοίγματα αερισμού η οποία με τη σειρά της επηρέασε την κατανομή της συγκέντρωσης He μέσα στο χώρο. Η επίδραση των συνθηκών των ανοιγμάτων αερισμού στην κατανομή των συγκεντρώσεων H₂ μέσα σε κλειστό χώρο μελετήθηκε πρόσφατα από τους Matsuura και συν. (2008). Σ' αυτήν την περίπτωση H₂ διέρρεε με παροχή έκλυσης παρόμοια της παρούσης μελέτης μέσα σε διάδρομο με ανοίγματα αερισμού. Το υπολογιστικό χωρίο είχε τις ίδιες

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

διαστάσεις με αυτές του διαδρόμου και επεβλήθη συνθήκη σταθερής πίεσης στα ανοίγματα. Οι Matsuiwa και συν. (2008) έδειξαν ότι ακόμα και μια μικρή αύξηση της πίεσης στο κάτω άνοιγμα (της τάξεως των 0,5 Pa) επηρέασε σημαντικά την κατανομή H_2 στο χώρο και ιδιαιτέρως στους ανιχνευτές κοντά στο έδαφος. Τέλος, τα αποτελέσματα (στην πλειοψηφία τους) στους κάτω ανιχνευτές στο Σχήμα 28 εμφανίζουν μια κορυφή που ακολουθείται από ελάττωση της συγκέντρωσης μέχρι τις συνθήκες μόνιμης ροής. Τέτοια συμπεριφορά δεν εμφανίζουν οι πειραματικές μετρήσεις. Αυτό το μεταβατικό φαινόμενο οφείλεται πιθανότατα στο χρόνο που απαιτείται ώστε η συνολική ροή μέσα στο χώρο να φθάσει σε μόνιμες συνθήκες.



Σχήμα 28: Πείραμα 1 (μικρά ανοίγματα): συγκέντρωση He %, αριστερά: ανιχνευτές κοντά στην πηγή (S1, S2), δεξιά: ανιχνευτές κοντά στα ανοίγματα (S3, S4)

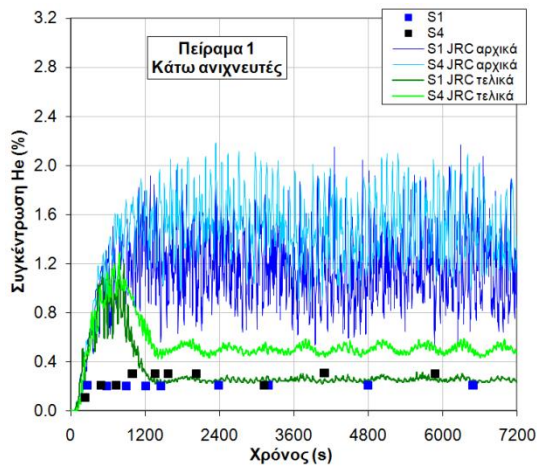


Σχήμα 29: NCSR αποτελέσματα με το μοντέλο $k-\epsilon$ και με υπόθεση στρωτής ροής (πείραμα 1 – μικρά ανοίγματα)

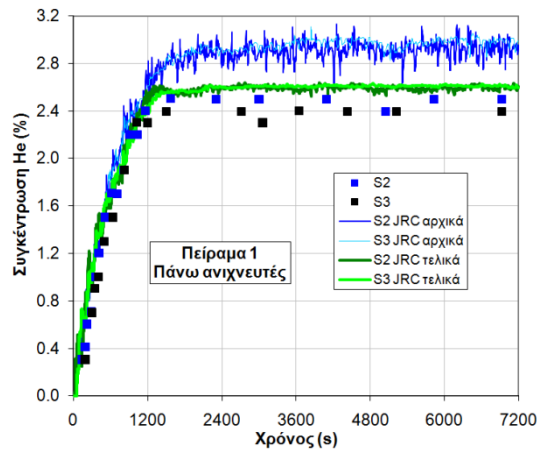
Στο Σχήμα 32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ποσοστιαίων συγκεντρώσεων He στους ανιχνευτές κοντά στην πηγή και τα ανοίγματα του πειράματος 2 (μεσαία ανοίγματα). Ομοίως με την περίπτωση του πειράματος 1, τα αποτελέσματα υπερεκτιμούν τις συγκεντρώσεις κοντά στην οροφή και στο έδαφος κοντά στο άνοιγμα ενώ στον ανιχνευτή κοντά στην πηγή εμφανίζεται μια μικρή υποεκτίμηση.

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

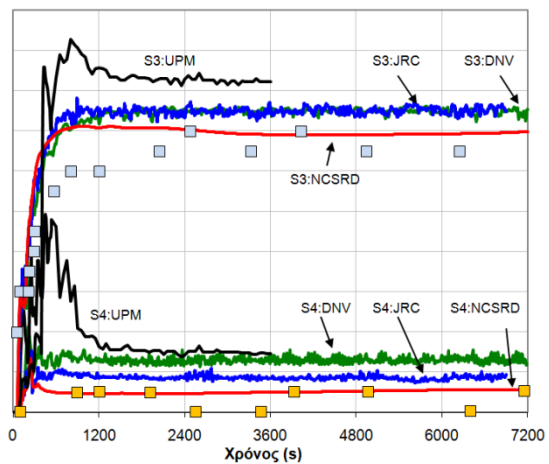
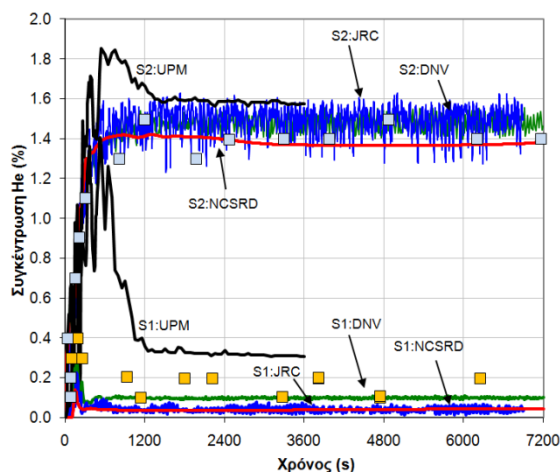
Επίσης, και σ' αυτήν την περίπτωση, οι εταιρείοι με το μεγαλύτερο υπολογιστικό χωρίο παρουσίασαν αποτελέσματα πλησιέστερα των πειραματικών. Αυτή τη φορά οι διακυμάνσεις των αποτελεσμάτων του DNV μειώθηκαν σημαντικά.



Σχήμα 30: Αρχικά και τελικά αποτελέσματα εταιρείου JRC (πείραμα 1 – κάτω ανιχνευτές)



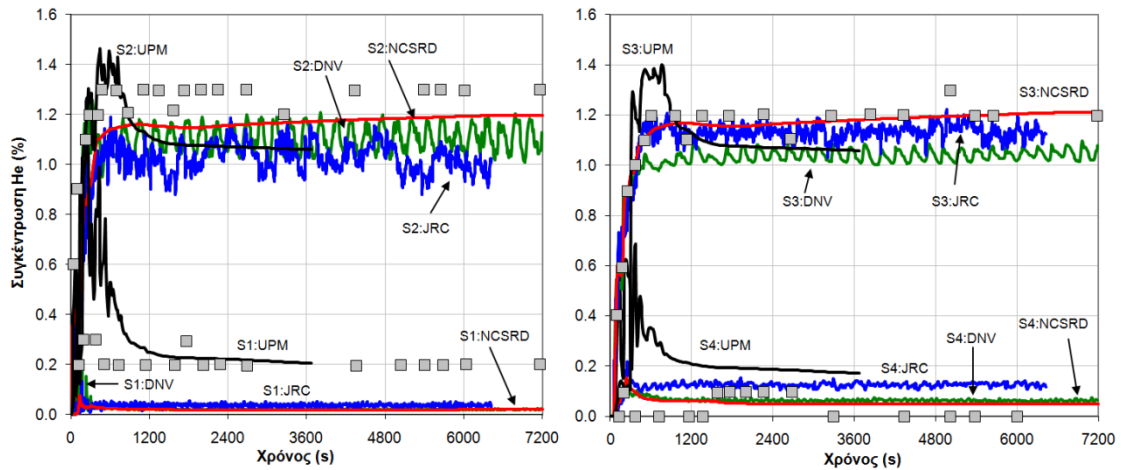
Σχήμα 31: Αρχικά και τελικά αποτελέσματα εταιρείου JRC (πείραμα 1 – άνω ανιχνευτές)



Σχήμα 32: Πείραμα 2 (μεσαία ανοίγματα): συγκέντρωση He %, αριστερά: ανιχνευτές κοντά στην πηγή (S1, S2), δεξιά: ανιχνευτές κοντά στα ανοίγματα (S3, S4)

Στο Σχήμα 33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ποσοστιαίων συγκεντρώσεων He στους ανιχνευτές κοντά στην πηγή και τα ανοίγματα του πειράματος 3 (μεγάλα ανοίγματα). Σ' αυτήν την περίπτωση όλοι οι εταιρείοι υποεκτίμησαν τις πειραματικές συγκεντρώσεις κοντά στην οροφή ενώ υποεκτίμησαν ή υπερεκτίμησαν τις συγκεντρώσεις κοντά στο έδαφος. Οι διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις ελαττώθηκαν περισσότερο. Το DNV επανέλαβε την προσομοίωση του πειράματος με μικρότερο χρονικό βήμα (0,001 s) χωρίς καμία επίδραση στα αποτελέσματα. Το JRC χρησιμοποίησε το τροποποιημένο για μικρούς αριθμούς Reynolds μοντέλο SST με πυκνότερο πλέγμα. Τα αποτελέσματα δεν διέφεραν σημαντικά σε σχέση με αυτά της στρωτής ροής.

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό



Σχήμα 33: Πείραμα 3 (μεγάλα ανοίγματα): συγκέντρωση He %, αριστερά: ανίχνευτές κοντά στην πηγή (S1, S2), δεξιά: ανίχνευτές κοντά στα ανοίγματα (S3, S4)

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τους στατιστικούς δείκτες επίδοσης των διαφόρων μεθοδολογιών CFD ξεχωριστά και συνολικά. Οι πειραματικές και προβλεφθείσες τιμές είναι οι μέσες τιμές των υπολογισμών μετά τα πρώτα 1.200 s της έκλυσης ώστε η ροή να έχει φτάσει σε μόνιμες συνθήκες. Στον πίνακα παρουσιάζονται επίσης οι τιμές για ιδανική επίδοση και τα κριτήρια αποδοχής όπως καθορίστηκαν από τον Hanna (1989) και τους Hanna και συν. (1993). Όπως φαίνεται από τον πίνακα, οι τιμές του δείκτη MG είναι αυτές που βρίσκονται συχνότερα εκτός των ορίων αποδοχής. Ακολουθεί ο δείκτης VG και τέλος ο FB. Οι τιμές των δεικτών MG και VG είναι γνωστό ότι επηρεάζονται σημαντικά από χαμηλές μετρούμενες (πειραματικές) και προβλεφθείσες (υπολογιστικές) τιμές ενώ δεν ορίζονται για μηδενικές τιμές. Οι Chang and Hanna (2004) και (2005) συνέστησαν τον ορισμό κατώτατου ορίου κατωφλίου κατά τον υπολογισμό των δεικτών MG και VG. Πρότειναν, το όριο αυτό να είναι το όριο ανίχνευσης των οργάνων (LOD). Πειραματικές ή υπολογιστικές τιμές μικρότερες από το όριο ανίχνευσης των οργάνων θα πρέπει να αντικαθίστανται από αυτό. Η πρόταση των Chang and Hanna δεν υλοποιήθηκε διότι δεν ήταν γνωστά τα όρια ανίχνευσης των οργάνων. Ο πίνακας δείχνει ότι η σταδιακή αύξηση των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού προκαλεί μετατόπιση της φύσης των σφαλμάτων των υπολογισμών από συστηματικά σε μη.

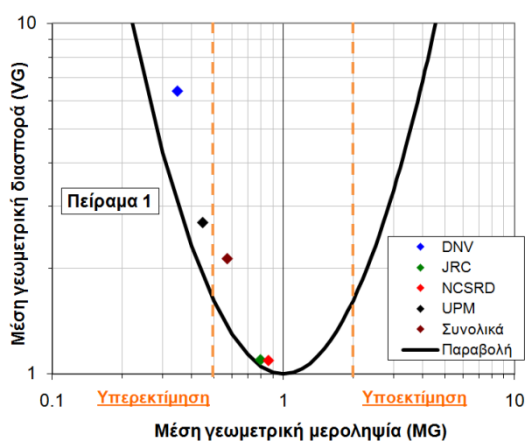
Πίνακας 8: Στατιστικοί δείκτες επίδοσης μεθοδολογιών CFD (με έντονο μπλε χρώμα επισημαίνονται οι τιμές που ήταν εκτός των κριτηρίων αποδοχής)

Στατιστικοί δείκτες	Συστηματικά σφάλματα		Συστηματικά και μη συστηματικά σφάλματα	
	FB	MG	NMSE	VG
Ιδανική τιμή	0	1	0	1
Κριτήριο αποδοχής	$ FB < 0,3$	$0,7 < MG < 1,3$	$NMSE < 1,5$	$VG < 4$
Πείραμα 1				
DNV	-0.53	0.35	0.37	6.40
JRC	-0.11	0.79	0.01	1.10
NCSR	-0.09	0.86	0.01	1.09
UPM	-0.39	0.45	0.17	2.71
Συνολικά	-0.33	0.54		2.34
Πείραμα 2				

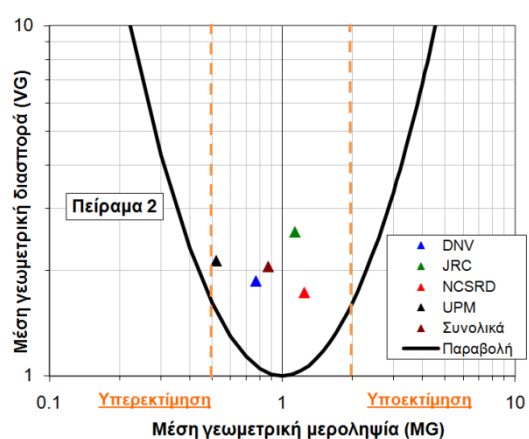
Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

DNV	-0.12	0.77	0.03	1.87
JRC	-0.07	1.13	0.03	2.57
NCSRД	0.02	1.24	0.01	1.73
UPM	-0.26	0.52	0.08	2.13
Συνολικά	-0.15	0.77		2.15
Πείραμα 3				
DNV	0.19	1.6	0.06	4.29
JRC	0.18	1.23	0.08	4.04
NCSRД	0.12	1.69	0.02	4.84
UPM	0.08	0.69	0.05	2.15
Συνολικά	0.06	1.01		3.91

Τα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 34, Σχήμα 35 και Σχήμα 36) παρουσιάζουν τις τιμές MG και VG των 4 μεθοδολογιών CFD ξεχωριστά και συνολικά σε ένα τυπικό γράφημα σύγκρισης επίδοσης μοντέλων όπως περιγράφει στην παράγραφο 7.3. Για το πείραμα 1, όλα τα αποτελέσματα υπερεκτιμούν συστηματικά τα πειραματικά. Τα αποτελέσματα των DNV και UPM υπερεκτιμούν τα πειραματικά κατά παράγοντα μεγαλύτερο του 2 ενώ αυτά των NCSRД και JRC βρίσκονται πολύ κοντά στα πειραματικά. Για το πείραμα 2, όλα τα αποτελέσματα βρίσκονται μέσα στην περιοχή των διακεκομμένων γραμμών. Αυτά με την μεγαλύτερη επέκταση του υπολογιστικού χωρίου και σε όλες τις κατευθύνσεις (JRC και NCSRД) υποεκτίμησαν τα πειραματικά ενώ τα υπόλοιπα αποτελέσματα υπερεκτίμησαν τα πειραματικά. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν συστηματική μεροληψία (συστηματική υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση) αφού τα σημεία δεν βρίσκονται κοντά στην παραβολή αλλά εγγύτερα στον άξονα $x=1$. Παρόλα αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις μεθοδολογίες εμφανίστηκε συστηματική υπερεκτίμηση της συγκέντρωσης He στον ανιχνευτή που βρισκόταν κοντά στο άνοιγμα αερισμού. Παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν του πειράματος 2 εμφανίζουν τα αποτελέσματα του πειράματος 3 αλλά αυτήν τη φορά η διασπορά είναι μεγαλύτερη. Η υπερεκτίμηση της συγκέντρωσης He στον ανιχνευτή που βρισκόταν κοντά στο άνοιγμα αερισμού ήταν γενικά μεγαλύτερη από αυτήν του πειράματος 2.

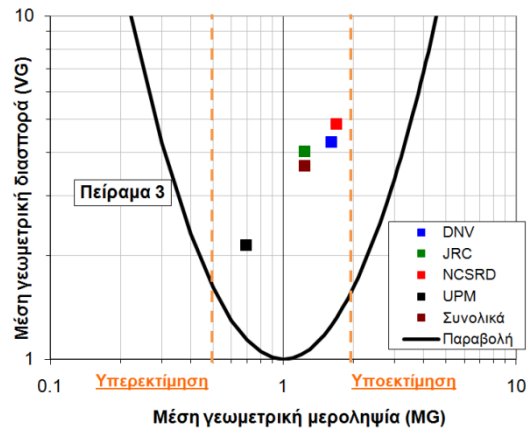


Σχήμα 34: Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη χρήση των στατιστικών δεικτών MG και VG (πείραμα 1: μικρά ανοίγματα)



Σχήμα 35: Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη χρήση των στατιστικών δεικτών MG και VG (πείραμα 2: μεσαία ανοίγματα)

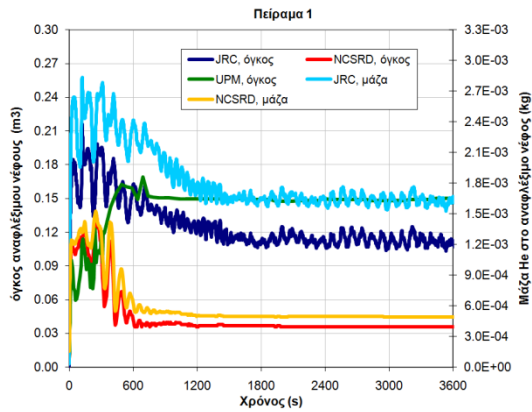
Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό



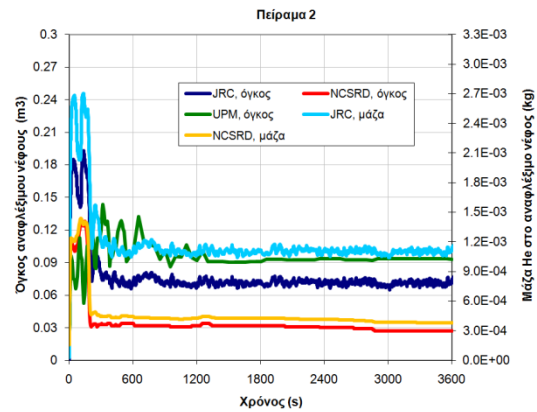
Σχήμα 36: Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη χρήση των στατιστικών δεικτών MG και VG (πείραμα 3: μεγάλα ανοίγματα)

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την εκτίμηση κινδύνου ατυχημάτων διαρροής είναι ο όγκος του αναφλέξιμου μίγματος. Στην περίπτωση διαρροής H₂ το αναφλέξιμο νέφος ορίζεται ως το μίγμα με συγκέντρωση H₂ μεταξύ 4% και 75% κατ' όγκο. Τα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 37, Σχήμα 38 και Σχήμα 39) παρουσιάζουν τον όγκο και την περιεχόμενη μάζα He σ' αυτόν, όπως υπολογίστηκε από το NCSRД και JRC για τα 3 πειράματα του Swain. Αποτελέσματα του όγκου του αναφλέξιμου νέφους παρουσιάζονται επίσης από το UPM. Για τα πειράματα 1 και 2 μεγαλύτερες τιμές εμφάνισαν τα αποτελέσματα του UPM, ακολούθως αυτά του JRC και τέλος του NCSRД. Οι μεγαλύτερες τιμές του UPM ήταν αναμενόμενες εφόσον στη σύγκριση των συγκεντρώσεων He με τους ανιχνευτές, το UPM υπερεκτίμησε τις πειραματικές σε όλους τους ανιχνευτές και στα 2 πειράματα. Για το πείραμα 3, τις μεγαλύτερες τιμές εμφάνισε το JRC, ακολούθως το UPM και τέλος το NCSRД. Οι τιμές του όγκου και της μάζας του αναφλέξιμου νέφους του JRC ήταν γενικά σχεδόν τριπλάσιες από αυτές του NCSRД (Πείραμα 1: α) JRC: 0,12 m³ και 1,68·10⁻³ kg, β) NCSRД: 0,035 m³ και 4,96·10⁻⁴ kg, Πείραμα 2: α) JRC: 0,07 m³ και 1,16·10⁻³ kg, β) NCSRД: 0,031 m³ και 4,18·10⁻⁴ kg και Πείραμα 3: α) JRC: 0,105 m³ και 1,60·10⁻³ kg, β) NCSRД: 0,037 m³ και 5,2·10⁻⁴ kg). Ωστόσο, οι τιμές των συγκεντρώσεων He στους 4 ανιχνευτές αυτών των 2 μεθοδολογιών ήταν οι πλησιέστερες τόσο με τις πειραματικές όσο και μεταξύ τους. Για ασφαλέστερη λοιπόν σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μεθοδολογιών CFD, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση κινδύνου ατυχημάτων διαρροής, είναι απαραίτητη η χρήση περισσότερων πειραματικών δεδομένων (περισσότεροι ανιχνευτές μέσα στο χώρο καθώς και χρήση οπτικών μεθόδων όπως π.χ. η BOS για γενικότερες πληροφορίες της έκτασης/μεγέθους του εκλυθέντος αερίου μέσα στο χώρο).

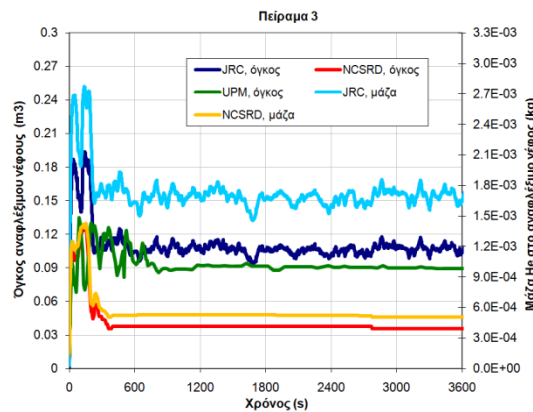
Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έλκυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό



Σχήμα 37: Όγκος αναφλέξιμου μίγματος και περιεχόμενη μάζα H_2 σε αυτό (πείραμα 1: μικρά ανοίγματα)



Σχήμα 38: Όγκος αναφλέξιμου μίγματος και περιεχόμενη μάζα H_2 σε αυτό (πείραμα 2: μεσαία ανοίγματα)



Σχήμα 39: Όγκος αναφλέξιμου μίγματος και περιεχόμενη μάζα H_2 σε αυτό (πείραμα 3: μεγάλα ανοίγματα)

7.6 Γενικά Συμπεράσματα

Αρχικά έγινε σύγκριση της επίδοσης των μοντέλων k-ε και LVEL με τα πειραματικά δεδομένα 3 σεναρίων έλκυσης He παροχής 7.200 l/h μέσα σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με μικρά, μεσαία και μεγάλα ανοίγματα φυσικού αερισμού (πειράματα Swain, 1998). Τα αποτελέσματα στους άνω ανιχνευτές σχεδόν ταυτίζονταν με τα δεδομένα για τα πειράματα με τα μικρά και μεσαία ανοίγματα ενώ εμφάνισαν μια μικρή υποεκτίμηση στο πείραμα με τα μεγάλα ανοίγματα. Ωστόσο η επίδοση και των 2 μοντέλων ήταν πολύ καλή. Στην περίπτωση των κάτω ανοιγμάτων, και τα 2 μοντέλα υπερεκτίμησαν τα πειραματικά τόσο κοντά στο άνοιγμα όσο κοντά στην πηγή στο πείραμα με τα μικρά ανοίγματα. Στο πείραμα με τα μεσαία ανοίγματα και τα δύο μοντέλα είχαν την ίδια συμπεριφορά, υπερεκτίμησαν τη συγκέντρωση στον ανιχνευτή κοντά στο άνοιγμα ενώ υποεκτίμησαν κοντά στην πηγή. Το ίδιο συνέβη και στην περίπτωση του πειράματος με τα μεγάλα ανοίγματα αλλά με μεγαλύτερο βαθμό υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση της υπόθεσης συμμετρίας, της επέκτασης του πλέγματος κατά την κατακόρυφη και οριζόντια κατεύθυνση και της πυκνώσης και ομοιομορφίας αυτού στο πεδίο ροής για το πείραμα με τα μικρά ανοίγματα. Η υπόθεση συμμετρίας δεν επηρέασε τα αποτελέσματα. Η απουσία επέκτασης του πλέγματος εκτός του χώρου στάθμευσης κατά την οριζόντια ή κατακόρυφη κατεύθυνση δε δημιουργεί μόνο μεγάλες διακυμάνσεις στη χρονική κατανομή της συγκέντρωσης He αλλά και χειρότερες προβλέψεις στους ανιχνευτές κοντά στο έδαφος. Επίσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις He μέσα στο χώρο επηρεάζονται περισσότερο από την ομοιομορφία ή μη του πλέγματος, παρά από το πλήθος των κελιών. Η προσομοίωση με το πυκνότερο αλλά παράλληλα ομοιόμορφο πλέγμα είχε την δεύτερη καλύτερη επίδοση. Η προσομοίωση με την καλύτερη επίδοση είχε μεν ομοιόμορφο πλέγμα, αλλά ήταν αραιότερο. Πιθανότατα στην περίπτωση αυτή η βελτίωση των αποτελεσμάτων (ιδίως στους κάτω ανιχνευτές) να οφείλεται στην εμφάνιση αριθμητικής διάχυσης.

Έπειτα, συνεκρίθησαν 4 μεθοδολογίες CFD με τα πειραματικά δεδομένα του Swain (1998) χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικούς κώδικες (ADREA-HF, CFX, FLACS και FLUENT) με διάφορα μοντέλα (k-ε, SST, τροποποιημένο για χαμηλούς αριθμούς Reynolds SST και υπόθεση στρωτής ροής). Οι προβλέψεις παρουσίασαν τάση υπερεκτίμησης της συγκέντρωσης He στις θέσεις κοντά στην οροφή για τα πειράματα με τα μικρά και μεσαία ανοίγματα και τάση υποεκτίμησης για το πείραμα με τα μεγάλα ανοίγματα στις ίδιες θέσεις. Στα σημεία κοντά στο έδαφος, τα αποτελέσματα γενικά υπερεκτίμησαν τα πειραματικά για τα πειράματα με τα μικρά και μεσαία ανοίγματα. Στην περίπτωση του πειράματος με τα μεγάλα ανοίγματα τα αποτελέσματα υποεκτίμησαν ή υπερεκτίμησαν τα πειραματικά κοντά στο άνοιγμα αερισμού ενώ υπερεκτίμησαν τα πειραματικά κοντά στην πηγή.

Οι συγκεντρώσεις προσομοιώσεων με την υπόθεση στρωτής ροής είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές με το μοντέλο k-ε όπως αναμενόταν λόγω της μικρότερης διάχυσης. Γενικότερα, τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν δεν επηρέασαν τα αποτελέσματα σημαντικά. Προκειμένου να προταθεί κάποιο από τα μοντέλα ως καταλληλότερο για τέτοιου είδους σενάρια, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν περισσότερα πειραματικά δεδομένα.

Η σύγκριση των διαφόρων μεθοδολογιών ανάδειξε την σημαντική επίδραση που έχουν οι οριακές συνθήκες στην ροή μέσα στο χώρο καθώς και στην παροχή αερισμού, πράγμα που αρχικά διαπιστώθηκε στη 2^η φάση αυτής της μελέτης. Αυτό επιβεβαιώθηκε και για άλλες μεθοδολογίες CFD πέραν αυτής με τον κώδικα ADREA-HF (προσομοιώσεις NCSR). Το μέγεθος της επέκτασης του υπολογιστικού χωρίου εκτός των ορίων του χώρου στάθμευσης επηρεάζει όχι μόνο την εμφάνιση διακυμάνσεων στα αποτελέσματα, αλλά και τη μέση τιμή αυτών. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με επέκταση του υπολογιστικού χωρίου σε όλες τις κατευθύνσεις βρίσκονταν πιο κοντά στα πειραματικά.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με στατιστικούς δείκτες έδειξε ότι η σταδιακή αύξηση των ανοιγμάτων φυσικού αερισμού προκαλεί μετατόπιση της φύσης των σφαλμάτων των υπολογισμών από συστηματικά σε μη. Οι δείκτες μέσης γεωμετρικής

μεροληψίας (MG) και μέσης γεωμετρικής διασποράς (VG) είχαν τις χειρότερες τιμές. Αυτοί οι δείκτες επηρεάζονται ισχυρά από χαμηλές τιμές.

Ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι οι προσομοιώσεις με τιμές πολύ κοντά στις πειραματικές προέβλεψαν διαφορετικούς όγκους αναφλέξιμου νέφους και περιεχόμενης μάζας He σ' αυτόν. Δεν υπήρχε πειραματική πληροφορία για αυτές τις παραμέτρους καθώς από τη μια πλευρά ο αριθμός των ανιχνευτών μέσα στο χώρο στάθμευσης ήταν περιορισμένος ενώ από την άλλη δεν χρησιμοποιήθηκε καμία άλλη μέθοδος π.χ. κάποια οπτική μέθοδος για την απεικόνιση του εκλυθέντος αερίου μέσα στο χώρο. Προκειμένου να γίνει ασφαλέστερη σύγκριση των διαφόρων μεθοδολογιών CFD είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πειραματικά δεδομένα που θα περιλαμβάνουν τέτοιου είδους πληροφορίες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πειράματα του Swain ο χώρος στάθμευσης βρισκόταν σε κλειστό χώρο και ως εκ τούτου η επίδραση των καιρικών συνθηκών όπως η κατεύθυνση και η ένταση του ανέμου καθώς επίσης η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ περιβάλλοντος και χώρου δεν ήταν δυνατό να μελετηθεί. Μελλοντικές μελέτες αξιολόγησης μεθοδολογιών CFD σε σενάρια έκλυσης H₂ σε κλειστούς χώρους με φυσικό αερισμό θα πρέπει να συμπεριλάβουν την επίδραση των καιρικών συνθηκών που είναι πιθανόν να επικρατούν σε πραγματικές συνθήκες.

7.7 Βιβλιογραφικές αναφορές

ADREA-HF CFD code, manual and description of the CFD Code available online at <http://www2.ipta.demokritos.gr/pages/ADREA-HF.html>

Agranat, V., Cheng, Z. and Tchouvelev, A., (2004), “CFD modelling of hydrogen releases and dispersion in hydrogen energy station”, Proceedings of the WHEC-15, Yokohama

ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology Drive Canonsburg, USA, manual and description available online at <http://www.ansys.com/products/cfx.asp>

Barley, C.D., Gawlik, K., Ohi, J. and Hewett, R., (2007), “Analysis of buoyancy-driven ventilation of hydrogen from buildings”, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Barley C.D. and Gawlik K., (2009), “Buoyancy-driven ventilation of hydrogen from buildings: Laboratory test and model validation”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 5592-5603

Bartzis J.G., (1991), “ADREA-HF: A three-dimensional finite volume code for vapour cloud dispersion in complex terrain”, EUR Report 13580 EN.

Breitung, W., Necker, G., Kaup, B. and Veser A., (2001), “Numerical simulation of hydrogen in a private garage”, Proceedings of the 4th international symposium on hydrogen power - Theoretical and engineering solutions – Hypothesis IV, Germany

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

Chang J.C. and Hanna S.R., (2004), “Air quality model performance evaluation”, Meteorol. and Atmos. Phys., Vol. 87, pp. 167-196

Chang J.C. and Hanna S.R., (2005), “Technical descriptions and User’s Guide for the BOOT Statistical Model Evaluation Software Package, Version 2.0”

ERCOTAC Special Interest Group on “Quality and Trust in Industrial CFD”, (2000), “Best Practice Guidelines”, Casey M. and Wintergerste T., Fluid Dynamics Laboratory, Sulzec Innotec

Escanciano, Y., Kotchourko, A., et al., (2009), “A comparison exercise on the CFD detonation simulation in large scale confined volumes”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio

FLUENT code, manual and description of the CFD Code available online at <http://fluent.com/software/fluent/>

Gallego E., Migoya E., Martin-Valdepenas J.M., Crespo A., Garcia J., Venetsanos A.G., Papanikolaou E., Kumar S., Studer E., Dagba Y., Jordan T., Jahn W., Oíset S., Makarov D., (2007), “An Inter-comparison Exercise on the Capabilities of CFD Models to Predict Distribution and Mixing of H₂ in a Closed Vessel”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, Issue 13, p. 2235-2245

Garcia, J., Baraldi, D., et al., (2010), “An intercomparison exercise on the capabilities of CFD models to reproduce a large-scale hydrogen deflagration in open atmosphere”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 9, p. 4435-4444

Gupta, S., Brinster, J., Studer, E. and Tkatschenko I., (2007), “Hydrogen related risks within a private garage: concentration measurements in a realistic full scale experimental facility”, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Hanna S.R., (1989), “Confidence limits for air quality model evaluations as estimated by bootstrap and jackknife resampling methods”, Atmos. Environ., Vol. 23, pp. 1385-1398

Hanna, S.R., Chang, J.C. and Strimaitis, D.G., (1993), “Hazardous gas model evaluation with field observations”, Atmos. Environ., Vol. 27A, pp. 2265-2285

HySafe, Safety of hydrogen as an energy carrier, Network of Excellence, FP6, 2003-2009, available at: www.hysafe.org

Lacome, J.M., Dagba, Y., Jamois, D., Perrette, L. and Proust Ch., (2007), “Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area”, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Lauder B.E. and Spalding D.B., (1974), “The numerical computation of turbulent flows”, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, Issue 2, p. 269-289

Lowesmith, B.J., Hankinson, G., Spataru, C. and Stobbart M., (2007), “Gas build-up in a domestic property following releases of methane/hydrogen mixtures”, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Matsuura K., Kanayama, H., Tsukikawa, H. and Inoue M., (2008), “Numerical simulation, of leaking hydrogen dispersion behaviour in a partially open space”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 240-247

OpenCascade, available: <http://www.opencascade.org>

Paillere, H., Studer, E., Beccantini, A., Kudriakov, S., Dabbene, F. and Perret, C., (2005), “Modelling of H₂ dispersion and combustion phenomena using CFD codes”, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Papanikolaou, E.A., Venetsanos, A.G., Heitsch, M., Baraldi, D., Huser, J., Pujol, J., Garcia, J. and Markatos N., (2010), “HySafe SBEP-V20: Numerical studies of release experiments inside a naturally ventilated residential garage”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 10, pp. 4747-4757

Papanikolaou, E.A. and Venetsanos, A.G., (2005), “CFD modeling for helium releases in a private garage without forced ventilation”, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Parsons and Brickerhoff in association with TIAX and University of Miami, (2004), “Support facilities for hydrogen fuelled vehicles – Conceptual design and cost analysis study”, Technical Report

Swain, M.R., Grilliot, E.S. and Swain, M.N., (1998), “Phase 2: Risks in indoor vehicle storage in Addendum to Hydrogen Vehicle Safety Report: Residential Garage Safety Assessment”, Analysis conducted by M.R. Swain, University of Miami under subcontract to Direct Technologies Inc., prepared for the Ford Motor company under prime Contract No. DE-AC02-94CE50389 to the U.S. Department of Energy, Office of Transportation Technologies

Swain, M.R., Filoso, P., Grilliot, E.S. and Swain M.N., (2003), “Hydrogen leakage into simple geometric enclosures”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, pp. 229-248

Swain, M.R., Grilliot, E.S. and Swain M.N., (1999), “Experimental verification of a hydrogen risk assessment method”, Chemical Health and Safety, Vol. 6, Issue 3, pp. 28-32

Κεφάλαιο 7: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης ηλίου (αντί υδρογόνου) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με φυσικό αερισμό

Swain, M.R. and Shriber J., (1998), “Comparison of hydrogen, natural gas, liquified petroleum gas and gasoline leakage in a residential garage”, Energy and Fuels, Vol. 12, Issue 1, pp. 83-89

Tam, V., Wang, M., Savvides, C., Tunc, E., Ferraris, S. and Wen J., (2008), “Simplified flammable gas volume methods for gas explosion modelling from pressurized gas releases: a comparison with large scale experimental data”, IChemE, Symposium Series No. 154

Tecplot, version 8.0, διαδικτυακός τόπος: <http://www.tecplot.com/>

Venetsanos A.G., Catsaros N., Wurtz J., Bartzis J.G., (1995), “The DELTA B code. A computer code for the simulation of the geometry of three-dimensional buildings. Code structure and users manual”, EUR Report 16326 EN

Venetsanos A.G., Huld T., Adams P., Bartzis J.G., (2003), “Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment”, J. of Hazardous Materials, Vol. A105, pp. 1-25

Venetsanos, A.G., Papanikolaou, E., Delichatsios, M., Garcia J., Hansen, O.R., Heitsch, M., Huser, A., Jahn, W., Jordan, T., Lacomme, J.-M., Ledin, H.S., Makarov, D., Middha, P., Studer, E., Tchouvelev, A.V., Teodorczyk, A., Verbecke, F. and Van der Voort M.M., (2009), “An inter-comparison exercise on the capabilities of CFD models to predict the short and long term distribution and mixing of hydrogen in a garage”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, Issue 14, pp. 5912-5923

Venetsanos A.G., Papanikolaou E. and Bartzis J.G., (2010), “The ADREA-HF CFD code for consequence assessment of hydrogen applications”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 8, p. 3908-3918

Wilcox D.C., (1994), “Turbulence modeling for CFD”, 2nd printing, DCW Industries, Inc.

Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινήτων

Λίστα Συμβόλων

Χαρακτήρες κεφαλαίων

C	Ογκομετρική συγκέντρωση	
D	Διάμετρος σωλήνα	m
F_{ij}	Παροχή μάζας στο σωλήνα i διασυνδεδεμένος με το δοχείο j (θετική αν η ροή εισέρχεται στο δοχείο)	kg/s
N_{pj}	Αριθμός σωλήνων διασυνδεδεμένων με το δοχείο j	
P	Πίεση	Pa
V_i	Όγκος δοχείου	m^3

Χαρακτήρες μικρών γραμμάτων

c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση	J/kg K
c_v	Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο	J/kg K
h	ενθαλπία	J
t	χρόνος	s
u	Ταχύτητα στο σωλήνα	m/s
x	Απόσταση από την είσοδο του σωλήνα	M

Ελληνικοί χαρακτήρες

λ	Συντελεστής αντίστασης	
ρ	πυκνότητα	kg/m ³

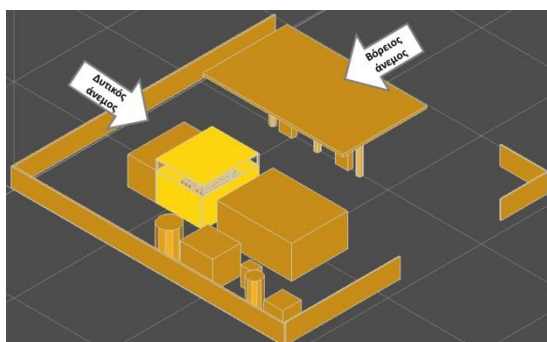
8.1 Εισαγωγή

Η αυξανόμενη απαίτηση για εξασφάλιση ενέργειας και η ανάγκη επίλυσης των περιβαλλοντικών προβλημάτων έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το H_2 θεωρείται υποψήφιος φορέας ενέργειας στο εγγύς μέλλον. Η διανομή και παράδοση του H_2 στον τελικό αποδέκτη αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια υποδομής αυτής της τεχνολογίας. Το H_2 πρέπει να μεταφερθεί με ασφάλεια από το σημείο παραγωγής στο σημείο παράδοσης δηλαδή τους σταθμούς ανεφοδιασμού.

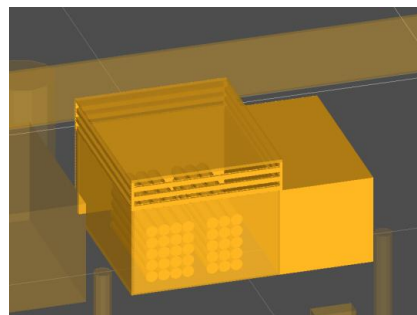
Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υπολογιστικές μελέτες έκλυσης και διασποράς H_2 σε χώρο αποθήκευσης H_2 ενός σταθμού ανεφοδιασμού πραγματικής κλίμακας (Paranikolaou, 2007). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα των Tanaka και συν. (2005).

8.2 Περιγραφή των πειραμάτων

Οι Tanaka και συν. (2005) παρουσίασαν πειράματα σε μοντέλο σταθμού ανεφοδιασμού H_2 πραγματικής κλίμακας με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά λειτουργίας: α) $300 \text{ Nm}^3/\text{h}$ παραγωγή H_2 , β) $300 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ογκομετρική παροχή από τον συμπιεστή H_2 , γ) 3500 Nm^3 αποθήκευση H_2 και δ) 2 διανομείς. Τα πειράματα έκλυσης και διασποράς H_2 πραγματοποιήθηκαν στο χώρο αποθήκευσης διαστάσεων $5 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$. Μεταξύ της οροφής και των τοίχων υπήρχε είτε ελεύθερος χώρος είτε χώρος με μεταλλικό πλέγμα 50% ελεύθερης επιφάνειας, ύψους 1 m. Μέσα στο χώρο τοποθετήθηκε μια διάταξη 35 κυλίνδρων, χωρητικότητας ο καθένας 250 l. Οι διαστάσεις και η ακριβής θέση των δοχείων δεν περιγράφει από τους πειραματιστές. Στο Σχήμα 1 φαίνεται ο σταθμός ανεφοδιασμού ενώ στο Σχήμα 2 ο χώρος αποθήκευσης H_2 με τα 35 δοχεία. Η πίεση αποθήκευσης ήταν 40 MPa ενώ το ακροφύσιο έκλυσης είχε διάμετρο είτε 0,8 mm είτε 1,6 mm είτε 8 mm. Η έκλυση ήταν οριζόντια στο μέσον του δωματίου ωστόσο ο προσανατολισμός της δεν ήταν γνωστός. Μελετήθηκαν επίσης εκλύσεις από κυλίνδρους μικρότερης χωρητικότητας (125 l). Τα πειράματα περιγράφονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση πειραμάτων έκλυσης και διασποράς υδρογόνου.



Σχήμα 1: Σταθμός ανεφοδιασμού – επισημαίνεται με κίτρινο ο χώρος αποθήκευσης H_2 (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)



Σχήμα 2: Χώρος αποθήκευσης με πλέγμα στα ανοίγματα αερισμού και 35 δοχεία χωρητικότητας 250 l

8.3 Προσομοίωση των πειραμάτων

Η υπολογιστική μελέτη των πειραμάτων έγινε σε δυο στάδια. Στο πρώτο στάδιο υπολογίστηκαν οι συνθήκες έκλυσης με τον κώδικα GAJET (Venetsanos και συν., 2003) και στο δεύτερο προσομοιώθηκε η έκλυση και η διασπορά του H₂ με τον κώδικα CFD ADREA-HF (Bartzis, 1991). Με βάση την περιγραφή των πειραμάτων η έκλυση ήταν οριζόντια. Ωστόσο δεν αναφέρθηκε ο προσανατολισμός της. Γι' αυτό το λόγο μελετήθηκε αρχικά η περίπτωση έκλυσης από το ακροφύσιο διαμέτρου 0,8 mm υποθέτοντας έκλυση είτε κατά τον άξονα x (κάθεται στον άξονα συμμετρίας των δοχείων) είτε κατά τον άξονα y (παράλληλα με τον άξονα συμμετρίας των δοχείων). Μετά τη σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, επελέγη ο προσανατολισμός κατά τον άξονα x ως πιθανότερος. Επίσης, ενώ οι πειραματιστές ανέφεραν ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων υπήρχε άνεμος κάποιας έντασης, τόσο ο προσανατολισμός του όσο η ένταση δεν προσδιορίστηκαν. Γι' αυτό το λόγο μελετήθηκαν 3 περιπτώσεις ατμοσφαιρικών συνθηκών: νημεμία, δυτικός άνεμος έντασης 2 m/s στα 10 m και βόρειος άνεμος ίδιας έντασης. Οι δυο προσανατολισμοί του ανέμου σε σχέση με την γεωμετρία του σταθμού φαίνονται στο Σχήμα 1. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) παρουσιάζονται τα μελετηθέντα σενάρια.

Πίνακας 1: Περίληψη μελετηθέντων πειραμάτων Tanaka (Tanaka, 2005)

Προσανατολισμός έκλυσης	Διάμετρος έκλυσης 0,8 mm, δωμάτιο με πλέγμα	Διάμετρος έκλυσης 8 mm, δωμάτιο χωρίς πλέγμα	Διάμετρος έκλυσης 8 mm, δωμάτιο με πλέγμα
	Νημεμία	Νημεμία	Νημεμία
Άξονας x	Δυτικός άνεμος	Δυτικός άνεμος	Δυτικός άνεμος
	Βόρειος άνεμος	Βόρειος άνεμος	Βόρειος άνεμος
Άξονας y	Νημεμία	-	-
	Δυτικός άνεμος	-	-
	Βόρειος άνεμος	-	-

8.3.1 Υπολογισμός συνθηκών έκλυσης

Για τον υπολογισμό των συνθηκών έκλυσης χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας GAJET (Venetsanos και συν., 2003). Ο κώδικας GAJET παρέχει γενικά τη δυνατότητα υπολογισμού των συνθηκών έκλυσης από συστάδα δοχείων αποθήκευσης διασυνδεδεμένων με σωλήνες. Η ροή στους σωλήνες θεωρείται ότι είναι ροή Fanno (αδιαβατική ροή με απώλειες λόγω τριβής – μη ισεντροπική ροή) ενώ στα δοχεία θεωρείται ισεντροπική μεταβολή χρησιμοποιώντας ιδιότητες πραγματικού αερίου για το διαρρέον αέριο. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

Ισοζύγιο μάζας, ορμής και ενέργειας στο σωλήνα:

$$d(\rho u) = 0, dh + u du = 0, \rho u du + dP + \frac{\lambda}{2} \rho u^2 \frac{dx}{D} = 0 \quad (1)$$

Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας στο δοχείο j:

Κεφάλαιο 8: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινητών

$$\frac{dV_j \rho_j}{dt} = \sum_{i=0}^{N_{pj}} F_{ij}, \gamma \frac{d\rho_j}{\rho_j} = \kappa dP_j \quad (2)$$

Η ενθαλπία h και η πυκνότητα ρ υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις για πραγματικό αέριο:

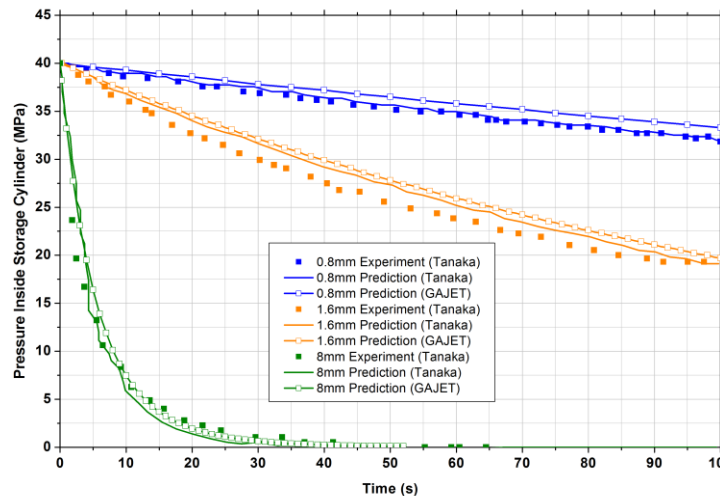
$$dh = c_p dT + (1 - \beta T) \frac{dP}{\rho} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{T} + \frac{1}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_P \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{1}{P} - \frac{1}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial P} \right)_T \quad (5)$$

$$z = z(T, P) = \frac{P}{\rho R T} \quad (6)$$

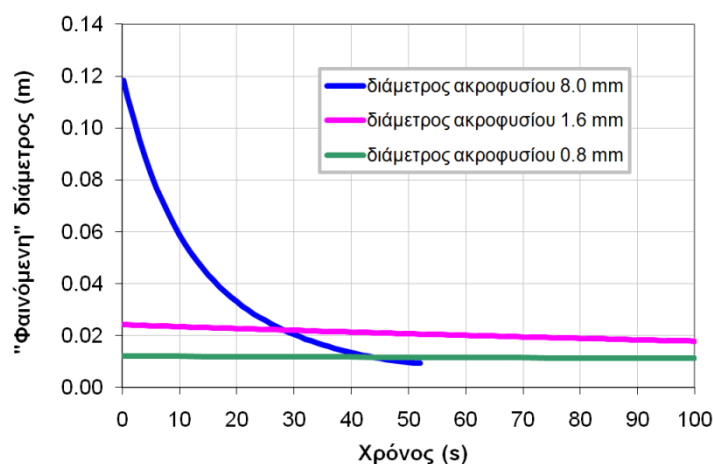
Η έκλυση στο ακροφύσιο θεωρήθηκε ηχητική. Υπολογίστηκε η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας, πυκνότητας και ταχύτητας για τις 3 διαμέτρους έκλυσης (0,8mm, 1,6 mm και 8 mm). Στο Σχήμα 3 φαίνεται η χρονική μεταβολή της πίεσης μέσα στο δοχείο από πειραματικά δεδομένα, τις προβλέψεις του Tanaka με ένα «απλοποιημένο μοντέλο» κάνοντας την υπόθεση τελείου αερίου (Tanaka, 2005) και αυτές με τον κώδικα GAJET. Οι προβλέψεις είναι πολύ κοντά στις πειραματικές μετρήσεις. Το H₂ διαρρέει πολύ γρήγορα (20 s) από το δοχείο όταν το ακροφύσιο έχει τη μεγαλύτερη διάμετρο (8 mm). Στις άλλες 2 περιπτώσεις, μόνο ένα μέρος του H₂ διαρρέει από το δοχείο στα πρώτα 100 s. Από πλευράς ασφάλειας, η περίπτωση έκλυσης από το ακροφύσιο των 8 mm είναι η πιο επισφαλής εφόσον τέτοια ραγδαία έκλυση είναι δύσκολο να ανιχνευτεί και να αντιμετωπιστεί εγκαίρως (τα μέτρα αποσόβησης κινδύνου όπως π.χ. ενεργοποίηση της βαλβίδας διακοπής ροής, για την παρεμπόδιση της διαρροής του μεγαλύτερου μέρους του περιεχόμενου H₂ είναι αριετά δύσκολη σε τέτοιες περιπτώσεις).



Σχήμα 3: Σύγκριση χρονικής μεταβολής της πίεσης στο δοχείο μεταξύ πειραματικών δεδομένων, προβλέψεων Tanaka και προβλέψεων με τον κώδικα GAJET

8.3.2 Υπολογισμός της διασποράς H_2

Τα αποτελέσματα από τον κώδικα GAJET χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές συνθήκες για τον υπολογισμό της «φαινόμενης» επιφάνειας κατά τον Birch (1984). Η περιγραφή της μεθόδου Birch έχει δοθεί στο Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου. Η έκλυση H_2 μοντελοποιήθηκε ως κυκλική πηγή ελαττωμένης με το χρόνο διαμέτρου, ηχητικής ταχύτητας (1.144 m/s) και ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας (288 K). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η παροχή μάζας ήταν $1,27 \cdot 10^{-2}$ kg/s στην περίπτωση έκλυσης από το ακροφύσιο διαμέτρου 0,8 mm και 1,22 kg/s στην περίπτωση των 8 mm. Η μεταβολή της διαμέτρου έκλυσης με τον χρόνο ήταν τέτοια ώστε να παρέχει κάθε φορά την υπολογισθείσα από τον κώδικα GAJET παροχή μάζας.



Σχήμα 4: Χρονική μεταβολή της "φαινόμενης" διαμέτρου κατά Birch (1984)

Η χωρική διακριτοποίηση έγινε σε καρτεσιανό υπολογιστικό πλέγμα. Το υπολογιστικό χωρίο επεκτάθηκε κατά 20 m στην x και y κατεύθυνση από τα όρια του σταθμού ανεφοδιασμού. Ακολουθήθηκε δηλαδή η κοινή πρακτική επέκτασης του πλέγματος κατά 10 φορές του χαρακτηριστικού μήκους των εμποδίων. Σ' αυτήν την περίπτωση, οι τοίχοι που περιέλαβαν τον σταθμό είχαν ύψος 2 m. Το χωρίο είχε τελικά διαστάσεις 69 m × 68 m × 20 m. Η γεωμετρική προεπεξεργασία έγινε με τον κώδικα DELTA-B (Venetsanos και συν., 1995). Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά του πλέγματος των σεναρίων που μελετήθηκαν. Η περίπτωση έκλυσης με διάμετρο 1,6 mm δεν μελετήθηκε υπολογιστικά. Στις περιπτώσεις όπου η έκλυση είχε τον ίδιο προσανατολισμό με τον άξονα x, το ελάχιστο μήκος κελιού ήταν στην κατεύθυνση y και z. Αντίστοιχα, στην περίπτωση έκλυσης κατά τον άξονα y, το ελάχιστο μήκος κελιού ήταν στην κατεύθυνση x και z.

Για τον υπολογισμό του πεδίου ροής επιλύθηκαν αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου οι μη μόνιμες, τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις (για συμπιεστό ρευστό) διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνεχείας), ορμής μίγματος (για τις 3 συνιστώσες ταχύτητας) και κλάσματος μάζας H_2 . Η μοντελοποίηση της τύρβης έγινε με το κλασσικό μοντέλο k-ε των Launder and Spalding (Launder and Spalding, 1974) λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίδραση της άνωσης (Markatos και συν., 1982 και Markatos και συν., 1984). Θεωρήθηκε ότι όλα τα στερεά σώματα είχαν

Κεφάλαιο 8: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινητών

υδροδυναμική τραχύτητα ίση με 1 mm, στις δε επιφάνειές τους χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσεις τοιχωμάτων για τον υπολογισμό της ταχύτητας (συνθήκη μη-ολίσθησης), της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της απορρόφησης της. Η πίεση θεωρήθηκε σταθερή στο επίπεδο x-y του υπολογιστικού χωρίου (οροφή). Κατά συνέπεια, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας σε αυτό το επίπεδο υπολογίστηκε από την εξίσωση μάζας. Για όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές θεωρήθηκε ότι η παράγωγός τους είναι μηδέν στην περίπτωση που το ρευστό εξέρχεται του υπολογιστικού χωρίου και επιπλέον έλαβαν τιμή ίση με αυτήν τη χρονική στιγμή 0 στην περίπτωση που το ρευστό εισέρχεται.

Στα σενάρια παρουσία ανέμου η προσομοίωση έγινε σε 3 στάδια: στο πρώτο υπολογίστηκε η μονοδιάστατη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου και της τύρβης καθ' ύψος σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης (η κατανομή ήταν τέτοια ώστε σε απόσταση 10 m από το έδαφος η τιμή της ταχύτητας να είναι 2 m/s), στο δεύτερο βήμα, υπολογίστηκε το τρισδιάστατο πεδίο ροής χρησιμοποιώντας τις υπολογισθείσες μονοδιάστατες κατανομές του πρώτου βήματος (οι κατανομές της ταχύτητας και της τύρβης του πρώτου σταδίου επιβλήθηκαν σε όλο το τρισδιάστατο υπολογιστικό χωρίο ενώ έγινε παράλληλα αρχικοποίηση των οριακών συνθηκών θέτοντας στο επίπεδο επιβολής των συνθηκών ανέμου τις ίδιες κατανομές ταχύτητας και τύρβης του πρώτου σταδίου). Στα παράπλευρα επίπεδα θεωρήθηκε ότι η παράγωγος των μεταβλητών είναι μηδέν στην περίπτωση που το ρευστό εξέρχεται του υπολογιστικού χωρίου και επιπλέον έλαβαν τιμή ίση με αυτήν τη χρονική στιγμή 0 στην περίπτωση που το ρευστό εισέρχεται. Τέλος, στο τρίτο βήμα υπολογίστηκε η διασπορά H₂ χρησιμοποιώντας ως αρχικές συνθήκες τη λύση του δεύτερου βήματος και διατηρώντας παράλληλα τις ίδιες οριακές συνθήκες στο επίπεδο επιβολής ανέμου. Στα σενάρια απουσία ανέμου προφανώς παρελήφθησαν τα δυο πρώτα στάδια.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά υπολογιστικού πλέγματος

Προσανατολισμός έκλυσης	Πλέγμα	0,8 mm αρχική διάμετρος έκλυσης με ανοίγματα 50% ελεύθερα (πλέγμα)	8 mm αρχική διάμετρος έκλυσης με ανοίγματα πλήρως ελεύθερα	8 mm αρχική διάμετρος έκλυσης με ανοίγματα 50% ελεύθερα (πλέγμα)
Άξονας x	Διαστάσεις (πλήθος κελιών)	75×92×56	66×86×54	66×86×54
	Πλήθος ενεργών κελιών	361.698	287.656	287.624
	Ελάχιστο μέγεθος κελιού (m)	0,04	0,05	0,05
Άξονας y	Διαστάσεις (πλήθος κελιών)	87×71×56		
	Πλήθος ενεργών κελιών	325.846	-	-
	Ελάχιστο μέγεθος κελιού (m)	0,04		

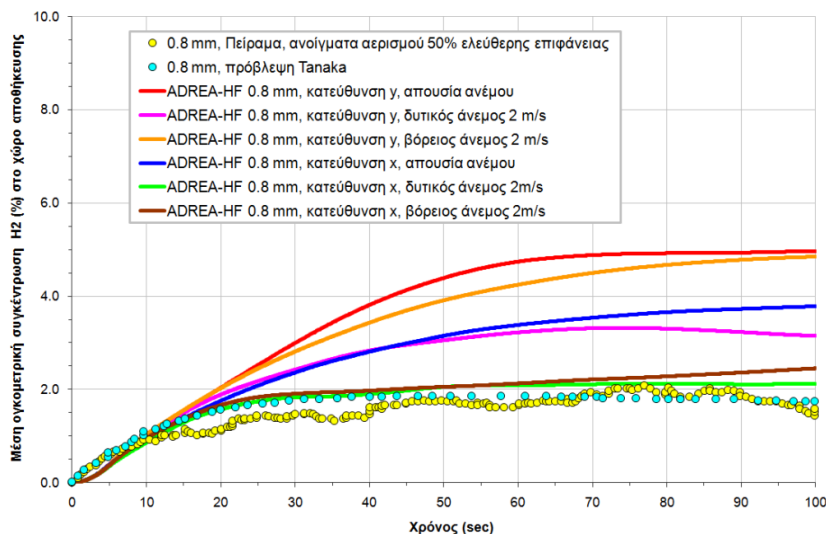
Το σχήμα ανάντη διαφορών 1^{ης} τάξης χρησιμοποιήθηκε για τη χωρική διακριτοποίηση των όρων μεταφοράς. Για τη χρονική διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε η 1^{ης} τάξεως πλήρως πεπλεγμένη (fully implicit 1st order) μέθοδος. Τέλος το μέγιστο χρονικό βήμα ήταν 5·10⁻² s ενώ το αρχικό χρονικό βήμα ήταν ίσο με 10⁻³ s.

8.3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα, οι προβλέψεις Tanaka με τη χρήση του απλοποιημένου μοντέλου συσσώρευσης διαρρέοντος αερίου σε κλειστό χώρο των Cleaver και συν. (1994) και τα αριθμητικά αποτελέσματα με τον κώδικα ADREA-HF της μέσης ογκομετρικής συγκέντρωσης H₂ (%) στο χώρο αποθήκευσης \bar{C} για την περίπτωση έκλυσης αρχικής διαμέτρου 0,8 mm με ανοίγματα αερισμού 50% ελεύθερης επιφάνειας. Η μέση ογκομετρική συγκέντρωση H₂ υπολογίστηκε βάσει της εξίσωσης:

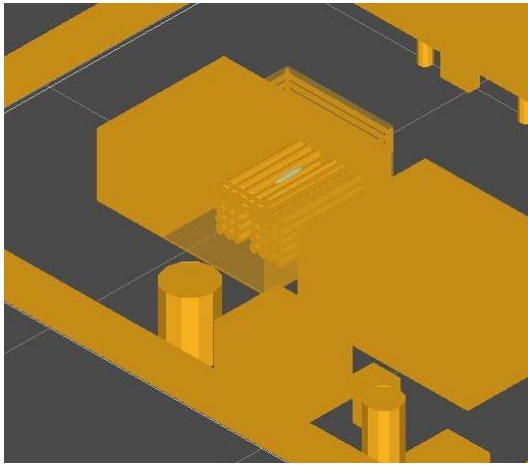
$$\bar{C} = \frac{\int_{i=1}^n C dV}{\int_{i=1}^n dV} \quad (7)$$

όπου C είναι η ογκομετρική συγκέντρωση H₂ σε κάθε υπολογιστικό κελί i που βρίσκεται μέσα στο χώρο αποθήκευσης και V ο όγκος του κελιού (m³). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τον κώδικα ADREA-HF μεταξύ της έκλυσης παράλληλης με τον άξονα x και y φανερώνει ότι ο προσανατολισμός επηρεάζει σημαντικά τη διασπορά H₂ στο χώρο. Αυτό συμβαίνει λόγω της παρουσίας των δοχείων. Στην περίπτωση έκλυσης παράλληλης με τον άξονα y , το πρώτο εμπόδιο που συναντά η δέσμη H₂ είναι ο τοίχος ο οποίος απέχει από την έκλυση 3 m (βλέπε Σχήμα 6 και Σχήμα 7). Στην περίπτωση της έκλυσης παράλληλης με τον άξονα x , η δέσμη συναντά το πρώτο εμπόδιο που είναι η συστάδα των δοχείων σχεδόν κατά την έναρξή της. Η απόσταση των δοχείων από την έκλυση είναι 0,4 m. Σ' αυτήν την περίπτωση η διασπορά του H₂ είναι εντονότερη (Σχήμα 8 και Σχήμα 9) με αποτέλεσμα τη μείωση της μέσης συγκέντρωσης H₂ στο χώρο. Επίσης, η παρουσία του ανέμου ελαττώνει τη συγκέντρωση H₂ στο χώρο σε σχέση με τις συνθήκες νηνεμίας. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης (αρχική διάμετρος έκλυσης 0,8 mm) θεωρήθηκε ότι ο πιθανότερος προσανατολισμός έκλυσης είναι ο παράλληλος με τον άξονα x ο οποίος επελέγη για την προσομοίωση των υπολοίπων σεναρίων (αρχική διάμετρος έκλυσης 8 mm με ανοίγματα είτε πλήρως ελεύθερα είτε με 50% ελεύθερη επιφάνεια – πλέγμα).

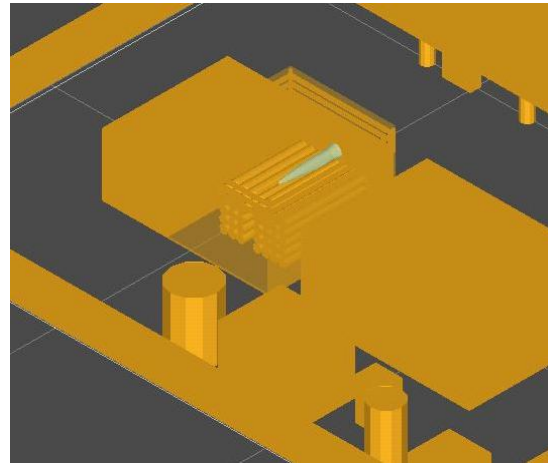


Κεφάλαιο 8: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινητών

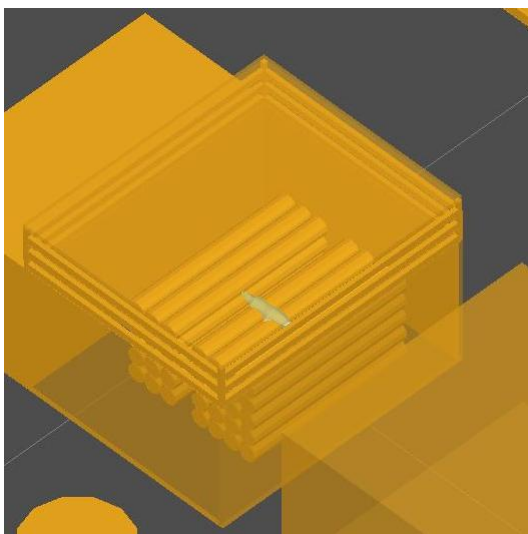
Σχήμα 5: Μέση συγκέντρωση H_2 στο χώρο αποθήκευσης: πειραματικά δεδομένα, προβλέψεις Tanaka, αποτελέσματα με τον κώδικα ADREA-HF (0,8 mm αρχική διάμετρος έκλυσης, ανοίγματα με 50% ελεύθερη επιφάνεια)



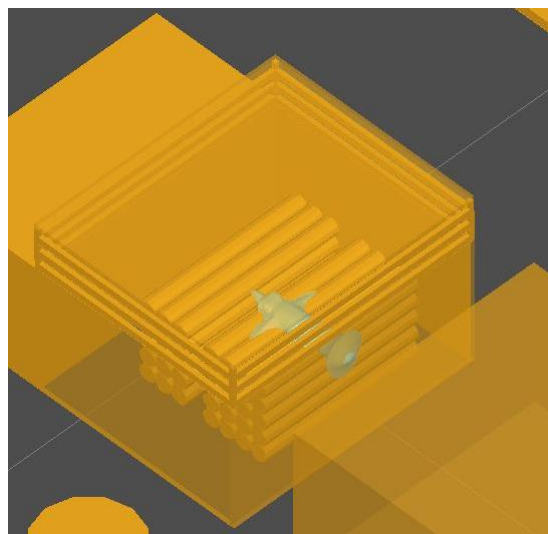
Σχήμα 6: Έκλυση με προσανατολισμό y, 0,8 mm διαμέτρου, δυτικός άνεμος 2 m/s, 0,5 s



Σχήμα 7: Έκλυση με προσανατολισμό y, 0,8 mm διαμέτρου, δυτικός άνεμος 2 m/s, 2 s



Σχήμα 8: Έκλυση με προσανατολισμό x, 0,8 mm διαμέτρου, δυτικός άνεμος 2 m/s, 0,5 s



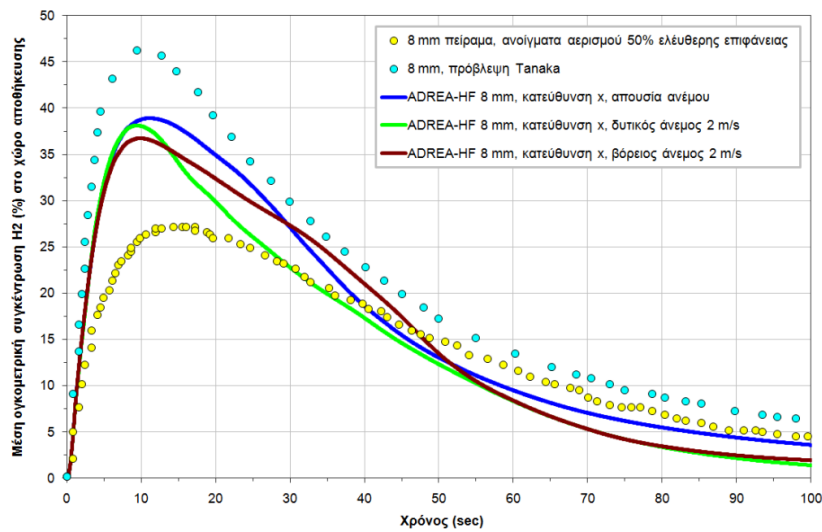
Σχήμα 9: Έκλυση με προσανατολισμό x, 0,8 mm διαμέτρου, δυτικός άνεμος 2 m/s, 2 s

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα, οι προβλέψεις Tanaka και τα αριθμητικά αποτελέσματα με τον κώδικα ADREA-HF της μέσης ογκομετρικής συγκέντρωσης H_2 στο χώρο αποθήκευσης για την περίπτωση έκλυσης αρχικής διαμέτρου 8 mm με ανοίγματα αερισμού 50% ελεύθερης επιφάνειας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσία και απουσία ανέμου έχουν παρόμοια χρονική κατανομή με τα πειραματικά, εμφανίζουν το μέγιστο την ίδια περίπου χρονική στιγμή (μετά από περίπου 10 s από την έκλυση) ωστόσο η μέγιστη μέση συγκέντρωση H_2 μέσα στο χώρο είναι κατά περίπου 35% μεγαλύτερη. Όπως φαίνεται από το σχήμα, σ' αυτήν την περίπτωση η παρουσία ανέμου δεν επηρεάζει σημαντικά τη μέση συγκέντρωση H_2 . Σε αντίθεση με την περίπτωση έκλυσης αρχικής διαμέτρου 0,8 mm σε αυτήν την

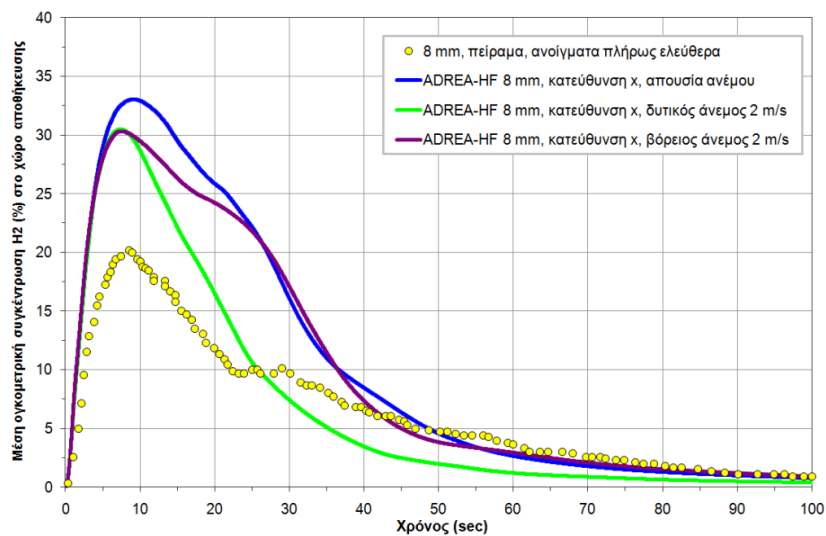
Κεφάλαιο 8: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινητών

έκλυση εμφανίζεται αναφλέξιμο νέφος (συγκέντρωση H_2 μεγαλύτερη από 4%) το οποίο παραμένει επί 100 s από την έναρξη της έκλυσης.

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα και τα αριθμητικά αποτελέσματα με τον κώδικα ADREA-HF της μέσης ογκομετρικής συγκέντρωσης H_2 στο χώρο αποθήκευσης για την περίπτωση έκλυσης αρχικής διαμέτρου 8 mm με ανοίγματα αερισμού 100% ελεύθερης επιφάνειας. Ομοίως με τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις, τα αριθμητικά αποτελέσματα έχουν παρόμοια χρονική κατανομή με τα πειραματικά αλλά η μέγιστη μέση συγκέντρωση H_2 μέσα στο χώρο είναι κατά περίπου 50% με 60% μεγαλύτερη. Τόσο οι πειραματικές όσο οι αριθμητικές συγκεντρώσεις H_2 είναι κατά περίπου 20% μικρότερες από αυτές της περίπτωσης ανοιγμάτων με πλέγμα.



Σχήμα 10: Σύγκριση της μέσης συγκέντρωσης H_2 στο χώρο αποθήκευσης μεταξύ πειραμάτων, προβλέψεων Tanaka και σεναρίων με τον κώδικα ADREA-HF (8 mm αρχική διάμετρος έκλυσης, ανοίγματα με 50% ελεύθερη επιφάνεια)



Σχήμα 11: Σύγκριση της μέσης συγκέντρωσης H_2 στο χώρο αποθήκευσης μεταξύ πειραμάτων, προβλέψεων Tanaka και σεναρίων με τον κώδικα ADREA-HF (8 mm αρχική διάμετρος έκλυσης, ανοίγματα με 100% ελεύθερη επιφάνεια)

8.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μια υπολογιστική μελέτη των πειραμάτων έκλυσης H_2 σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινήτων των Tanaka και συν. (2005). Αρχικά, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του κώδικα GAJET για τον υπολογισμό των συνθηκών έκλυσης από δοχείο αποθήκευσης πίεσης 40 MPa με διάμετρο έκλυσης 0,8 mm, 1,6 mm και 8 mm με τα πειραματικά δεδομένα. Οι υπολογισμοί έγιναν με πραγματικές ιδιότητες αερίου θεωρώντας στο ακροφύσιο ηχητική ταχύτητα του διαρρέοντος αερίου. Οι υπολογισμοί βρίσκονταν σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα και για τις 3 περιπτώσεις. Για τη διασπορά του H_2 μέσα στο χώρο χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας CFD ADREA-HF και το μοντέλο k-ε των Launder and Spalding λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίδραση της άνωσης. Η έκλυση H_2 μοντελοποιήθηκε κατά τους Birch και συν. (1984) ως κυκλική πηγή ελαττωμένης με το χρόνο διαμέτρου, ηχητικής ταχύτητας και ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας. Η μεταβολή της διαμέτρου έκλυσης με τον χρόνο ήταν τέτοια ώστε να παρέχει κάθε φορά την υπολογισθείσα από τον κώδικα GAJET παροχή μάζας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο σχετικός προσανατολισμός της έκλυσης σε σχέση με τα εμπόδια μέσα στο χώρο επηρεάζει την κατανομή του H_2 σε σημαντικό βαθμό. Όταν η έκλυση βρισκόταν πολύ κοντά στα δοχεία αποθήκευσης, η ανάμιξη του H_2 με τον περιβάλλοντα αέρα ήταν εντονότερη, με αποτέλεσμα η μέση συγκέντρωσή του να είναι μικρότερη. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι η κατανομή του διαρρέοντος αερίου μέσα σε χώρο με ανοίγματα φυσικού αερισμού επηρεάζεται από την παρουσία ήπιου ανέμου (2 m/s στα 10 m) κυρίως στην περίπτωση έκλυσης με τη μικρότερη μαζική παροχή.

8.5 Βιβλιογραφικές αναφορές

ADREA-HF CFD code, manual and description of the CFD Code available online at <http://www2.ipta.demokritos.gr/pages/ADREA-HF.html>

Bartzis J.G., (1991), “ADREA-HF: A three-dimensional finite volume code for vapour cloud dispersion in complex terrain”, EUR Report 13580 EN.

Birch A.D., Brown D.R., Dodson M.G. and Swaffield F., (1984), “The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas”, Combustion Science and Technology, Vol. 36, pp. 249-261

Cleaver, R.P., Marshall, M.R. and Linden P.F., (1994), “The build-up of concentration within a single enclosed volume following a release of natural gas”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 36, pp. 209-226

Launder B.E. and Spalding D.B., (1974), “The numerical computation of turbulent flows”, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, Issue 2, p. 269-289

Markatos, N.C., Malin, M.R. and Cox G., (1982), “Mathematical modelling of buoyancy-induced smoke flow in enclosures”, International Journal of Heat and

Κεφάλαιο 8: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινητών

Mass Transfer, Vol. 25, No. 1, pp. 63-75 AND Correspondence, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 11, pp. 1777-1778

Markatos, N.C. and Pericleous K.A., (1984), “Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, pp. 755-772

OpenCascade, available: <http://www.opencascade.org>

Papanikolaou, E.A. and Venetsanos, A.G., (2007), “CFD simulations of hydrogen release and dispersion inside the storage room of a hydrogen refueling station using the ADREA-HF code”, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Tanaka, T., Azuma, T., Evans, J. et al., (2005), “Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model”, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Venetsanos A.G., Catsaros N., Wurtz J., Bartzis J.G., (1995), “The DELTA B code. A computer code for the simulation of the geometry of three-dimensional buildings. Code structure and users manual”, EUR Report 16326 EN

Venetsanos A.G., Huld T., Adams P., Bartzis J.G., (2003), “Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment”, J. of Hazardous Materials, Vol. A105, pp. 1-25

Venetsanos A.G., Papanikolaou E. and Bartzis J.G., (2010), “The ADREA-HF CFD code for consequence assessment of hydrogen applications”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 35, Issue 8, p. 3908-3918

Κεφάλαιο 8: Υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινήτων

Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

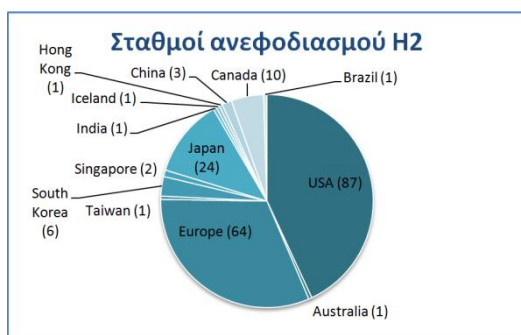
Λίστα Συμβόλων

Συντομογραφίες

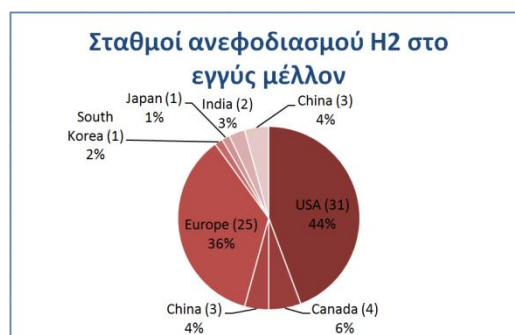
ACH	Air Changes per Hour	hr ⁻¹
ALARP	As Low As Reasonable Practicable	
ANSI	American National Standards Institute	
API	American Petroleum Institute	
ASME	American Society of Mechanical Engineers	
ASTM	American Society for Testing and Materials	
BBC	Benchmark Base Case	
B&PV	Boiler & Pressure Vessel Code	
BBC	Benchmark Base Case	
CGA	Compressed Gas Association	
DOT	US Department of Transportation	
ESD	Emergency Shutdown Device	
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis	
HAZID	HAZard IDentification	
HAZOP	HAZard OPerability Study	
LFL	Lower Flammability Limit	
MEM	Multi-Energy Method	
NFPA	National Fire Protection Association	
QRA	Quantitative Risk Assessment	
UFC	Uniform Fire Code	
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion	

9.1 Εισαγωγή

Η έρευνα στις εφαρμογές τεχνολογιών H₂ ως φορέα ενέργειας αποτελεί μέρος του γενικότερου πλαισίου για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του περιβάλλοντος (ιδιαίτερα της κλιματικής αλλαγής - φαινόμενο θερμοκηπίου) και της εξάρτησης από τα συμβατικά καύσιμα. Τα αυτοκίνητα που κινούνται με H₂ σε συνδυασμό με ενεργειακές συστοιχίες (fuel cells) θεωρούνται ότι έχουν σημαντικά οφέλη με κυριότερα τις μηδενικές εκπομπές ρύπων και το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με αυτά των μηχανών εσωτερικής καύσης. Οι εγκαταστάσεις υποδομής για τον ανεφοδιασμό των αυτοκινήτων με ενεργειακές συστοιχίες αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι για την επιτυχημένη υιοθέτησή τους στο μέλλον. Υπάρχουν ήδη 202 σταθμοί ανεφοδιασμού H₂ παγκοσμίως (βλέπε Σχήμα 1). Οι περισσότεροι από τους σταθμούς κατασκευάστηκαν στα πλαίσια πιλοτικών προγραμμάτων και για λόγους επίδειξης και ελέγχου ενώ μερικοί είναι ανοιχτοί στο ευρύτερο κοινό. Επίσης, σχεδιάζεται η κατασκευή 70 σταθμών στο εγγύς μέλλον (βλέπε Σχήμα 2).



Σχήμα 1: Τρέχοντες σταθμοί ανεφοδιασμού H₂ (Fuel Cell 2000)



Σχήμα 2: Σταθμοί ανεφοδιασμού H₂ στο εγγύς μέλλον (Fuel Cell 2000)

Η διαδικασία αδειοδότησης των σταθμών ανεφοδιασμού H₂ διαφέρει από χώρα σε χώρα. Συνήθως πριν την κατασκευή και λειτουργία ενός σταθμού γίνεται μία μελέτη εκτίμησης των κινδύνων για να αποδειχθεί ότι ο σταθμός πληροί κάποιους κανόνες ασφαλείας και ότι έχουν ληφθεί κατάλληλα μέτρα αποσοβήσης κινδύνων. Προς το παρόν, πολλές αρμόδιες αρχές αδειοδότησης βασίζονται στη συμμόρφωση του προς ανέγερση σταθμού με υπάρχοντες Κώδικες και Προδιαγραφές καθώς και σε άλλες απαιτήσεις οι οποίες διαφέρουν από χώρα σε χώρα (LaChance και συν., 2007).

Οι Cadwallader and Herrin, (1999) συντάξαν ένα έγγραφο σχετικά με θέματα ασφαλείας της χρήσης H₂ ως φορέα ενέργειας. Το έγγραφο αναφέρει τους σχετικούς Κώδικες και τις Προδιαγραφές που εφαρμόζονται στις Η.Π.Α. οι οποίοι παρατίθενται συνοπτικά παρακάτω.

Ο κανονισμός 29 CFR (Part 1910.103) αναφέρεται στο χειρισμό και την αποθήκευση αερίου και κρυογενικού H₂. Οι κανόνες αφορούν δοχεία όγκου μεγαλύτερου ή ίσου με 11,3 m³ για αέριο H₂ και μικρότερου ή ίσου με 150 lt για κρυογενικό H₂. Τα δοχεία αποθήκευσης αερίου H₂ πρέπει να τηρούν τις οδηγίες ASME B&PV, Section III ή τις DOT. Τα δοχεία αποθήκευσης κρυογενικού H₂ πρέπει να τηρούν τις οδηγίες ASME B&PV, Section VIII ή τις API Standard 620. Τα δοχεία αερίου H₂

Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

πρέπει να έχουν σύστημα εκτόνωσης ασφαλείας με κατάλληλο σχεδιασμό ώστε η εκτόνωση να είναι κατακόρυφη προς τα πάνω και σε ελεύθερο περιβάλλον. Οι σωληνώσεις αερίου H₂ πρέπει να τηρούν το πρότυπο ANSI B31.1-1967 ενώ αυτές για κρουγενικό H₂ τις ASTM D1692-68. Ο κανονισμός 29 CFR αναφέρει επίσης αποστάσεις ασφαλείας από τους χώρους αποθήκευσης αερίου και κρουγενικού H₂. Γενικά οι αποστάσεις αυτές κυμαίνονται από 7,5 m έως 15 m για συστήματα H₂ πάνω από 420 m³. Οι κλειστοί χώροι αποθήκευσης H₂ πρέπει να διαθέτουν αερισμό. Τέλος, ο κανονισμός αναφέρει ότι για ποσότητες χημικών ουσιών πάνω από 4.500 kg είναι απαραίτητη η σύνταξη ποιοτικής ανάλυσης κινδύνου (qualitative hazard analysis).

Στον κανονισμό 40 CFR (Part 68.130) αναφέρεται ως τιμή κατωφλίου μάζας H₂ για την πρόληψη ατυχημάτων έκλυσης τα 4.500 kg. Στην περίπτωση λοιπόν σταθμών ανεφοδιασμού μεγάλης τροφοδοσίας (πάνω από 30 αυτοκίνητα/μέρα) είναι απαραίτητο ο σχεδιασμός να είναι τέτοιος ώστε να προληφθούν ατυχήματα έκλυσης H₂ μάζας ίσης ή μεγαλύτερης από την τιμή κατωφλίου.

Ο κανονισμός 49 CFR εξετάζει την περίπτωση μεταφοράς και χειρισμού αερίου και κρουγενικού H₂. Το αέριο και κρουγενικό H₂ δεν μπορεί να μεταφερθεί με επιβατικό αεροσκάφος ή μέσω σιδηροδρομικής γραμμής. Η συνολική επιτρεπόμενη ποσότητα εξάτμισης (boiloff) H₂ του μέσου μεταφοράς δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1,7 m³/hr ενώ το μέσο δεν επιτρέπεται να εισέλθει σε σήραγγες.

Υπάρχουν 2 σημαντικά NFPA πρότυπα τα οποία εξετάζουν το H₂, το NFPA 50A (για συστήματα αερίου H₂) και το NFPA 50B (για συστήματα υγροποιημένου H₂). Το NFPA 50A δεν εφαρμόζεται για συστήματα που περιέχουν H₂ λιγότερο από 11 m³. Το NFPA 52 εξετάζει τα συστήματα καυσίμου πεπιεσμένου φυσικού αερίου παροχής που δεν υπερβαίνει τα 0,3 m³/m σε πίεση 272 atm. Τα συστήματα συμπίεσης αερίου, αποθήκευσης και διανομής πρέπει να βρίσκονται πάνω από το έδαφος, μακριά από ηλεκτρικές γραμμές και σε ελάχιστη απόσταση 3 m από το κοντινότερο κτίριο, σύνορο παρακείμενης ιδιοκτησίας, πηγής έναυσης, δημόσιο δρόμο και τουλάχιστον 15 m από την κοντινότερη σιδηροδρομική γραμμή. Η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας των δοχείων εύφλεκτων και καυσίμων υλικών είναι 6 m. Το NFPA 57 εξετάζει τα συστήματα καυσίμου υγροποιημένου φυσικού αερίου που δεν υπερβαίνουν τα 265 m³. Τα πρότυπα NFPA 88A (εγκαταστάσεις στάθμευσης αυτοκινήτων) και NFPA 88B (σταθμοί επισκευής αυτοκινήτων) δεν αναφέρουν αυτοκίνητα κινούμενα με H₂ αλλά αναφέρουν αυτοκίνητα με φυσικό αέριο. Το πρότυπο NFPA 30A περιλαμβάνει κανόνες σχεδιασμού σταθμών ανεφοδιασμού βενζίνης, πετρελαίου κίνησης και φυσικού αερίου. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι κατά τον Bechtold (1997), η χρήση αερίου H₂ αναμένεται να έχει τις ίδιες απαιτήσεις ασφαλείας με αυτές του πεπιεσμένου φυσικού αερίου.

Το πρότυπο CGA 1991 αναφέρεται στα φορητά δοχεία H₂ και σε κανονισμούς χειρισμού και αποθήκευσης του. Μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τα δοχεία άλλων αερίων είναι η απαγόρευση του στιγμιαίου μερικού ανοίγματος της βαλβίδας για καθαρισμό της (μια κοινή πρακτική κατά την σύνδεση του δοχείου με τον ρυθμιστή πίεσης) διότι υπάρχει ο κίνδυνος αυτανάφλεξης του H₂. Είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ανιχνευτών H₂ οι οποίοι θα πρέπει να σημαίνουν συναγερμό σε

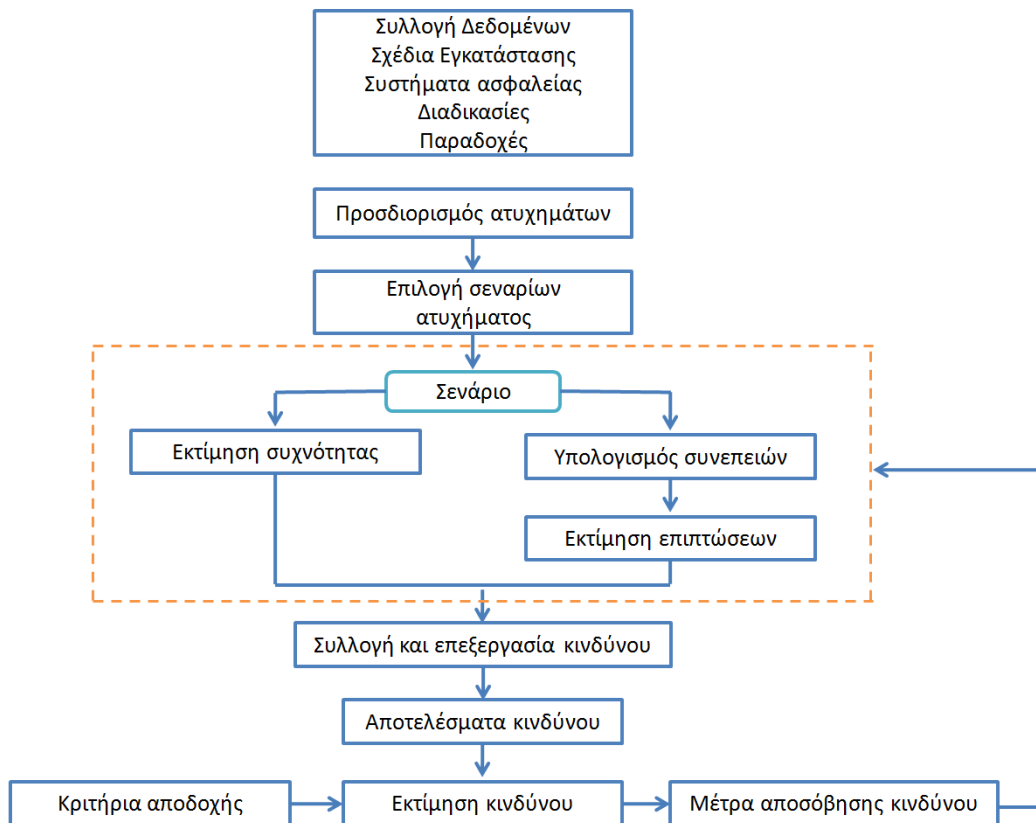
συγκέντρωση 1% και να διακόπτουν τη λειτουργία (shut down) στα 2%. Το πρότυπο CGA 1996 αναφέρει οδηγίες για την ασφαλή απόρριψη H₂ (venting). Αγωγός με αναλογία μήκους/διαμέτρου 60:1 ή μεγαλύτερης μπορεί να προκαλέσει κατάκαυση ενώ σε αναλογία 100:1 είναι δυνατή η εμφάνιση κατάρρευσης.

Ο κώδικας UFC, Section 2903 1997 αναφέρεται σε σταθμούς επισκευής αυτοκινήτων και κάνει ιδιαίτερη αναφορά σε αυτοκίνητα H₂ και LNG. Είναι απαραίτητη η χρήση ανιχνευτών οι οποίοι θα πρέπει να σημαίνουν συναγερμό (ηχητικά και οπτικά), να διακόπτεται η λειτουργία όλων των συστημάτων θέρμανσης και να ενεργοποιείται ο μηχανικός αερισμός όταν η συγκέντρωση H₂ ξεπεράσει το 25% του LFL. Στο τμήμα 5204 του ίδιου κώδικα αναφέρονται οι σταθμοί ανεφοδιασμού πεπιεσμένου φυσικού αερίου και ορίζεται ως μέγιστη επιτρεπόμενη χωρητικότητα ενός σταθμού τα 5.180 m³. Οι διανομείς πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από 3 m από το κοντινότερο κτίριο, δημόσιο δρόμο, πεζοδρόμιο ή πηγή έναυσης. Τέλος, στο τμήμα 8004 του ίδιου κώδικα αναφέρονται οδηγίες για την διανομή εύφλεκτων αερίων και άλλων επικίνδυνων υλικών και αναφέρεται ως απόσταση ασφαλείας τα 10 m μεταξύ του χώρου αποθήκευσης και δημοσίων οδών και πεζοδρομίων για συστήματα αερίων όγκου μεταξύ 119 και 598 m³.

Προς το παρόν, οι σταθμοί ανεφοδιασμού H₂ λαμβάνουν άδεια λειτουργίας με βάση τους υπάρχοντες Κώδικες, Κανονισμούς και Προδιαγραφές για εγκαταστάσεις H₂ οι οποίοι αναφέρουν κάποια χαρακτηριστικά ασφαλείας (όπως π.χ. αποστάσεις ασφαλείας) και προσδιορίζουν το υλικό του εξοπλισμού κατάλληλο για χρήση με H₂. Άλλες απαιτήσεις για την αδειοδότηση μπορεί είναι η μελέτη εκτίμησης κινδύνου η οποία έχει ως στόχο να αποδείξει ότι ο σταθμός είναι ασφαλής και ότι διαθέτει τα απαραίτητα μέσα για την αποσόβηση κινδύνων.

Η τυπική μεθοδολογία για την μελέτη εκτίμησης κινδύνου (Risk Assessment) περιλαμβάνει τα εξής στάδια: α) προσδιορισμός των ατυχημάτων (Hazard Identification) και β) ορισμός των κριτηρίων αποδοχής (Acceptance Criteria) για τα ατυχήματα που προσδιορίστηκαν. Σ' ένα σταθμό ανεφοδιασμού H₂ οι κίνδυνοι μπορεί να είναι μια διαρροή H₂ από τον διανομέα, το κάπνισμα, απρόσεκτη οδήγηση, πλημμυλής συντήρηση κ.α.. Όταν ο κίνδυνος του ατυχήματος εκτιμηθεί, το αποτέλεσμα συγκρίνεται με τα κριτήρια αποδοχής. Εάν ο κίνδυνος βρίσκεται μέσα στα όρια αποδοχής τότε θεωρείται εξ ορισμού αποδεκτός. Στην αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να αξιολογηθούν τα μέτρα αποσόβησης κινδύνου. Στο Σχήμα 3 απεικονίζονται τα γενικά βήματα μιας μελέτης εκτίμησης κινδύνου. Μετά τον προσδιορισμό των πιθανών ατυχημάτων διαμορφώνεται ένας κατάλογος από πιθανά σενάρια. Κάθε πιθανό σενάριο είναι αποτέλεσμα ενός ή περισσότερων πιθανών ατυχημάτων π.χ. το σενάριο διαρροής H₂ μπορεί να προκληθεί από ένα ή περισσότερα ατυχήματα όπως: ρήξη του σωλήνα τροφοδοσίας, διαρροή στον διανομέα, διάβρωση σωλήνα ή κάποιο αυτοκίνητο που μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον σωλήνα τροφοδοσίας ή τον διανομέα. Το επόμενο στάδιο μετά τον καθορισμό των σεναρίων είναι ο προσδιορισμός της συχνότητάς τους. Για την εκτίμηση της συχνότητας πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν όλα τα πιθανά ατυχήματα που μπορεί να οδηγήσουν στο σενάριο. Αυτό το στάδιο συνήθως απαιτεί την ανάλυση συμβάντων/ατυχημάτων του παρελθόντος. Όταν ένα σενάριο, όπως π.χ. διαρροή H₂ λάβει χώρα τότε μία σειρά από γεγονότα μπορεί να ακολουθήσουν όπως φωτιά

πυρσού (jet fire), έκρηξη κ.α.. Για κάθε ένα από αυτά τα γεγονότα οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τις συνέπειες του ατυχήματος είναι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, τα μέτρα ασφάλειας, οι πιθανές πηγές έναυσης και ο βαθμός συμφόρησης. Κατά τον υπολογισμό των επιπτώσεων, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η πιθανότητα εμφάνισης όλων αυτών των παραγόντων για κάθε ένα από τα γεγονότα.



Σχήμα 3: Σχεδιάγραμμα γενικών βημάτων μελέτης εκτίμησης κινδύνου (DNV, 2008)

Η έννοια των δυσμενών επιπτώσεων περιορίζεται μόνο στις μετρήσιμες επιπτώσεις ενός ατυχήματος όπως έκρηξη ή φωτιά και είναι π.χ. η ακτίνα της φωτιάς, τα όρια θερμικής ακτινοβολίας ίσης με 25 kW/m^2 . Οι πρακτικές επιπτώσεις όπως ο αριθμός θανάτων ή τραυματιών, οι υλικές ζημιές, οι αρνητικές περιβαλλοντικές ή οικονομικές επιπτώσεις υπολογίζονται στο επόμενο στάδιο, το στάδιο Εκτίμησης των Επιπτώσεων.

Ο κίνδυνος ενός σεναρίου εκφράζεται μέσω της εκτίμησης της συχνότητας και των συνεπειών. Ο κίνδυνος συγκρίνεται με τα κριτήρια αποδοχής ούτως ώστε να κατηγοριοποιηθεί σε αποδεκτό ή μη. Εάν ο κίνδυνος βρεθεί να μην είναι αποδεκτός, τότε νέα μέτρα αποσόβησης κινδύνου πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και να γίνει εκ νέου ανάλυση αυτών των σεναρίων. Όπως αναφέρεται στην έκθεση του DNV (2008), δεν έχουν γίνει κανενός είδους προσαρμογές των κριτηρίων αποδοχής ώστε να καλυφθούν οι ιδιαιτερότητες των τεχνολογιών και εγκαταστάσεων χρήσης H_2 . Συνήθως χρησιμοποιούνται κριτήρια συμβατικών καυσίμων, ο δε κίνδυνος σταθμών ανεφοδιασμού H_2 συγκρίνεται με τον κίνδυνο σταθμού ανεφοδιασμού συμβατικών καυσίμων.

Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στις μελέτες εκτίμησης κινδύνου χωρίζονται σε ποιοτικές και ποσοτικές. Στην ποσοτική μέθοδο τα αποτελέσματα του κινδύνου κάθε σεναρίου εκφράζονται ποσοτικά όπως π.χ. αριθμός θανάτων/έτος, περιβαλλοντικές ζημιές/έτος, ζημιές ακίνητης περιουσίας/έτος. Οι ποσοτικές μελέτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την ανάλυση κόστους/ωφέλειας και για την οικονομική εκτίμηση εφαρμογής των μέτρων αποσόβησης κινδύνου σε ένα σταθμό. Ωστόσο είναι πιο χρονοβόρες από τις ποιοτικές και απαιτούνται λεπτομερείς πληροφορίες του σχεδιασμού του σταθμού. Η ποιοτική μέθοδος εκτίμησης κινδύνου έχει την ίδια δομή με την ποσοτική αλλά η εκτίμηση των συχνοτήτων και των επιπτώσεων των σεναρίων είναι ποιοτική. Τα αποτελέσματα των κινδύνων των ατυχημάτων τοποθετούνται στον πίνακα κινδύνου-Risk Matrix (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Πίνακας κινδύνου (DNV, 2008)

		FREQUENCY (per year)				
		A (<0.001)	B (0.001-0.01)	C (0.01-0.1)	D (0.1-1)	E (1-10)
SEVERITY	1 (Catastrophic)	H	H	H	H	H
	2 (Severe loss)	M	High	H	H	H
	3 (Major damage)	M	Medium	H	H	H
	4 (Damage)	L	Low	M	M	H
	5 (Minor damage)	L	L	L	L	M

Η ποιότητα των αποτελεσμάτων μιας ποσοτικής μελέτης εκτίμησης κινδύνου (Quantitative Risk Assessment - QRA) εξαρτάται κατά μεγάλο ποσοστό από την ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Συνήθως, στις μελέτες QRA χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων παρελθόντων ατυχημάτων/συμβάντων. Στην περίπτωση των τεχνολογιών H₂ τέτοιου είδους δεδομένα δεν υπάρχουν εφόσον η ευρεία χρήση H₂ ως καύσιμο είναι όψιμη τεχνολογία. Η έλλειψη τέτοιου είδους δεδομένων έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αβεβαιότητα μελετών QRA σταθμών ανεφοδιασμού H₂ σε σχέση με αντίστοιχες μελέτες υπεράκτιων εγκαταστάσεων υδρογονανθράκων όπου τα στατιστικά δεδομένα είναι πολύ καλά. Στην έκθεση του DNV (2008) αναφέρεται ότι απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη των μεθοδολογιών και παραδοχών για την εκτίμηση των παρακάτω:

- Συχνότητες διαρροών (μέχρι στιγμής δεν υπάρχει καμία δημοσιευμένη συλλογή συχνοτήτων διαρροών του εξοπλισμού επάκτιων/χερσαίων διεργασιών)
- Πιθανότητες αστοχιών/βλαβών συστημάτων ασφαλείας κατά την λειτουργία ή χρήση συστημάτων όπως:
 - Αποθηκευτικός χώρος
 - Σύστημα διακοπής λειτουργίας (shutdown) τμήματος της διεργασίας
 - Ανίχνευση αερίων
 - Έλεγχος πηγών έναυσης

Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

- Πιθανότητες έναυσης (πολύ συχνά οι τιμές των πιθανοτήτων έναυσης διαφέρουν κατά πολύ από μελέτη σε μελέτη)

Εκτός από την έκθεση DNV (2008) για την αβεβαιότητα των μελετών εκτίμησης κινδύνου, ο Pasma (2009) αναφέρει ότι «τα αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων εκτίμησης κινδύνου αλλά ακόμα και της ίδιας μεθόδου από διαφορετικούς αναλυτές για την ίδια μονάδα, σε πολλές περιπτώσεις διαφέρουν κατά πολύ». Κατά τον Pasma (2009) ο προσδιορισμός των σεναρίων της μελέτης εκτίμησης κινδύνου μιας μονάδας, φαίνεται να είναι ισχυρά συνδεδεμένος με την γνώση και την εμπειρία του αναλυτή ενώ οι τιμές για τις πιθανότητες έκλυσης και έναυσης του H₂ ποικίλουν ευρέως.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή χρηματοδότησε δυο φορές προγράμματα σύγκρισης μελετών εκτίμησης κινδύνου αποτελούμενα από ομάδες διαφορετικών χωρών. Και τα δυο αφορούσαν μονάδες αποθήκευσης αμμωνίας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα αποτελέσματα του ατομικού κινδύνου (individual risk) του 1^{ου} προγράμματος διέφεραν κατά 5 τάξεις μεγέθους ενώ στο 2^ο πρόγραμμα (πρόγραμμα ASSURANCE) οι διαφορές του κοινωνικού κινδύνου (societal or group risk) των καμπυλών F-N διέφεραν κατά 2 τάξεις μεγέθους. Στο 2^ο πρόγραμμα επιχειρήθηκε μια ποιοτική εκτίμηση της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων στην αβεβαιότητα των υπολογισθέντων κινδύνων η οποία παρουσιάζεται συνοπτικά στον κάτωθι πίνακα (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Ποιοτική εκτίμηση της σπουδαιότητας διαφόρων παραγόντων στην αβεβαιότητα των υπολογισθέντων κινδύνων (τα αστέρια σηματοδοτούν τη σπουδαιότητα) (Pasma, 2009)

Παράγοντας αβεβαιότητας	Ένδειξη σπουδαιότητας
Διαφορές στην ποιοτική ανάλυση	**
<i>Παράγοντες σχετικοί με την εκτίμηση συχνότητας</i>	
Εκτίμηση συχνότητας αστοχίας αγωγών/σωληνώσεων	***
Εκτίμηση συχνότητας αστοχίας βραχιόνων φόρτωσης	****
Εκτίμηση συχνότητας αστοχίας δεξαμενών υπό πίεση	****
Εκτίμηση συχνότητας αστοχίας κρουγενικών δεξαμενών	***
<i>Παράγοντες σχετικοί με την εκτίμηση των επιπτώσεων</i>	
Ορισμός σεναρίου	*****
Μοντελοποίηση του ρυθμού έκλυσης από μεγάλο μήκους αγωγό	***
Μοντελοποίηση του ρυθμού έκλυσης από μικρού μήκους αγωγό	*
Χρόνος έκλυσης (χειριστής ή σύστημα διακοπής λειτουργίας)	***
Επιλογή μοντέλου υπολογισμού διασποράς	****
Διαφορές στους κώδικες υπολογισμού διασποράς	***
Κρίση/συντηρητισμός αναλυτή	***

Όπως φαίνεται από τον πίνακα, σημαντικότερο ρόλο στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων έχει ο ορισμός των σεναρίων ατυχημάτων στη μονάδα. Σημαντική αβεβαιότητα υπάρχει επίσης και στην εκτίμηση της συχνότητας αστοχιών στα διάφορα στάδια της μονάδας. Όσον αφορά το H₂, λόγω του μικρού ιξώδους του, είναι πιο επιρρεπές στις διαρροές από σωληνώσεις σε σχέση με τους υδρογονάνθρακες. Επειδή οι συχνότητες διαρροών που χρησιμοποιούνται στις

μελέτες εκτίμησης κινδύνου μονάδων H₂ λαμβάνονται από δεδομένα διαρροών υδρογονανθράκων, η αβεβαιότητα και σ' αυτόν τον παράγοντα είναι σημαντική. Ένας άλλος παράγοντας είναι ο προσδιορισμός της πιθανότητας έναυσης ατυχήματος H₂. Στην έκθεση IEA (IEA, 2008) εξετάστηκαν οι διαφορές στην έναυση μεταξύ H₂ και υδρογονανθράκων κυρίως λόγω του μεγέθους του νέφους και των ορίων έκρηξης του ενώ αναφέρεται και η έλλειψη σχετικών ιστορικών δεδομένων για το H₂. Τέλος, ο προσδιορισμός της πιθανότητας για φωτιά ή έκρηξη είναι επίσης δύσκολος. Παράγοντες που επηρεάζουν την κατάληξη της έναυσης σε φωτιά, κατάκαυση ήπιου ωστικού κύματος, ταχεία επιταχυνόμενη φλόγα με μέτριο ωστικό κύμα και κατάρρηξη είναι συνήθως το μέγεθος της διαρροής, ο περιβάλλον χώρος (ανοιχτός ή κλειστός) και η παρουσία εμποδίων, το ποσοστό ανάμιξης H₂ με τον αέρα και η ισχύς της πηγής έναυσης, παράγοντες που καθιστούν τον προσδιορισμό των αντίστοιχων πιθανοτήτων δύσκολο.

Έχουν ήδη δημοσιευτεί κάποιες εργασίες σχετικές με μελέτες εκτίμησης κινδύνου των τεχνολογιών H₂. Επί παραδείγματι, οι Chitose και συν. (2006) παρουσίασαν μια μεθοδολογία για την ποσοτική ανάλυση κινδύνου και την εκτίμηση κινδύνου ενός σταθμού ανεφοδιασμού H₂ μικρής κλίμακας. Χρησιμοποιήθηκε μια μεθοδολογία πιθανολογικής ανάλυσης κινδύνου (probabilistic risk analysis) για πυρηνικό εργοστάσιο ενώ για την εκτίμηση της πιθανότητας ενός γεγονότος και των βλαβών/αστοχιών των στοιχείων/εξαρτημάτων ελήφθησαν δεδομένα από χημικές βιομηχανίες. Οι Nilsen και συν. (2007) παρουσίασαν μια μέθοδο προσδιορισμού επικίνδυνων ζωνών για ένα πρατήριο αερίου H₂ με βάση την Ιταλική Μεθοδολογία. Στη δημοσίευση περιλαμβάνεται μια ανάλυση ευαισθησίας της επίδρασης των συχνοτήτων αστοχιών/βλαβών, του μεγέθους των διαρροών και των ατμοσφαιρικών συνθηκών στο είδος και την έκταση των επικίνδυνων ζωνών. Επίσης μελετήθηκε ποσοτικά η επίδραση του αερισμού και της θέσης της διαρροής στο μέγεθος του αναφλέξιμου νέφους με τη χρήση CFD και απλούστερων υπολογιστικών μεθόδων. Οι Haugom και συν. (2007) υπολόγισαν τους κινδύνους προς τρίτους μιας εγκατάστασης H₂ με στοιχεία όπως παραγωγή H₂, αποθήκευση, παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας και διανομών. Ο LaChance (2007) παρουσίασε μια εφαρμογή της μεθοδολογίας QRA με έμφαση στην εύρεση των απαιτήσεων των αποστάσεων ασφαλείας ενός πρατηρίου H₂. Η μέθοδος QRA εφαρμόστηκε στον χώρο αποθήκευσης ενός πρατηρίου H₂ πίεσης 70 MPa. Ο συγγραφέας παρατήρησε ότι η εύρεση δεδομένων για τον καθορισμό του δέντρου γεγονότων (Event Tree) και της συχνότητας εκδήλωσης των γεγονότων ήταν πολύ δύσκολη. Οι Kikukawa και συν. (2009) παρουσίασαν μια μέθοδο εκτίμησης κινδύνου για πρατήριο υγρού H₂ χωρητικότητας 17 m³. Για τον προσδιορισμό των σεναρίων χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι Ανάλυσης Τρόπων Αστοχίας και Συνεπειών (FMEA) και η Μέθοδος Εξέλιξης της Επικίνδυνης Κατάστασης (HAZOP). Οι επιπτώσεις κάθε σεναρίου εκτιμήθηκαν από δεδομένα πειραμάτων έκρηξης υγροποιημένου H₂. Οι Middha and Hansen (2009) επισήμαναν την σπουδαιότητα χρήσης κωδίκων CFD στη διαδικασία εκτίμησης των κινδύνων των τεχνολογιών H₂. Με τους κώδικες CFD είναι δυνατό να ληφθούν υπ' όψιν διάφορες παράμετροι κατά την ανάλυση και εκτίμηση των κινδύνων, όπως η επίδραση των γειτονικών κτιρίων, η επίδραση της διάταξης διαφόρων στοιχείων/μονάδων της εγκατάστασης και η επίδραση των μέτρων αποσόβησης κινδύνου.

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μελέτη QRA ενός υποθετικού σταθμού ανεφοδιασμού αερίου H_2 ενώ δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην παρουσίαση της ποσοτικής ανάλυσης των επιπτώσεων των σεναρίων ατυχήματος. Η μελέτη έλαβε χώρα στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος HySAFE NoE (HySAFE, 2003-2009) και συγκεκριμένα στο εσωτερικό πρόγραμμα HyQRA του HySAFE. Στόχος του προγράμματος HyQRA ήταν η σύγκριση των μεθοδολογιών QRA των διαφόρων συμμετεχόντων σε έναν προκαθορισμένο υποθετικό σταθμό H_2 (BBC station) και η επισήμανση των ελλείψεων δεδομένων και πληροφοριών αναγκαιών στα διάφορα βήματα μιας μελέτης QRA. Η μελέτη QRA αυτού του κεφαλαίου έγινε σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο της Πίζας της Ιταλίας (UNIFI). Το UNIFI προσδιόρισε τα πιθανά ατυχήματα, επέλεξε αυτά που ήταν πιο κρίσιμα, όρισε τα γεγονότα ή την αλληλουχία γεγονότων που μπορούν να προκαλέσουν κάποιο ατύχημα και κατέταξε τα τελικά σενάρια ως προς τον βαθμό επικινδυνότητας. Για όλα τα σενάρια έγινε μια ποσοτική ανάλυση των επιπτώσεων με τη χρήση του κώδικα CFD ADREA-HF. Οι παράμετροι ενδιαφέροντος για τη μελέτη QRA ήταν η χρονική και χωρική μεταβολή της μάζας και του όγκου του αναφλέξιμου νέφους H_2 -αέρα (συγκέντρωση H_2 4%-75%) καθώς και του νέφους συγκέντρωσης 20% του LFL και η μέγιστη κάθετη και οριζόντια έκταση του νέφους LFL (συγκέντρωση 4%) από το εκάστοτε σημείο έκλυσης.

Το UNIFI εκτίμησε ποσοτικά τα σενάρια ανοιχτού χώρου χρησιμοποιώντας το μοντέλο Effects 7.6. Ακολούθως, συνεκρίθησαν τα αποτελέσματα όπως η μέγιστη έκταση αναφλέξιμου νέφους και η περιεχόμενη μάζα H_2 στο αναφλέξιμο νέφος μεταξύ του κώδικα ADREA-HF και του μοντέλου Effects 7.6. Το UNIFI επέλεξε τα αποτελέσματα που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τη μεγαλύτερη ζημία για κάθε σενάριο και τα χρησιμοποίησε για να υπολογίσει με τη μέθοδο MEM τις αποστάσεις υπερπίεσεων 300, 100, 30 και 10 mbar θεωρώντας ότι η διαρροή καταλήγει σε έκρηξη αερίου νέφους σε ανοιχτό χώρο (UVCE). Υπολόγισε επίσης με το μοντέλο Effects 7.6 σε συνδυασμό με το μοντέλο Chamberlain την θερμική ακτινοβολία θεωρώντας ότι η έκλυση καταλήγει σε φωτιά πυρσού (jet fire). Η εκτίμηση λοιπόν κινδύνου παρουσιάστηκε μέσω των αποστάσεων επικινδυνότητας/ζημίας λόγω υπερπίεσης και θερμικής ακτινοβολίας.

9.2 Περιγραφή του σταθμού ανεφοδιασμού αερίου υδρογόνου

Τα γενικά χαρακτηριστικά του σταθμού ανεφοδιασμού BBC ελήφθησαν από την έκθεση του GEXCON σε συνεργασία με το UNIFI και το TNO (Hansen και συν., 2008). Όπως αναφέρεται στην έκθεση, τα τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σταθμού BBC δεν είναι λεπτομερή και κατά συνέπεια ο σταθμός δε μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικός όλων των πιθανών σταθμών H_2 ακόμη κι αν οι κυριότερες παραδοχές, οι σχετικές με την τροφοδοσία H_2 , την αποθήκευσή του, την πίεση λειτουργίας και τις διαστάσεις του βασικού εξοπλισμού είναι παρόμοιες με αυτές υπάρχοντων σταθμών. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σταθμού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) ενώ στο Σχήμα 4 απεικονίζεται το διάγραμμα διεργασίας του σταθμού.

Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

Πίνακας 3: Τεχνικά χαρακτηριστικά σταθμού BBC (Hansen και συν., 2008)

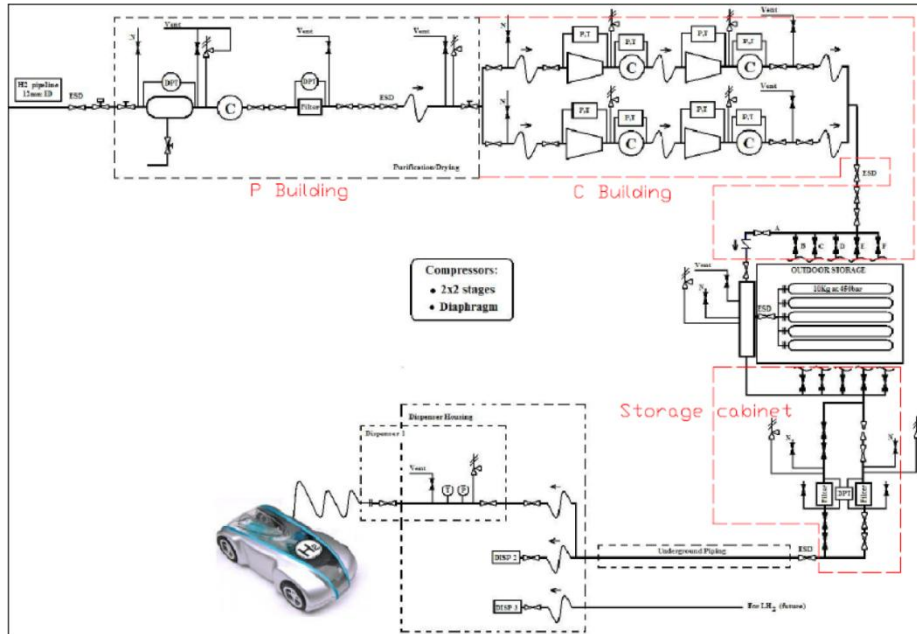
Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός εξυπηρετούμενων αυτοκινήτων ανά ημέρα	60
Ποσότητα H ₂ ανά ανεφοδιασμό	4 kg
Χρόνος ανεφοδιασμού	10 min
Μέση ημερήσια κατανάλωση καυσίμου	240 kg
Ονομαστική ικανότητα τροφοδοσίας ανά διανομέα	0.4 kg/min
Τυπική κατανάλωση καυσίμου (κατανάλωση ισοδύναμης βενζίνης)	4L/100 km

Ο σταθμός BBC αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Παροχή H₂ από εξωτερική πηγή: αγωγός παροχής σχετικής πίεσης 4 bar και θερμοκρασίας 20 °C.
- Μονάδες καθαρισμού και ξήρανσης: όγκος κάθε μονάδας 0,25 m³. Οι μονάδες βρίσκονται σε κλειστό χώρο όπου διαθέτει 2 ανιχνευτές H₂, 2 ανιχνευτές φωτιάς και 2 ανιχνευτές καπνού.
- Συμπιεστής: 2 ξεχωριστές γραμμές, μόνο η μία σε λειτουργία κάθε φορά με την ανενεργή γραμμή να περιέχει H₂. Κάθε γραμμή αποτελείται από 2 στάδια, στο 1^ο το H₂ συμπιέζεται στα 150 bar και στο 2^ο στα 450 bar. Ο συμπιεστής και ο ψυκτήρας έχουν όγκο 0,25 m³. Θερμοκρασία εξόδου 40 °C. Ο αγωγός πριν το 1^ο στάδιο έχει διάμετρο 12 mm και μετά από αυτό 8 mm. Οι γραμμές βρίσκονται σε κλειστό χώρο όπου διαθέτει 2 ανιχνευτές H₂, 2 ανιχνευτές φωτιάς και 2 ανιχνευτές καπνού.
- Σύνδεση μεταξύ συμπιεστή και μονάδας αποθήκευσης: υπάρχει ένα Σύστημα Διακοπής Λειτουργίας Εκτάκτου Ανάγκης (ESD) που βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο.
- Αποθήκευση: οι 6 συστοιχίες αποθήκευσης με 5 δοχεία αποθήκευσης η κάθε μια βρίσκονται σε εξωτερικό χώρο. Υπάρχει 1 Σύστημα Διακοπής Λειτουργίας Εκτάκτου Ανάγκης για κάθε συστοιχία ξεχωριστά. Η θερμοκρασία αποθήκευσης είναι 20 °C.
- Θάλαμος αποθήκευσης/διανομής (storage cabinet): Ο πολλαπλός διανομέας (6 αγωγοί για τις 6 συστοιχίες αποθήκευσης) βρίσκεται μέσα στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής ο οποίος έχει 2 συστήματα διακοπής λειτουργίας εκτάκτου ανάγκης (ESD). Ο θάλαμος περιλαμβάνει επίσης μια μονάδα φίλτρου.
- Σύνδεση αποθήκευσης με τους διανομείς: υπόγειο δίκτυο μήκους 30 m αποτελούμενο από 2 γραμμές διαμέτρου 6 mm. Κάθε γραμμή έχει μια βαλβίδα απομόνωσης, μια βαλβίδα ρύθμισης και μια βαλβίδα υπέρβασης ροής (excess flow valve).

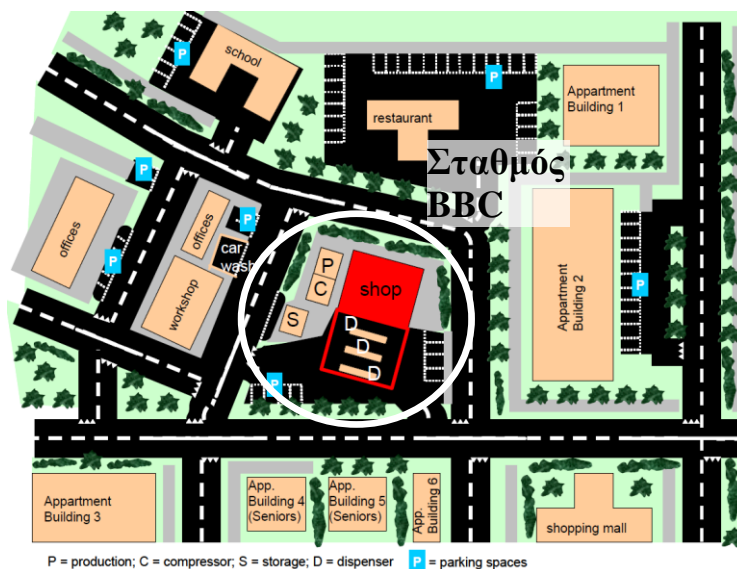
Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

- Διανομή – μονάδα διάθεσης: οι διανομείς βρίσκονται σε κατάλληλο στέγαστρο στο οποίο υπάρχει ανιχνευτής H_2 με χρόνο απόκρισης 10 s. Η συγκέντρωση H_2 για την ενεργοποίηση της διακοπής λειτουργίας είναι ίση με το 20% του LFL.



Σχήμα 4: Διάγραμμα διεργασίας του σταθμού ανεφοδιασμού BBC (Hansen και συν., 2008)

Στην παρούσα μελέτη, εκτός από το σταθμό ανεφοδιασμού ελήφθη υπ' όψιν και μια τυπική διάταξη παρακείμενων κτιρίων (Σχήμα 5) όπως σχολείο και εστιατόριο σε απόσταση 24 m, γραφεία σε διάφορες αποστάσεις, εμπορικό κέντρο σε απόσταση 30 m και ένα εργαστήριο. Τέλος, το πλάτος των δρόμων θεωρήθηκε ίσο με 10 m.



Σχήμα 5: Γενικό σχέδιο του σταθμού BBC και των παρακείμενων κτιρίων (Hansen και συν., 2008)

9.3 Γενική περιγραφή των σεναρίων

Η ποσοτική ανάλυση κινδύνου του σταθμού BBC περιέλαβε τα ακόλουθα βήματα (Marangon και συν., 2009):

- Προσδιορισμός των ατυχημάτων: στην 1^η φάση αυτού του βήματος έγινε μια ανάλυση όλου του εξοπλισμού και της λειτουργίας του. Ακολούθως αναγνωρίστηκαν όλες οι πιθανές αποκλίσεις λειτουργίας προσδιορίζοντας τις αιτίες των αποκλίσεων (όπως τεχνικές βλάβες, ανθρώπινα λάθη και εξωτερικά συμβάντα) καθώς και οι αντίστοιχες συνέπειες/επιπτώσεις κάθε απόκλισης ξεχωριστά. Ο δείκτης σφοδρότητας (severity index) κάθε ατυχήματος (S) προσδιορίστηκε ποιοτικά ενώ η εκτίμηση του δείκτη πιθανότητας/συχνότητας (frequency index) του κάθε ατυχήματος (L) έγινε ημι-ποιοτικά με τη χρήση βιβλιογραφίας όπως: Sandia Report (2009), AIChE/CCPS (1989), Lees and Mannan (2005), Roos (1999) κ.α. Ο δείκτης κινδύνου (risk index) κάθε συμβάντος υπολογίστηκε ως το γινόμενο του δείκτη πιθανότητας επί του δείκτη σφοδρότητας. Κάθε πιθανό συμβάν τοποθετήθηκε στον λεγόμενο «Βασικό» Πίνακα Κινδύνου («Fundamental» Risk Matrix) ο οποίος φαίνεται σχηματικά παρακάτω:

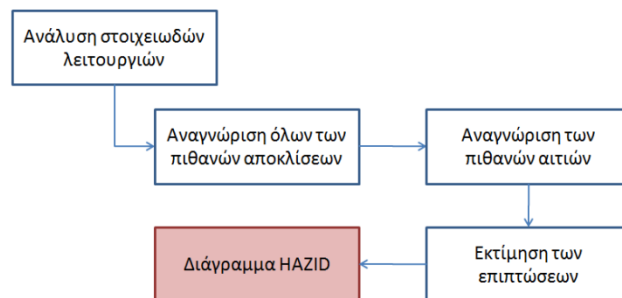
		Likelihood			
		4	3	2	1
		$F \geq 10^{-2}$	$5 * 10^{-4} \leq F < 10^{-2}$	$5 * 10^{-6} < F < 5 * 10^{-4}$	$F \leq 5 * 10^{-6}$
Severity		$F \geq 0.01$	$0.0005 \leq F < 0.01$	$0.000005 < F < 0.0005$	$F \leq 0.000005$
4					
3					
2					
1					

Σχήμα 6: «Βασικός» Πίνακας Κινδύνου (Marangon και συν., 2009)

Ο πίνακας χωρίζεται σε 3 περιοχές βάσει του κινδύνου:

- Μη αποδεκτός κίνδυνος - κόκκινη περιοχή: τα συμβάντα που βρίσκονται σε αυτήν την περιοχή δεν είναι αποδεκτά και ως εκ τούτου πρέπει να γίνει μια εκτενέστερη ανάλυση κινδύνου για τη βελτίωση του σχεδιασμού και της λειτουργίας της διεργασίας.
- Σχεδόν αποδεκτός κίνδυνος ή ALARP – κίτρινη περιοχή: προτείνονται τροποποιήσεις στο σχεδιασμό ή/και τη λειτουργία της διεργασίας ώστε ο κίνδυνος να μειωθεί κατά το δυνατό λαμβάνοντας παράλληλα υπ' όψιν το οικονομικό κόστος.
- Αποδεκτός κίνδυνος – λευκή περιοχή: για τα συμβάντα που βρίσκονται σ' αυτήν την περιοχή, ο σχεδιασμός και η λειτουργία της διεργασίας παρέχουν επαρκή έλεγχο του κινδύνου.

Στο βήμα αυτό ακολουθήθηκε η μέθοδος Αναγνώρισης Επικίνδυνης Κατάστασης (HAZID) η οποία παρουσιάζεται σχηματικά παρακάτω:



Σχήμα 7: Διάγραμμα μεθόδου Αναγνώρισης Επικίνδυνης Κατάστασης (HAZID)

- Τα συμβάντα που βρίσκονται στην κόκκινη και κίτρινη περιοχή του «Βασικού» Πίνακα Κινδύνου επαναξιολογούνται. Αυτή τη φορά για την εκτίμηση του κινδύνου λαμβάνονται υπ' όψιν τα μέτρα και συστήματα ασφάλειας και εκτάκτου ανάγκης της εγκατάστασης. Για την εκτίμηση της συχνότητας αστοχίας των συστημάτων ασφάλειας και εκτάκτου ανάγκης χρησιμοποιήθηκε η ποσοτική μέθοδος Ανάλυσης Δένδρου Αστοχιών (Quantitative Fault Tree Analysis). Έχοντας υπολογίσει τις συχνότητες αστοχίας των συστημάτων ασφάλειας και εκτάκτου ανάγκης, υπολογίζονται εκ νέου οι συχνότητες/πιθανότητες των συμβάντων με την ποσοτική μέθοδο Ανάλυσης Δένδρου Γεγονότος (Quantitative Event Tree Analysis). Ο δείκτης σφοδρότητας κάθε συμβάντος επαναπροσδιορίζεται και πάλι ποιοτικά. Τα συμβάντα τοποθετούνται στον λεγόμενο «Αντισταθμισμένο» Πίνακα Κινδύνου («Compensated» Risk Matrix).
- Για τα συμβάντα που βρίσκονται στην κόκκινη και κίτρινη περιοχή του «Αντισταθμισμένου» Πίνακα Κινδύνου γίνεται μια ανάλυση της ακολουθίας όλων των πιθανών γεγονότων που μπορεί να οδηγήσουν σε κάποιο ατύχημα ή περιστατικό λαμβάνοντας υπ' όψιν όχι μόνο τα συστήματα ασφαλείας και εκτάκτου ανάγκης αλλά και τις πιθανότητες έναυσης H₂ (ακαριαία ή καθυστερημένη). Πληροφορίες για τον προσδιορισμό της πιθανότητας έναυσης H₂ αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία όπως: Deliverable D71, HySAFE (2007), Marangon and Carcassi (2006) Cadwallader and Herring (1999) κ.α. Ανάλογα με τις παραπάνω πληροφορίες, ένα αρχικό συμβάν μπορεί να προκαλέσει διαφορετικής έντασης ατύχημα ή μπορεί ακόμη να καταλήξει σε απλό περιστατικό. Παραδειγματος χάριν, ως αρχικό συμβάν μπορεί να θεωρηθεί η έκλυση H₂ από έναν σωλήνα, η οποία μπορεί να είναι είτε μικρή, είτε μεγάλη είτε μπορεί να είναι ακόμα και πλήρης ρήξη του σωλήνα. Σε κάθε ένα από τα 3 αυτά είδη έκλυσης αποδίδεται και πάλι μία τιμή συχνότητας/πιθανότητας. Η έκλυση μπορεί να οδηγήσει σε έναυση H₂ (ακαριαία ή καθυστερημένη) ή μη. Σε κάθε ένα από αυτά τα γεγονότα αποδίδεται και μία τιμή συχνότητας/πιθανότητας. Ανάλογα με την εμφάνιση (και το είδος της έναυσης) ή μη της έναυσης το αρχικό συμβάν μπορεί να καταλήξει π.χ. σε φλογοπίδακα - φωτιά πυρσού (jet fire), σε έκρηξη ή και σε απλή διασπορά H₂ (απλό περιστατικό).

Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

Με την ανάλυση της ακολουθίας όλων των πιθανών γεγονότων (assessment of sequences) κάθε αρχικού συμβάντος το UNIPi προσδιόρισε συνολικά 15 σενάρια για τον ποσοτικό υπολογισμό των επιπτώσεων και την εκτίμηση των βλαβών στο σταθμό. Τρία από τα σενάρια αφορούσαν μικρή έκλυση (σενάριο C1), μεγάλη έκλυση (σενάριο C2) και ολική ρήξη του σωλήνα (σενάριο C3) μέσα στο κτίριο συμπίεσης. Δύο σενάρια αφορούσαν διαρροή μικρής και μεγάλης έκτασης (σενάρια P1 και P2) μέσα στη μονάδα καθαρισμού ενώ 4 σενάρια αφορούσαν μικρή διαρροή (σενάρια ST1 και ST2) και ρήξη του σωλήνα (σενάρια ST3 και ST4) που βρισκόταν μέσα στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής με 2 διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (1,5 και 5 m/s). Τα υπόλοιπα 6 σενάρια αφορούσαν εκλύσεις σε ανοιχτό χώρο. Συγκεκριμένα, 2 από αυτά ήταν μεγάλης έκτασης διαρροή από μια εκ των 6 συστοιχιών αποθήκευσης (σενάρια S1 και S2) και 2 μεγάλης έκτασης διαρροή από 1 δοχείο αποθήκευσης (σενάρια S3 και S4) υπό 2 διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (1,5 και 5 m/s). Τέλος, τα 2 τελευταία σενάρια αφορούσαν μεγάλη έκλυση στο σωλήνα ενός διανομέα στη μονάδα διάθεσης πάλι υπό 2 διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (1,5 και 5 m/s). Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τις βασικές συνθήκες των 15 σεναρίων. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι επειδή η μέθοδος QRA της παρούσας μελέτης ήταν προσδιοριστική (deterministic approach) κάθε ένα από τα σενάρια συμβάλλει εξίσου στον προσδιορισμό των βλαβών/κινδύνων χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψιν η συχνότητα/πιθανότητα κάθε σεναρίου. Στον αντίποδα, βρίσκεται η μέθοδος πιθανολογικής εκτίμησης κινδύνου (probabilistic risk assessment methodology) κατά την οποία για τον προσδιορισμό των βλαβών/κινδύνων λαμβάνεται υπ' όψιν εκτός από την έκταση του κινδύνου και η πιθανότητα εμφάνισής του. Τέτοιου είδους μεθοδολογία χρησιμοποιείται φερ' ειπείν στην Ολλανδία (Beroggi and Abbas, 1997).

Πίνακας 4: Συνθήκες των 15 σεναρίων του σταθμού BBC

Σενάριο	Διάμετρος διαρροής (mm)	Διεύθυνση έκλυσης	Εκλυόμενος όγκος (m ³)	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Αερισμός	Σχόλια
C1	0,8	Καθοδική	0,25	Άπνοια	Φυσικός και μηχανικός	Μικρή έκλυση
C2	1,6	Καθοδική	0,25	Άπνοια	Φυσικός και μηχανικός	Μεγάλη έκλυση
C3	8	Οριζόντια	0,25	Άπνοια	Φυσικός και μηχανικός	Ρήξη σωληναγωγού
P1	0,8	Καθοδική	0,5	Άπνοια	Φυσικός και μηχανικός	Μικρή έκλυση
P2	12	Οριζόντια	0,5	Άπνοια	Φυσικός και μηχανικός	Ρήξη σωληναγωγού
ST1	0,8	Καθοδική	0,1	1,5	Φυσικός	Μικρή έκλυση
ST2	0,8	Καθοδική	0,1	5	Φυσικός	Μικρή έκλυση
ST3	8	Οριζόντια	0,1	1,5	Φυσικός	Ρήξη σωληναγωγού
ST4	8	Οριζόντια	0,1	5	Φυσικός	Ρήξη σωληναγωγού
S1	1,6	Καθοδική	12,5	1,5	Ανοιχτός χώρος	Μεγάλη έκλυση
S2	1,6	Καθοδική	12,5	5	Ανοιχτός χώρος	Μεγάλη έκλυση
S3	1,6	Καθοδική	2,5	1,5	Ανοιχτός χώρος	Μεγάλη έκλυση

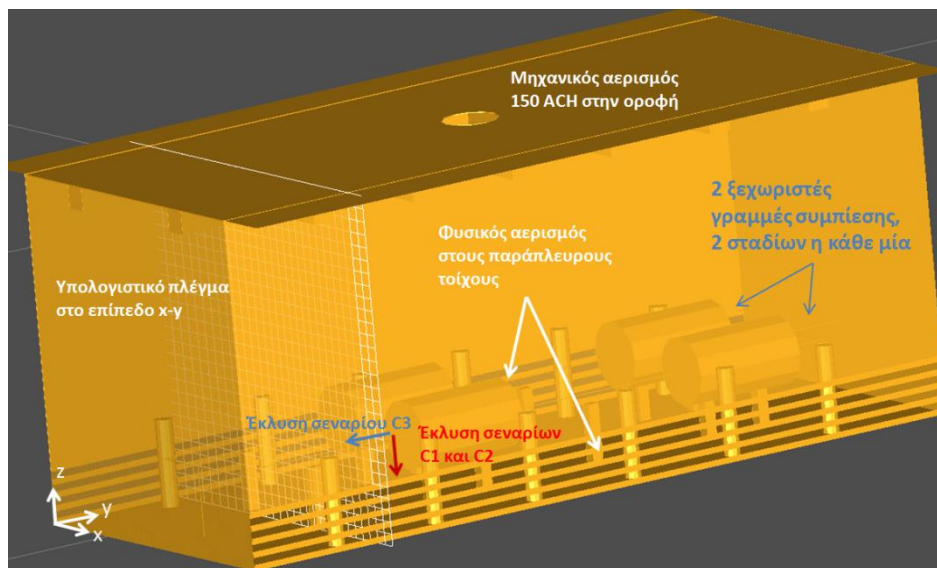
S4	1,6	Καθοδική	2,5	5	Ανοιχτός χώρος	Μεγάλη έκλυση
RF1	1,6	Καθοδική	0,15	1,5	Ανοιχτός χώρος	Μεγάλη έκλυση
RF2	1,6	Καθοδική	0,15	5	Ανοιχτός χώρος	Μεγάλη έκλυση

9.4 Ποσοτική εκτίμηση των επιπτώσεων των σεναρίων

Για όλα τα σεσάρια που προσδιορίστηκαν από το UNIPi, έγινε ποσοτική ανάλυση των επιπτώσεων. Χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας GAJET (Venetsanos και συν., 2003) για τον υπολογισμό των συνθηκών έκλυσης H₂ και ο κώδικας CFD ADREA-HF (Bartzis, 1991) για τον υπολογισμό της διασποράς του H₂ στον περιβάλλοντα χώρο. Μια γενική επισκόπηση της χρήσης του κώδικα ADREA-HF σε σεσάρια σχετικά με την μοντελοποίηση της έκλυσης και διασποράς H₂ έχει δημοσιευτεί από τους Venetsanos και συν. (2010). Για κάθε σεσάριο, υπολογίστηκαν η χρονική και χωρική μεταβολή της μάζας H₂ και του όγκου του αναφλέξιμου νέφους μίγματος H₂-αέρα (συγκέντρωση H₂ 4%-75%), το νέφος συγκέντρωσης ίσης και μεγαλύτερης από το 25 % του LFL καθώς και η μέγιστη κάθετη και οριζόντια έκταση του νέφους LFL (συγκέντρωση 4%) από το εκάστοτε σημείο έκλυσης. Η ποσοτική εκτίμηση των επιπτώσεων αυτού του κεφαλαίου έχει δημοσιευτεί πρόσφατα από τους Papanikolaou και συν. (2011).

9.4.1 Σεσάρια στη μονάδα συμπίεσης

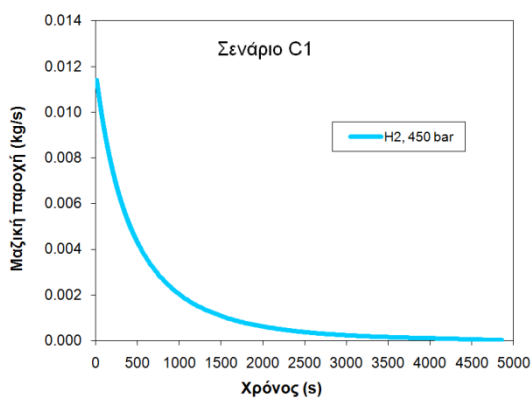
Τρία σεσάρια αφορούσαν εκλύσεις H₂ στο κτίριο συμπίεσης, μικρή έκλυση (σεσάριο C1), μεγάλη έκλυση (σεσάριο C2) και ολική ρήξη του σωλήνα (σεσάριο C3). Η μονάδα συμπίεσης είχε πλάτος 3 m, μήκος 7 m και ύψος 3 m. Στο κτίριο υπήρχαν ανοίγματα αερισμού σε 2 τοίχους κοντά στο έδαφος καθώς επίσης και μηχανικός αερισμός 150 ACH στην οροφή (βλέπε Σχήμα 8).



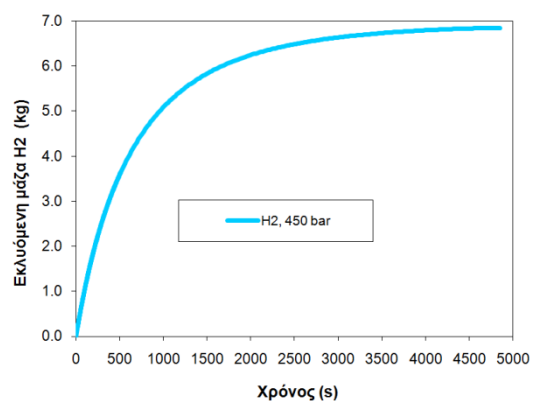
Σχήμα 8: Μονάδα συμπίεσης (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)

9.4.1.1 Υπολογισμός της έκλυσης H₂

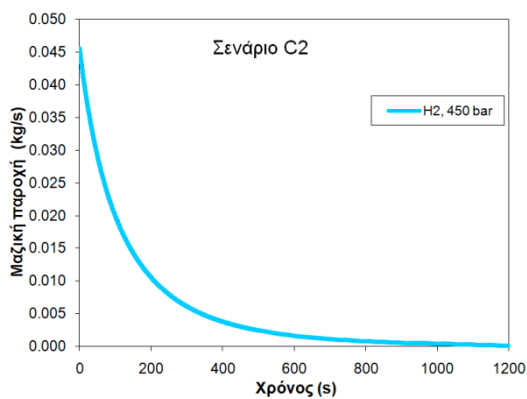
Με βάση την περιγραφή των σεναρίων (Sciavetti και συν., 2008) θεωρήθηκε ότι το H₂ εκλύεται από δεξαμενή όγκου 0,25 m³ υπό πίεση 450 bar και θερμοκρασία 313 K, ενώ η διάμετρος έκλυσης ήταν είτε 0,8 mm (σενάριο C1) είτε 1,6 mm (σενάριο C2) είτε 8 mm (σενάριο C3). Για τον υπολογισμό της έκλυσης H₂ χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας GAJET. Η έκλυση θεωρήθηκε ότι ακολούθησε ισεντροπική μεταβολή. Στα ακόλουθα σχήματα (Σχήμα 9 έως Σχήμα 14) φαίνεται η χρονική μεταβολή της μαζικής παροχής και της εκλυόμενης μάζας H₂ για τα 3 σενάρια. Οι εκλύσεις διήρκησαν 4.860 s, 1.200 s και 49 s ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας του αποθηκευμένου H₂ εκλύθηκε στα πρώτα 2.500 s, 600 s και 25 s για τα σενάρια C1, C2 και C3 αντίστοιχα.



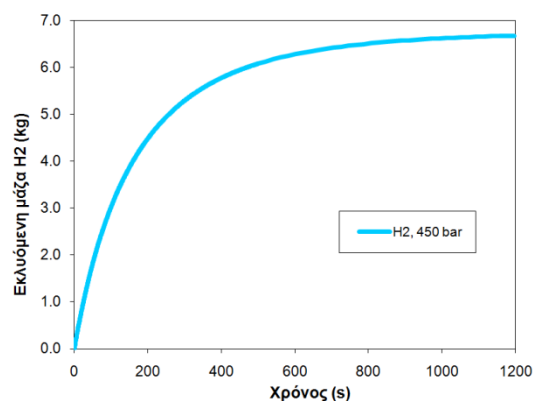
Σχήμα 9: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο C1)



Σχήμα 10: Εκλυθείσα μάζα H₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο C1)



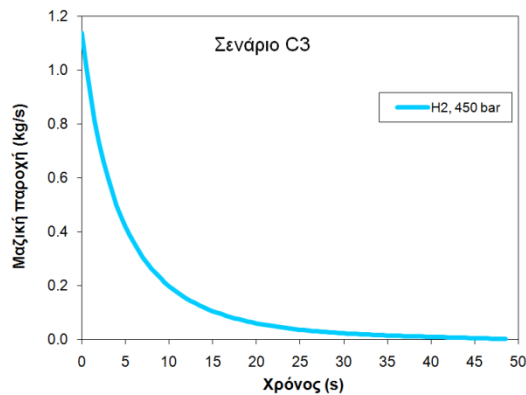
Σχήμα 11: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο C2)



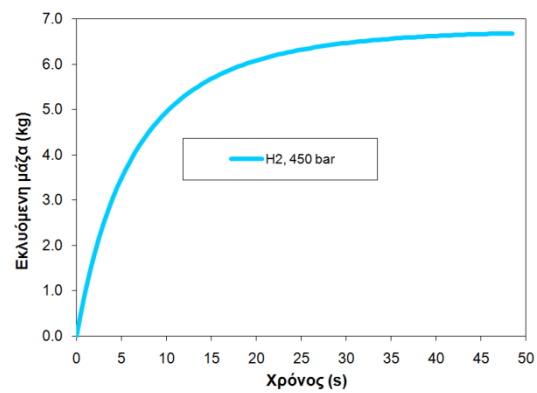
Σχήμα 12: Εκλυθείσα μάζα H₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο C2)

Στη συνέχεια, η υπολογισθείσα χρονική κατανομή της πίεσης και της θερμοκρασίας από τον κώδικα GAJET χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της φαινόμενης επιφάνειας έκλυσης με τη μέθοδο Birch 1984 (Birch και συν., 1984). Η ταχύτητα της έκλυσης στην φαινόμενη επιφάνεια θεωρήθηκε ηχητική (1.300 m/s), σταθερή και σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία (101325 Pa και 293 K αντίστοιχα). Λεπτομέρειες για τη μέθοδο Birch 1984 αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5: Ανασκόπηση

υπολογιστικών μελετών έκλυσης και διασποράς υδρογόνου. Η αρχική διάμετρος της φαινόμενης επιφάνειας ήταν 0,013 m, 0,025 m και 0,13 m για τα σενάρια C1, C2 και C3.



Σχήμα 13: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο C3)



Σχήμα 14: Εκλυθείσα μάζα H₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο C3)

Στην περίπτωση του σεναρίου C1, θεωρήθηκε ότι η πτώση πίεσης στο δοχείο λόγω της έκλυσης είναι τόσο μικρή ώστε να μην γίνει αντιληπτή από τον αισθητήρα διαφορικής πίεσης/θερμοκρασίας που βρίσκεται εγκατεστημένος στο δοχείο. Σε αυτό το σενάριο, θεωρήθηκε ότι ο ανιχνευτής συγκέντρωσης H₂ που βρίσκεται στο μέσον της οροφής της μονάδας θα ενεργοποιήσει το σύστημα εκτάκτου ανάγκης ESD για διακοπή της παροχής στη μονάδα (συγκέντρωση H₂ μεγαλύτερη από το 20% του LFL, δηλαδή 0,8%, ενεργοποιεί το σύστημα εκτάκτου ανάγκης). Γι' αυτό το λόγο, στο σενάριο C1 έγινε μια αρχική προσομοίωση με σταθερή μαζική παροχή ίση με την αρχική τιμή της χρονικής κατανομής της παροχής (0,011 kg/s). Όπως αποδείχθηκε, χρειάστηκαν 5 s για να φτάσει μίγμα H₂/αέρα συγκέντρωσης 20% του LFL στον ανιχνευτή. Η κατανομή της παροχής H₂ του σεναρίου C1 ήταν τελικά σταθερή και ίση με 0,011 kg/s για τα πρώτα 15 s (τα επιπλέον 10 s θεωρήθηκαν αναγκαία για την ενεργοποίηση του ESD από τον ανιχνευτή και τη διακοπή της παροχής H₂) ενώ μετά ακολούθησε την κατανομή που φαίνεται στο Σχήμα 9.

9.4.1.2 Υπολογισμός της διασποράς H₂ μέσα στη μονάδα συμπίεσης

Ο υπολογισμός της διασποράς H₂ μέσα στη μονάδα συμπίεσης έγινε σε 2 στάδια και για τα 3 σενάρια. Στο 1^ο στάδιο, η προσομοίωση περιέλαβε μόνο τη λειτουργία του μηχανικού αερισμού. Ταχύτητα ικανή να προκαλέσει αερισμό ίσο με 150 ACH (12,7 m/s) επιβλήθηκε στην επιφάνεια του μηχανικού αερισμού στην οροφή. Η προσομοίωση αυτή διήρκησε 1.000 s ώστε να διασφαλιστεί η σταθερή κατάσταση μέσα στη μονάδα. Στο 2^ο στάδιο προστέθηκε η έκλυση H₂ ενώ ο μηχανικός αερισμός εξακολουθούσε να είναι ενεργός. Η έκλυση κάθε σεναρίου μοντελοποιήθηκε εισάγοντας μια επιφάνεια πηγής (source area) σταθερής ταχύτητας (ηχητική) και μεταβαλλόμενης διαμέτρου ούτως ώστε η προκύπτουσα παροχή μάζας H₂ στην πηγή να είναι αυτή όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο Birch (1984).

Για τον υπολογισμό του πεδίου ροής επιλύθηκαν αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου οι μη μόνιμες, τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις (για

συμπιεστό ρευστό) διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνεχείας), ορμής μίγματος (για τις 3 συνιστώσες ταχύτητας) και κλάσματος μάζας H_2 . Η μοντελοποίηση της τύρβης έγινε με το κλασσικό μοντέλο $k-\epsilon$ των Launder and Spalding (Launder and Spalding, 1974 και Markatos, 1969) λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίδραση της άνωσης (Markatos και συν., 1982 και Markatos και συν., 1984).

Το σχήμα ανάντη διαφορών 1^{ης} τάξης χρησιμοποιήθηκε για τη χωρική διακριτοποίηση των όρων μεταφοράς. Για τη χρονική διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε η 1^{ης} τάξεως πλήρως πεπλεγμένη (fully implicit 1st order) μέθοδος. Τέλος χρησιμοποιήθηκε μία αυτόματη διαδικασία μεταβολής του χρονικού βήματος (με κριτήριο ευστάθειας λύσεως CFL=10 για το 1^ο στάδιο και CFL=2 για το 2^ο στάδιο) με μέγιστο χρονικό βήμα 10^{-1} s ενώ το αρχικό χρονικό βήμα ήταν 10^{-4} s για το 1^ο στάδιο και 10^{-6} s για το 2^ο.

9.4.1.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Η χωρική διακριτοποίηση έγινε σε καρτεσιανό υπολογιστικό πλέγμα με την τεχνική του πορώδους μέσου και της επιφανειακής διαπερατότητας για την περιγραφή της γεωμετρίας της μονάδας συμπίεσης με τον κώδικα DELTA-B (Venetsanos και συν., 1995) στο γραφικό περιβάλλον OpenCascade. Το υπολογιστικό πεδίο εκτεινόταν εκτός της μονάδας κατά 2 κελιά στην κατεύθυνση x. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πλέγματος των 3 σεναρίων.

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων μονάδας συμπίεσης

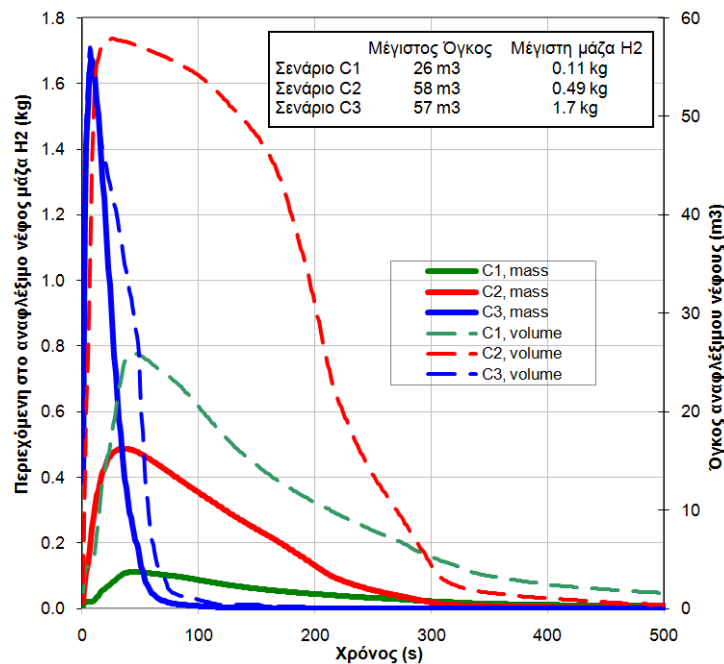
Χαρακτηριστικά πλέγματος	Σενάριο C1	Σενάριο C2	Σενάριο C3
Ελάχιστο μέγεθος κελιού (m)	0,1	0,1	0,1
Πλήθος κελιών στην x, y και z κατεύθυνση	31×53×28	31×52×28	31×51×28
Συνολικός αριθμός κελιών	45.440	44.570	43.700

9.4.1.3 Αποτελέσματα

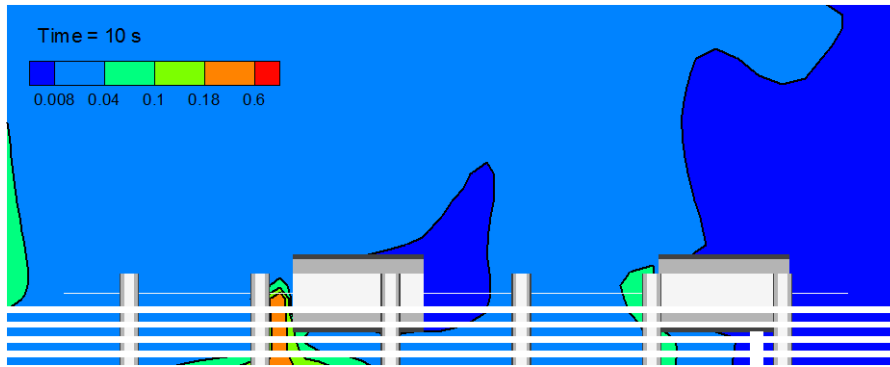
Με βάση τις προσομοιώσεις των 3 σεναρίων, ο χρόνος άφιξης μίγματος H_2 /αέρα συγκέντρωσης 20% του LFL στον ανιχνευτή στο μέσον της οροφής της μονάδας ήταν 5 s, 3 s και 1 s για το C1, C2 και C3 αντίστοιχα. Η μείωση του χρόνου άφιξης συνδέεται άμεσα με την παροχή μάζας της έκλυσης η οποία ήταν αρχικά $1,14 \cdot 10^{-2}$ kg/s, $4,56 \cdot 10^{-2}$ kg/s και 1,14 kg/s για τα 3 σεναρία. Στο χρόνο άφιξης ο όγκος του αναφλέξιμου νέφους ήταν 4,3 m³, 14,5 m³ και 17,4 m³. Στο Σχήμα 15 φαίνεται η χρονική κατανομή της περιεχόμενης στο αναφλέξιμο νέφος μάζας H_2 και ο όγκος του αναφλέξιμου νέφους των 3 σεναρίων. Για το σενάριο C1 το μέγιστο της μάζας H_2 και του όγκου του νέφους εμφανίζεται μετά από 44 s από την έναρξη της έκλυσης. Ο όγκος του αναφλέξιμου νέφους μειώνεται στο 1% του όγκου της μονάδας μετά από περίπου 780 s από την έναρξη της έκλυσης. Για το σενάριο C2 το μέγιστο της μάζας H_2 και του όγκου του νέφους εμφανίζεται μετά από 35 s από την έναρξη της έκλυσης ενώ μειώνεται στο 1% του όγκου της μονάδας μετά από περίπου 450 s από την έναρξή της. Τέλος, για το σενάριο C3 το αντίστοιχο μέγιστο εμφανίζεται μετά από 7 s ενώ μειώνεται στο 1% του όγκου της μονάδας μετά από περίπου 109 s από την έναρξή της. Οι διαφορές των αναφλέξιμων νεφών μεταξύ των 3 σεναρίων οφείλονται στις διαφορές της χρονικής κατανομής της έκλυσης H_2 .

Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

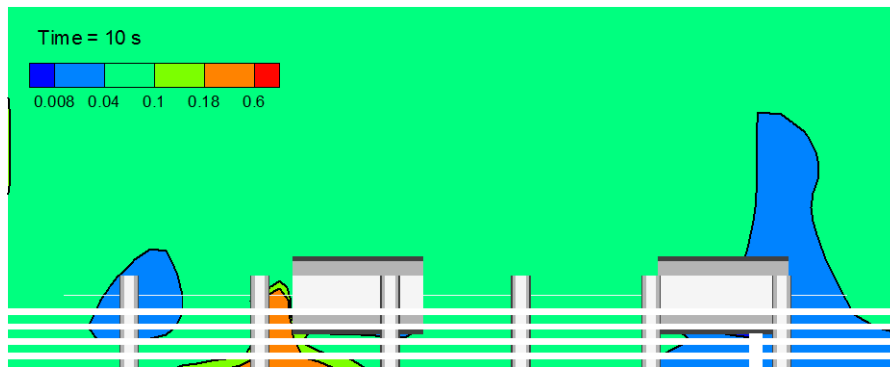
Από πλευράς επικινδυνότητας, το σενάριο C3 μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερες καταστροφές σε σχέση με τα άλλα 2 σενάρια. Το αναφλέξιμο νέφος καταλαμβάνει τον δεύτερο μεγαλύτερο όγκο αλλά περιέχει τη μεγαλύτερη μάζα H₂ ακόμα και αν ο χρόνος παραμονής του στην μονάδα είναι ο μικρότερος από τα 3 σενάρια. Για το σενάριο C3, η συγκέντρωση H₂ σε σημαντικό ποσοστό του χώρου της μονάδας ξεπέρασε κατά πολύ την τιμή 18% (βλέπε Σχήμα 18) η οποία είναι το όριο συγκέντρωσης όπου η κατάκαυση (deflagration) μπορεί να οδηγήσει στο πιο επικίνδυνο φαινόμενο, την κατάρρηξη (detonation). Για να πραγματοποιηθεί αυτή η μετάβαση, εκτός από συγκέντρωση H₂ μεγαλύτερη από 18% πρέπει να υπάρχει κάποια επιφάνεια ανάκλασης του ωστικού κύματος όπως π.χ. κάποιος από τους τοίχους ή ο εξοπλισμός που βρίσκεται μέσα στο κτίριο συμπίεσης. Ωστόσο, η πιθανότητα εμφάνισης του σεναρίου C3 είχε τη μικρότερη τιμή από τα υπόλοιπα σενάρια ($5 \cdot 10^{-7}$ event/year). Είναι συνήθης πρακτική σε μελέτες ασφάλειας, σενάρια με πιθανότητα εμφάνισης μικρότερη από 10^{-6} event/year να θεωρούνται τόσο απίθανα ώστε να μην επηρεάζουν τα αποτελέσματα της μελέτης. Στα άλλα 2 σενάρια η συγκέντρωση H₂ στο χώρο δεν ξεπέρασε το 15%, εκτός φυσικά από την περιοχή πολύ κοντά στην έκλυση (βλέπε Σχήμα 16 και Σχήμα 17).



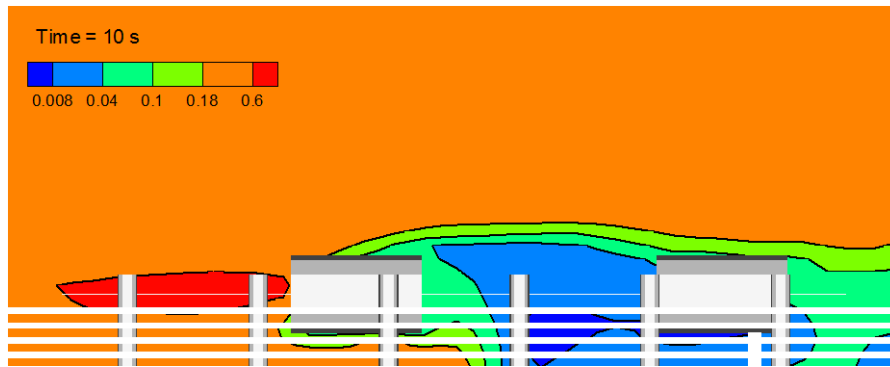
Σχήμα 15: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H₂ και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 0,8 mm (C1 σενάριο), 1,6 mm (C2 σενάριο) και 8 mm (C3 σενάριο))



Σχήμα 16: Κατανομή συγκεντρώσεων H_2 στο επίπεδο $y-z$ διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 10 s από την έκλυση (σενάριο C1) (Tecplot 8.0)



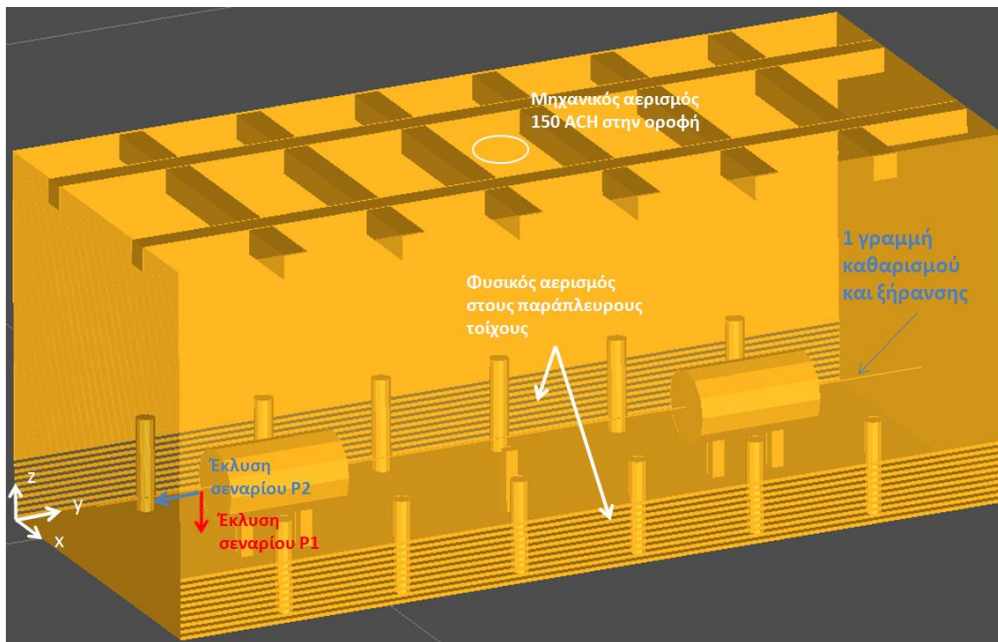
Σχήμα 17: Κατανομή συγκεντρώσεων H_2 στο επίπεδο $y-z$ διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 10 s από την έκλυση (σενάριο C2) (Tecplot 8.0)



Σχήμα 18: Κατανομή συγκεντρώσεων H_2 στο επίπεδο $y-z$ διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 10 s από την έκλυση (σενάριο C3) (Tecplot 8.0)

9.4.2 Σενάρια στη μονάδα καθαρισμού και ξήρανσης

Δύο σενάρια αφορούσαν εκλύσεις H_2 στη μονάδα καθαρισμού και ξήρανσης, μικρή έκλυση (σενάριο P1) και ολική ρήξη του σωλήνα (σενάριο P2). Η μονάδα είχε τις ίδιες διαστάσεις με την μονάδα συμπίεσης (3 m×7 m×3 m), ίδια διάταξη φυσικού αερισμού και μηχανικού αερισμού στην οροφή 150 ACH (βλέπε Σχήμα 19).



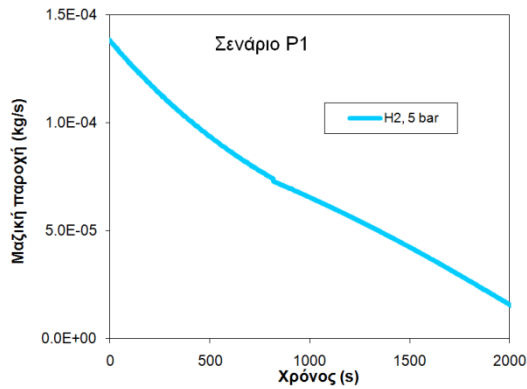
Σχήμα 19: Μονάδα καθαρισμού και ξήρανσης (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)

9.4.2.1 Υπολογισμός της έκλυσης H₂

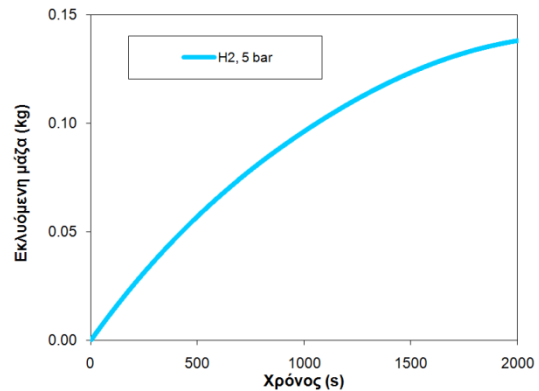
Με βάση την περιγραφή των σεναρίων (Sciavetti και συν., 2008) θεωρήθηκε ότι το H₂ εκλύεται από δεξαμενή όγκου 0,5 m³ υπό πίεση 5 bar και θερμοκρασία 293 K, ενώ η διάμετρος έκλυσης ήταν 0,8 mm για το σενάριο P1 και 12 mm για το σενάριο P2. Για τον υπολογισμό της έκλυσης H₂ χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας GAJET. Η έκλυση θεωρήθηκε ότι ακολούθησε ισεντροπική μεταβολή. Στα ακόλουθα σχήματα (Σχήμα 20 έως Σχήμα 23) φαίνεται η χρονική μεταβολή της μαζικής παροχής και της εκλυόμενης μάζας H₂ για τα 2 σεναρία. Οι εκλύσεις διήρκησαν 2.000 s και 9 s με αρχική μαζική παροχή 1,38·10⁻⁴ kg/s και 0,032 kg/s αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό της φαινόμενης επιφάνειας έκλυσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Birch (1984). Η ταχύτητα της έκλυσης στην φαινόμενη επιφάνεια θεωρήθηκε ηχητική (1300 m/s), σταθερή και σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία (101325 Pa και 293 K αντίστοιχα). Η αρχική διάμετρος της φαινόμενης επιφάνειας ήταν 0,0014 m, και 0,02 m για τα σεναρία P1 και P2.

Ομοίως με το σενάριο C1, στο σενάριο P1 θεωρήθηκε ότι η πτώση πίεσης στο δοχείο λόγω της έκλυσης είναι τόσο μικρή ώστε να μην γίνει αντιληπτή από τον αισθητήρα διαφορικής πίεσης/θερμοκρασίας που βρίσκεται εγκατεστημένος στο δοχείο. Η αρχική προσομοίωση με έκλυση σταθερής μαζικής παροχής 1,38·10⁻⁴ kg/s έδειξε ότι επί 1.000 s μίγμα H₂/αέρα συγκέντρωσης 20% του LFL δεν εμφανίζεται στον ανιχνευτή στο μέσον της οροφής. Γι' αυτό το λόγο, για το σενάριο P1, θεωρήθηκε τελικά σταθερή κατανομή μαζικής παροχής, χωρίς δηλαδή να τεθεί σε λειτουργία κάποιο μέτρο αποσόβησης κινδύνου.

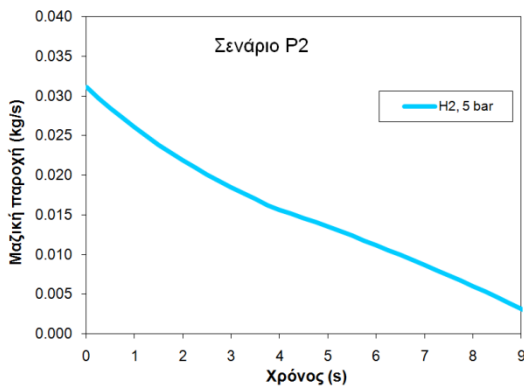
Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου



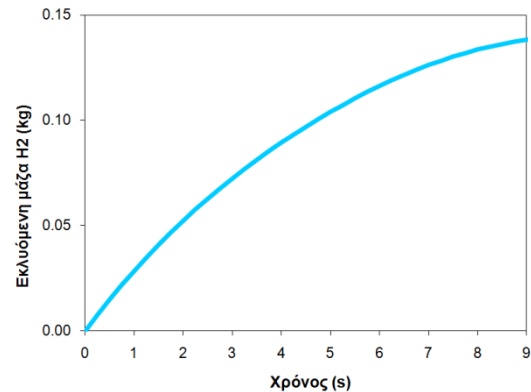
Σχήμα 20: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο P1)



Σχήμα 21: Εκλυθείσα μάζα H₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο P1)



Σχήμα 22: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάριο P2)



Σχήμα 23: Εκλυθείσα μάζα H₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάριο P2)

9.4.2.2 Υπολογισμός της διασποράς H₂ μέσα στη μονάδα καθαρισμού και ξήρανσης

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό της διασποράς H₂ μέσα στη μονάδα καθαρισμού και ξήρανσης ήταν ακριβώς τα ίδια με αυτά των σεναρίων στη μονάδα συμπίεσης, δηλαδή έγινε μια αρχική προσομοίωση επί 1.000 s παρουσία μόνο του μηχανικού αερισμού την οποία ακολούθησε μία προσομοίωση με την έκλυση H₂ με την ίδια μεθοδολογία επίλυσης όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

9.4.2.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Το υπολογιστικό πεδίο εκτεινόταν εκτός της μονάδας κατά 2 κελιά στην κατεύθυνση x. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πλέγματος των 2 σεναρίων.

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων μονάδας καθαρισμού και ξήρανσης

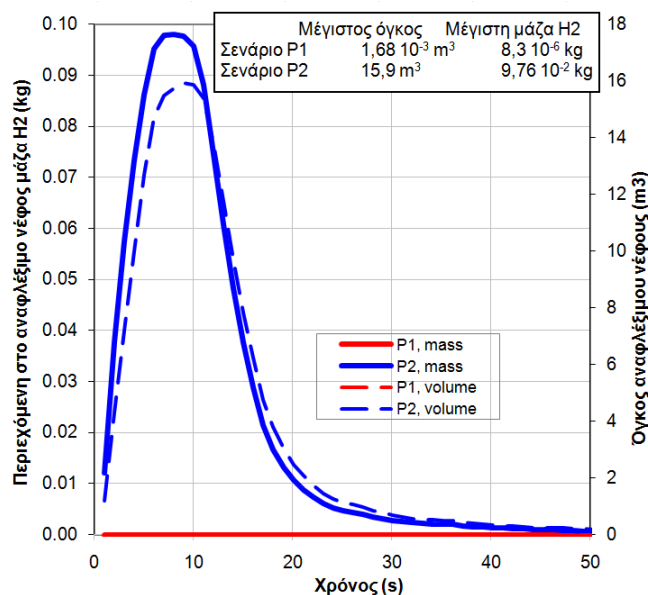
Χαρακτηριστικά πλέγματος	Σενάριο P1	Σενάριο P2
Ελάχιστο μέγεθος κελιού (m)	0,04	0,1
Πλήθος κελιών στην x, y και z	35×55×31	27×43×27

κατεύθυνση		
Συνολικός αριθμός κελιών	57.940	31.060

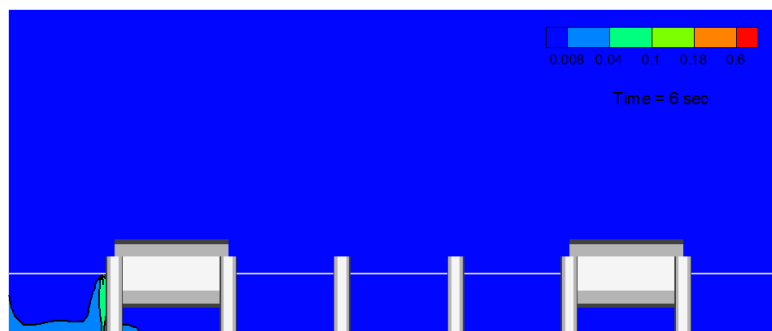
9.4.2.3 Αποτελέσματα

Ο χρόνος άφιξης μίγματος H₂/αέρα συγκέντρωσης 20% του LFL στον ανιχνευτή στο μέσον της οροφής της μονάδας ήταν 6 s για το P2 σενάριο ενώ όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τέτοια συγκέντρωση στον ανιχνευτή δεν προέκυψε για το P1 σενάριο. Στο Σχήμα 24 φαίνεται η χρονική κατανομή της περιεχόμενης στο αναφλέξιμο νέφος μάζας H₂ και ο όγκος του αναφλέξιμου νέφους των 2 σεναρίων. Για το σενάριο P1, το νέφος είχε αμελητέα διάσταση και μάζα H₂ (βλέπε Σχήμα 25) ενώ για το σενάριο P2 το νέφος εμφανίζει μέγιστο μετά από 8-9 s από την έναρξη της έκλυσης. Ο όγκος του αναφλέξιμου νέφους μειώνεται στο 1% του όγκου της μονάδας μετά από περίπου 30 s από την έναρξη της έκλυσης.

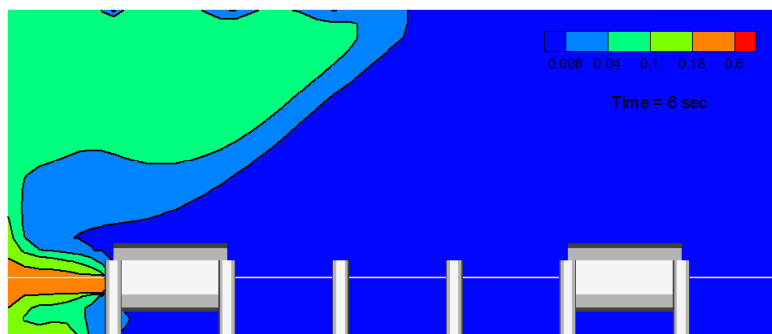
Νέφος συγκέντρωσης H₂ μεγαλύτερη από 18% εντοπίζεται κοντά στην πηγή (βλέπε Σχήμα 26) , ωστόσο όπως στο σενάριο C3 και σ' αυτήν την περίπτωση η πιθανότητα εμφάνισης τέτοιου σεναρίου είναι πολύ μικρή ($5 \cdot 10^{-7}$ event/year).



Σχήμα 24: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H₂ και όγκος αναφλέξιμου νέφους (5 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 0,8 mm (P1 σενάριο) και 12 mm (P2 σενάριο))



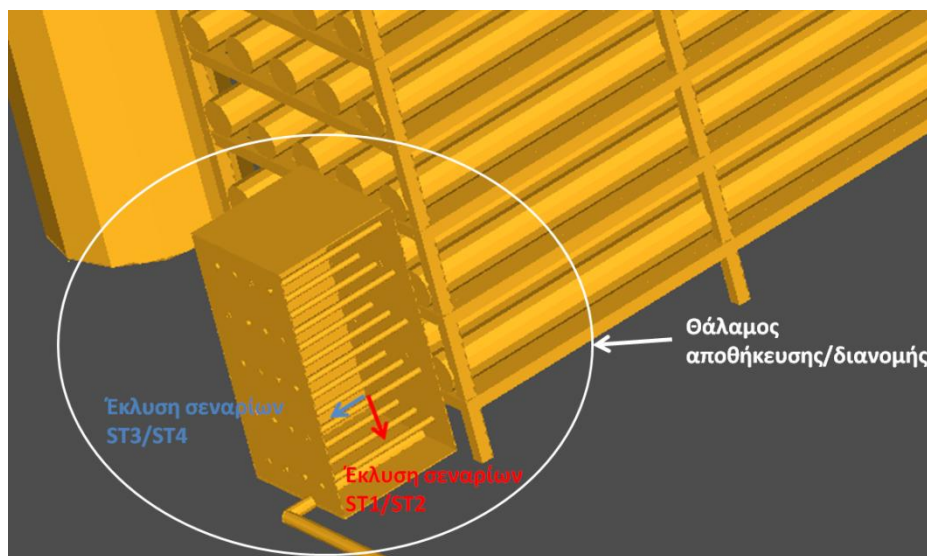
Σχήμα 25: Κατανομή συγκεντρώσεων H₂ στο επίπεδο y-z διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 6 s από την έκλυση (σενάριο P1) (Tecplot 8.0)



Σχήμα 26: Κατανομή συγκεντρώσεων H_2 στο επίπεδο $y-z$ διερχόμενο από το σημείο έκλυσης κατά την x κατεύθυνση σε χρόνο 6 s από την έκλυση (σενάριο P2) (Tecplot 8.0)

9.4.3 Σενάρια στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής

Εξετάστηκαν 4 σενάρια στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής. Τα 2 πρώτα (σενάρια ST1 και ST2) αφορούσαν μικρής έντασης έκλυση σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου 1,5 m/s και 5 m/s αντίστοιχα. Τα άλλα 2 σενάρια αφορούσαν ρήξη σωλήνα (ST3 και ST4) στις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες (άνεμος 1,5 m/s και 5 m/s). Στο Σχήμα 27 φαίνεται ο θάλαμος αποθήκευσης/διανομής καθώς επίσης και η θέση και κατεύθυνση των εκλύσεων.

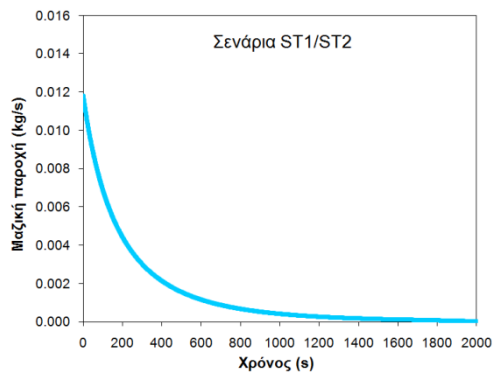


Σχήμα 27: Θάλαμος αποθήκευσης/ διανομής (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)

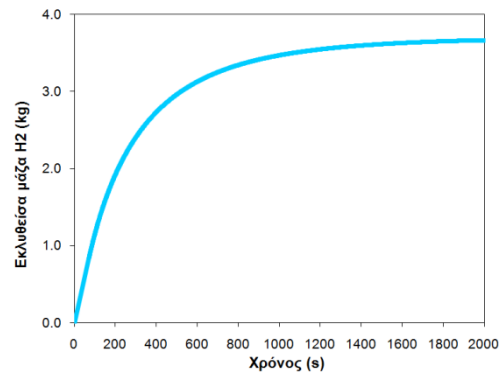
9.4.3.1 Υπολογισμός της έκλυσης H_2

Με βάση την περιγραφή των σεναρίων (Sciavetti και συν., 2008) θεωρήθηκε ότι το H_2 εκλύεται υπό πίεση 450 bar και θερμοκρασία 293 K ενώ η διάμετρος έκλυσης ήταν 0,8 mm και 8 mm για τα σενάρια ST1/ST2 και ST3/ST4 αντίστοιχα. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 28 έως Σχήμα 31) φαίνεται η χρονική μεταβολή της μαζικής παροχής και της εκλυόμενης μάζας H_2 των 4 σεναρίων. Οι εκλύσεις διήρκησαν 2.000 s και 20 s με αρχική μαζική παροχή 0,012 kg/s και 1,18 kg/s αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό της φαινόμενης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Birch (1984). Η ταχύτητα της έκλυσης στην φαινόμενη επιφάνεια θεωρήθηκε ηχητική (1300 m/s),

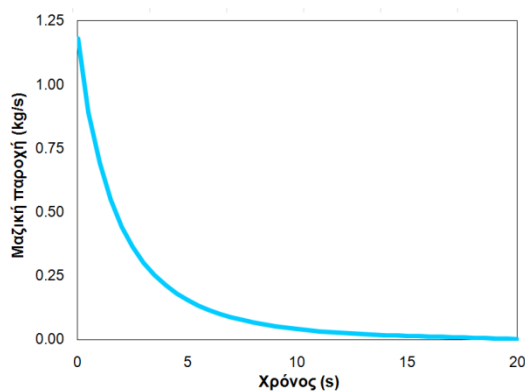
σταθερή και σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία (101325 Pa και 293 K αντίστοιχα). Η αρχική διάμετρος της φαινόμενης επιφάνειας ήταν 0,0014 m, και 0,02 m για τα σενάρια ST1/ST2 και ST3/ST4 αντίστοιχα.



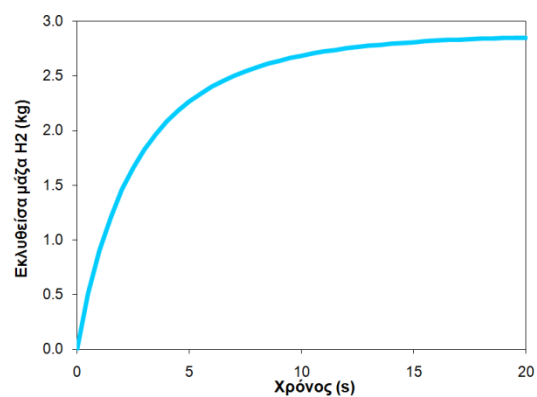
Σχήμα 28: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάρια ST1/ST2)



Σχήμα 29: Εκλυθείσα μάζα H₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάρια ST1/ST2)



Σχήμα 30: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάρια ST3/ST4)



Σχήμα 31: Εκλυθείσα μάζα H₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάρια ST3/ST4)

Για τα σενάρια ST1 και ST2 θεωρήθηκε ότι απαιτούνται 70 s από την έναρξη της έκλυσης για τον χειριστή να ακούσει την ηχητική έκλυση και να αντιδράσει ενεργοποιώντας χειροκίνητα το σύστημα εκτάκτου ανάγκης. Σ' αυτήν την περίπτωση λοιπόν η έκλυση θεωρήθηκε τελικά σταθερή για τα πρώτα 70 s και μετά ακολούθησε την χρονική κατανομή όπως φαίνεται στο Σχήμα 28. Για τα σενάρια ST3 και ST4 η πτώση πίεσης ήταν ικανή να ενεργοποιήσει το σύστημα εκτάκτου ανάγκης μετά από 5 s από την έναρξη της έκλυσης.

9.4.3.2 Υπολογισμός της διασποράς H₂ στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής και στον περιβάλλοντα εξωτερικό χώρο

Ο υπολογισμός της έκλυσης του H₂ στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής και η μετέπειτα διασπορά του στον περιβάλλοντα εξωτερικό χώρο έγινε σε 3 βήματα. Στο πρώτο βήμα υπολογίστηκε η μονοδιάστατη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου και της τύρβης καθ' ύψος σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Η κατανομή ήταν τέτοια ώστε σε απόσταση 10 m από το έδαφος η τιμή της ταχύτητας του ανέμου να είναι

είτε 1,5 m/s είτε 5 m/s κατά περίπτωση. Στο δεύτερο βήμα, υπολογίστηκε το τρισδιάστατο πεδίο ροής στο σταθμό BBC χρησιμοποιώντας τις υπολογισθείσες μονοδιάστατες κατανομές του πρώτου βήματος. Οι κατανομές της ταχύτητας και της τύρβης του πρώτου σταδίου επιβλήθηκαν σε όλο το τρισδιάστατο υπολογιστικό χωρίο το οποίο περιελάμβανε τη γεωμετρία του σταθμού καθώς επίσης και των γύρω κτιρίων. Ακόμη, έγινε αρχικοποίηση των οριακών συνθηκών θέτοντας στο επίπεδο επιβολής των συνθηκών ανέμου y-z (βλέπε Σχήμα 32) τις ίδιες κατανομές ταχύτητας και τύρβης του 1^{ου} σταδίου ως οριακές συνθήκες ενώ στο άλλο επίπεδο y-z (έξοδος) η πίεση διατηρήθηκε σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική και κατά συνέπεια η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας σε αυτό το επίπεδο υπολογίστηκε από την εξίσωση μάζας. Για τις υπόλοιπες μεταβλητές επιβλήθηκε η συνθήκη απουσίας ροής διάχυσης (no diffusion) και δεδομένη τιμή για κάθε μια από τις μεταβλητές. Στα παράπλευρα επίπεδα x-z θεωρήθηκε ότι η παράγωγός τους είναι μηδέν στην περίπτωση που το ρευστό εξέρχεται του υπολογιστικού χωρίου και επιπλέον έλαβαν τιμή ίση με αυτήν τη χρονική στιγμή 0 στην περίπτωση που το ρευστό εισέρχεται. Τέλος, στο τρίτο βήμα υπολογίστηκε η διασπορά H₂ χρησιμοποιώντας ως αρχικές συνθήκες τη λύση του 2^{ου} βήματος και διατηρώντας παράλληλα τις ίδιες οριακές συνθήκες στο επίπεδο επιβολής ανέμου y-z και στα λοιπά επίπεδα όπως πορηγουμένως. Στο βήμα αυτό η γεωμετρία περιλαμβάνει μέρος του σταθμού BBC που θεωρήθηκε ότι θα περιλάβει το νέφος H₂/αέρα προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος.

Για τον υπολογισμό του πεδίου ροής και των 4 σεναρίων, επιλύθηκαν αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου οι μη μόνιμες, τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις (για συμπιεστό ρευστό) διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνεχείας), ορμής μίγματος (για τις 3 συνιστώσες ταχύτητας) και κλάσματος μάζας H₂. Η μοντελοποίηση της τύρβης έγινε με το κλασσικό μοντέλο k-ε των Launder and Spalding (Launder and Spalding, 1974) λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίδραση της άνωσης.

Το σχήμα ανάντη διαφορών 1^{ης} τάξης χρησιμοποιήθηκε για τη χωρική διακριτοποίηση των όρων μεταφοράς. Για τη χρονική διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε η 1^{ης} τάξεως πλήρως πεπλεγμένη (fully implicit 1st order) μέθοδος. Τέλος χρησιμοποιήθηκε μία αυτόματη διαδικασία μεταβολής του χρονικού βήματος (με κριτήριο ευστάθειας λύσεως CFL=2 για το 3^ο βήμα (έκλυση και διασπορά H₂) με μέγιστο χρονικό βήμα 10⁻¹ s ενώ το αρχικό χρονικό βήμα ήταν 10⁻⁴ s.

9.4.3.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα

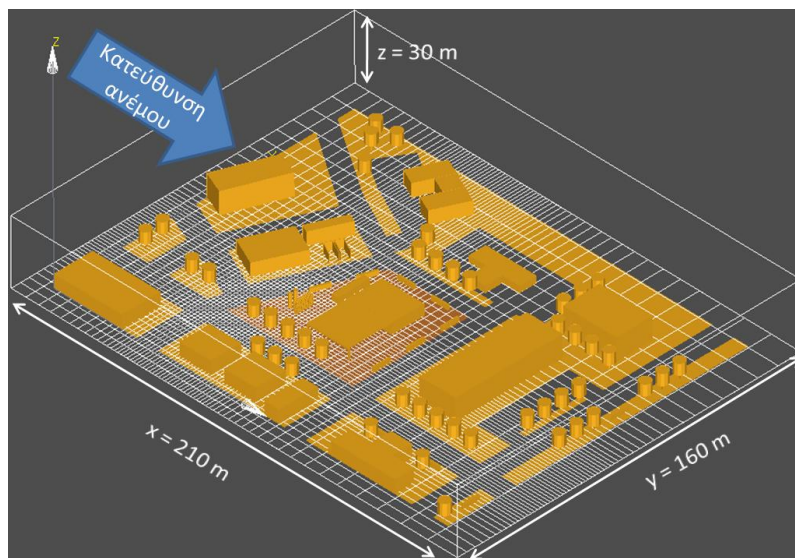
Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πλέγματος του 2^{ου} βήματος (κοινό για όλα τα σενάρια) καθώς κι αυτού για τη διασπορά H₂ των σεναρίων ST1/ST2 και ST3/ST4.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων στο θάλαμο αποθήκευσης/ διανομής

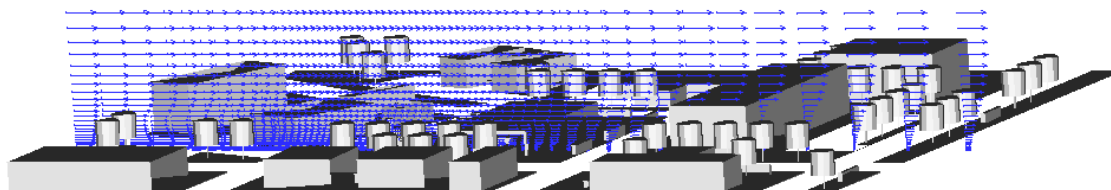
Χαρακτηριστικά πλέγματος	2 ^ο βήμα	Σενάριο ST1/ST2	Σενάριο ST3/ST4
Ελάχιστο μέγεθος κελιού (m)	1,48 στην x και y κατεύθυνση και 0,2 στην z	0,2	0,2
Πλήθος κελιών στην	62×57×26	54×49×32	54×48×32

x, y και z κατεύθυνση			
Συνολικός αριθμός κελιών	87.900	83.990	82.420

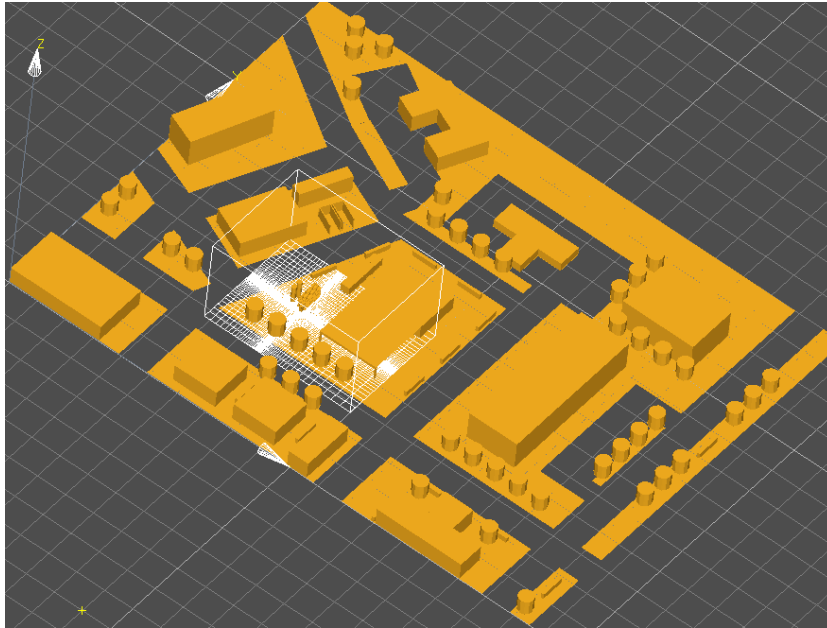
Στο Σχήμα 32 παρουσιάζεται το υπολογιστικό χωρίο και το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στο 2^ο βήμα (κοινό για όλα τα σενάρια). Στο σχήμα επισημαίνεται επίσης η κατεύθυνση του ανέμου. Το χωρίο είχε διαστάσεις $x = 210 \text{ m}$, $y = 160 \text{ m}$ και $z = 30 \text{ m}$. Στο Σχήμα 33 φαίνεται το πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το θάλαμο αποθήκευσης/διανομής. Τέλος, στο Σχήμα 34 παρουσιάζεται το χωρίο και πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στο 3^ο βήμα (έκλυση H_2 στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής και διασπορά στον περιβάλλοντα χώρο) των σεναρίων ST1/ST2. Το χωρίο είχε διαστάσεις $x = 52 \text{ m}$, $y = 40 \text{ m}$ και $z = 30 \text{ m}$. Παρόμοιων διαστάσεων χωρίο χρησιμοποιήθηκε για τα σενάρια ST3/ST4.



Σχήμα 32: Υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα 2^{ου} βήματος – επιβολή ανέμου (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)



Σχήμα 33: Πεδίο ταχυτήτων στο επίπεδο x-z διερχόμενο από το θάλαμο αποθήκευσης/διανομής – άνεμος $1,5 \text{ m/s}$ (Tecplot 8.0)

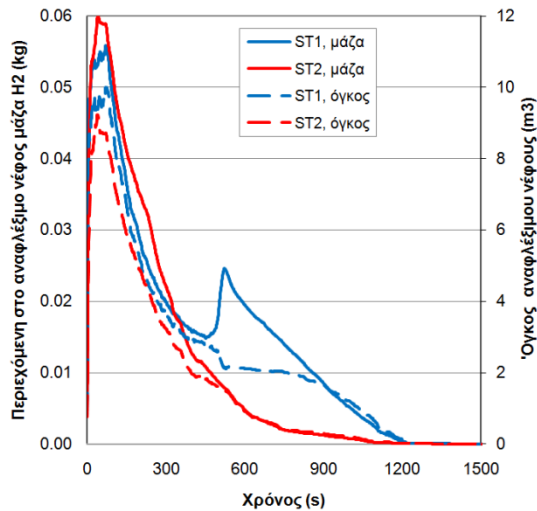


Σχήμα 34: Υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα σεναρίων ST1/ST2 του 3^{ου} βήματος – έκλυση και διασπορά H₂ (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)

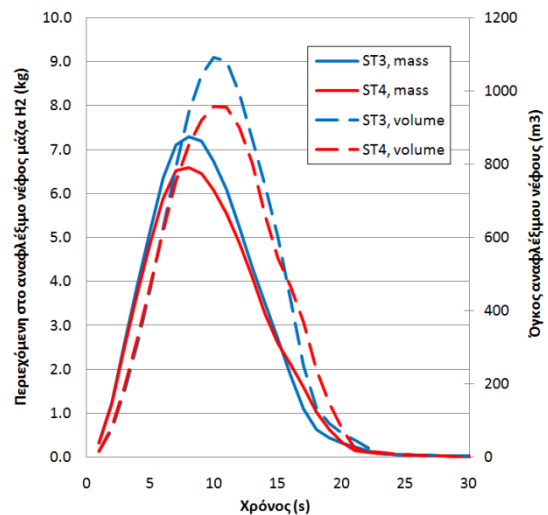
9.4.3.3 Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 35 παρουσιάζονται η περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H₂ και ο όγκος του νέφους για τα σενάρια ST1 και ST2. Υπενθυμίζεται ότι τα 2 σενάρια διαφέρουν στην ένταση του ανέμου (ST1: 1,5 m/s άνεμος και ST2: 5 m/s άνεμος). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 35, η διαφορά στην ένταση του ανέμου δεν επηρέασε σημαντικά τα χαρακτηριστικά του αναφλέξιμου νέφους (όγκος και περιεχόμενη μάζα H₂). Για το σενάριο ST1, το μέγιστο του αναφλέξιμου νέφους εμφανίζεται σε 75 s μετά από την έναρξη της έκλυσης και μηδενίζεται στα 1.390 s ενώ για το σενάριο ST2, το νέφος παρουσίασε μέγιστο στα 61 s και μηδενίστηκε περίπου στα 1.100 s. Ωστόσο οι υπολογισμοί έδειξαν ότι νέφος συγκέντρωσης μεταξύ 20% του LFL (0,008%) και UFL είχε μέγιστο όγκο 145 m³ (στα 67 s) για το σενάριο ST1 και 88 m³ (στα 36 s) για το ST2. Επίσης, οι υπολογισμοί έδειξαν ότι νέφος συγκέντρωσης 18% H₂ είχε μικρή έκταση και βρισκόταν περιορισμένο μέσα στο θάλαμο καθ' όλη τη διάρκεια της έκλυσης και για τα 2 σενάρια.

Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

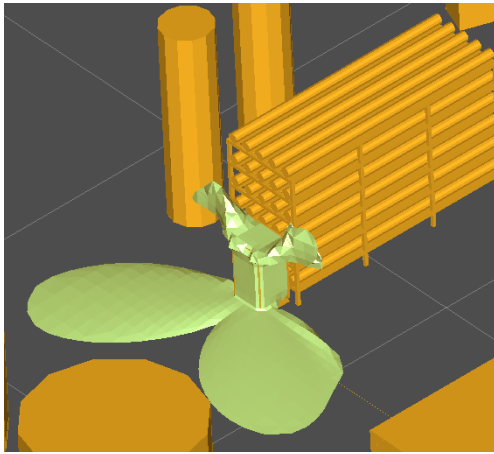


Σχήμα 35: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H_2 και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 0,8 mm και άνεμος 1,5 m/s (ST1 σενάριο) ή 5 m/s (ST2 σενάριο)

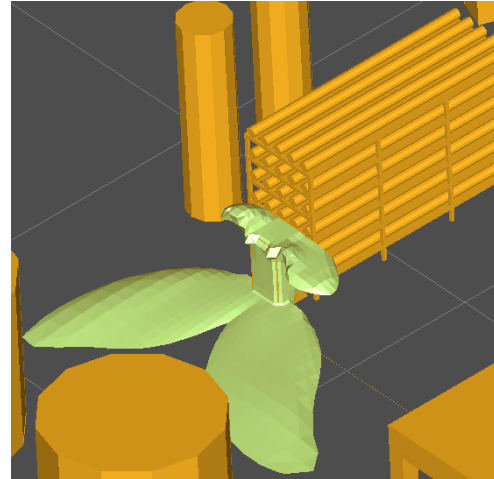


Σχήμα 36: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H_2 και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 8 mm και άνεμος 1,5 m/s (ST3 σενάριο) ή 5 m/s (ST4 σενάριο)

Στο Σχήμα 36 παρουσιάζονται η περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H_2 και ο όγκος του νέφους για τα σενάρια ST3 και ST4. Ομοίως με τα σενάρια ST1 και ST2, τα 2 σενάρια ST3 και ST4 διαφέρουν στην ένταση του ανέμου (ST3: 1,5 m/s άνεμος και ST4: 5 m/s άνεμος). Και σ' αυτήν την περίπτωση, η διαφορά στην ένταση του ανέμου δεν επηρέασε σημαντικά τα χαρακτηριστικά του αναφλέξιμου νέφους. Για το σενάριο ST3, το μέγιστο του αναφλέξιμου νέφους εμφανίζεται σε 8-10 s μετά από την έναρξη της έκλυσης και μηδενίζεται στα 43 s ενώ για το σενάριο ST4, το νέφος παρουσίασε μέγιστο στα 8-9 s και μηδενίστηκε στα 42 s περίπου. Αντιθέτως, οι υπολογισμοί έδειξαν ότι νέφος συγκέντρωσης μεταξύ 20% του LFL και UFL είχε μέγιστο όγκο 5.900 m³ και περιεχόμενη μάζα H_2 9,3 kg (στα 21 s) για το σενάριο ST3 και 3.760 m³ με 8,6 kg H_2 (στα 36 s) για το ST4. Επίσης, οι υπολογισμοί έδειξαν ότι το νέφος συγκέντρωσης 18% H_2 είχε μεγαλύτερη έκταση από αυτήν των 2 προηγούμενων σεναρίων. Το νέφος διέφυγε τα όρια του θαλάμου και διεσπάρη στον περιβάλλοντα χώρο σε απόσταση περίπου 5 m από το θάλαμο (βλέπε Σχήμα 37 και Σχήμα 38).



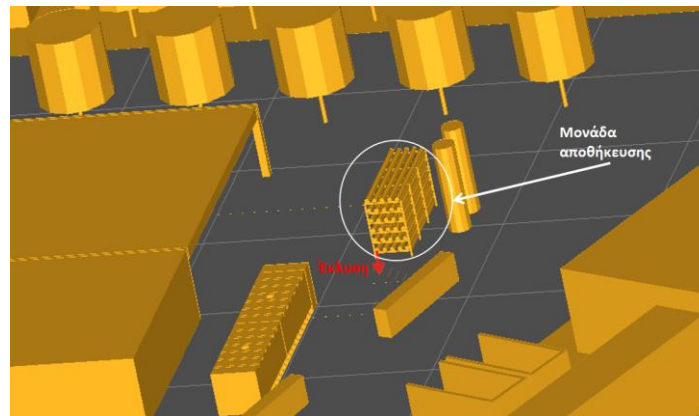
Σχήμα 37: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H_2 18% στα 10 s μετά την έναρξη της έκλυσης (ST3 σενάριο)



Σχήμα 38: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H_2 18% στα 10 s μετά την έναρξη της έκλυσης (ST4 σενάριο)

9.4.4 Σενάρια στη μονάδα αποθήκευσης

Η μονάδα αποθήκευσης βρισκόταν στον εξωτερικό χώρο και αποτελείτο από 6 συστοιχίες αποθήκευσης με 5 δοχεία αποθήκευσης η κάθε μια. Τα 2 πρώτα σενάρια (σενάρια S1 και S2) αφορούσαν μεγάλης έκτασης έκλυση από μια από τις έξι συστοιχίες σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου 1,5 m/s και 5 m/s αντίστοιχα. Τα άλλα 2 σενάρια (σενάρια S3 και S4) αφορούσαν μεγάλης έκτασης έκλυση από ένα δοχείο μιας συστοιχίας και πάλι σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου είτε 1,5 m/s είτε 5 m/s. Στο Σχήμα 39 φαίνεται η μονάδα αποθήκευσης καθώς και η κατεύθυνση και θέση της έκλυσης των 4 σεναρίων.

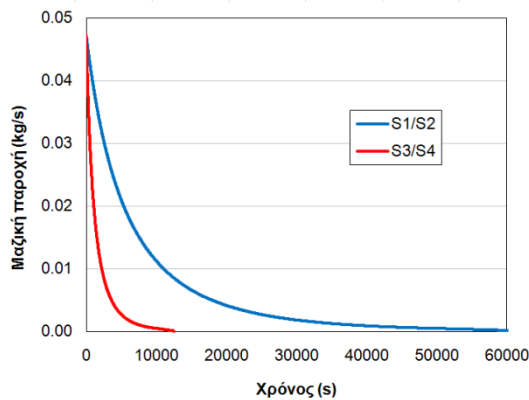


Σχήμα 39: Μονάδα αποθήκευσης (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)

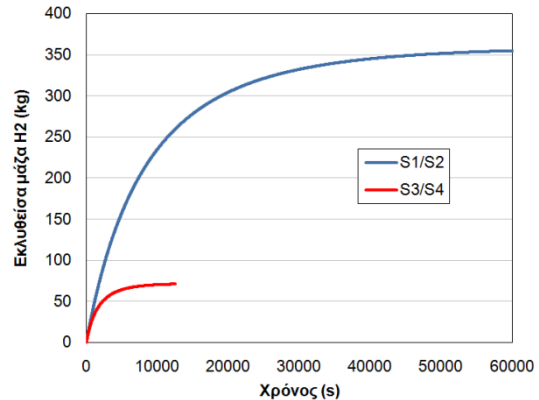
9.4.4.1 Υπολογισμός της έκλυσης H_2

Με βάση την περιγραφή των σεναρίων (Sciavetti και συν., 2008) θεωρήθηκε ότι το H_2 εκλύεται υπό πίεση 450 bar και θερμοκρασία 293 K ενώ η διάμετρος έκλυσης ήταν 1,6 mm και για τα 4 σενάρια. Ο συνολικός όγκος του εκλυόμενου H_2 ήταν 12,5 m³

για τα σενάρια S1 και S2 και 2,5 m³ για τα σενάρια S3 και S4. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 40 και Σχήμα 41) φαίνεται η χρονική μεταβολή της μαζικής παροχής και της εκλυόμενης μάζας H₂ και των 4 σεναρίων. Οι εκλύσεις διήρκησαν 62.000 s (σενάρια S1/S2) και 12.500 s (σενάρια S3/S4) με κοινή αρχική μαζική παροχή 0,047 kg/s και για τα 4 σενάρια. Για τον υπολογισμό της φαινόμενης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Birch (1984). Η ταχύτητα της έκλυσης στην φαινόμενη επιφάνεια θεωρήθηκε ηχητική (1300 m/s), σταθερή και σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία (101325 Pa και 293 K αντίστοιχα). Η αρχική διάμετρος της φαινόμενης επιφάνειας ήταν 0,026 m και για τα 4 σενάρια.



Σχήμα 40: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάρια S1/S2 και S3/S4)



Σχήμα 41: Εκλυθείσα μάζα H₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάρια S1/S2 και S3/S4)

9.4.4.2 Υπολογισμός της διασποράς H₂ στη μονάδα αποθήκευσης

Για τον υπολογισμό της διασποράς H₂ στη μονάδα αποθήκευσης ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα με αυτά των σεναρίων στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής με τα ίδια υπολογιστικά χαρακτηριστικά.

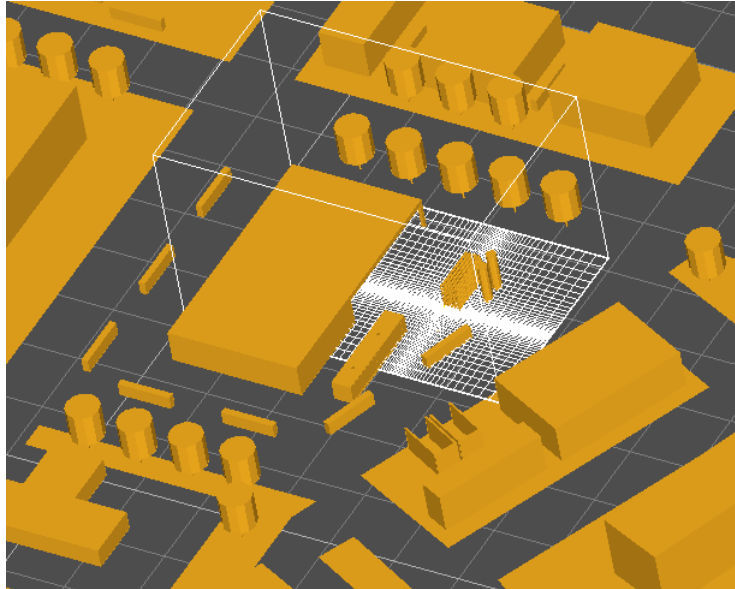
9.4.4.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της διασποράς του H₂. Ως αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκε το ίδιο τρισδιάστατο πεδίο ροής στο σταθμό BBC των προηγούμενων σεναρίων (2^ο βήμα).

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων στη μονάδα αποθήκευσης

Χαρακτηριστικά πλέγματος	Σενάριο S1/S2	Σενάριο S3/S4
Ελάχιστο μέγεθος κελιού (m)	0,2	0,2
Πλήθος κελιών στην x, y και z κατεύθυνση	53×45×32	52×45×34
Συνολικός αριθμός κελιών	80.340	78.730

Στο Σχήμα 42 παρουσιάζεται το υπολογιστικό χωρίο και το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της διασποράς H₂ των σεναρίων S1 και S2. Το χωρίο είχε διαστάσεις $x = 50$ m, $y = 30$ m και $z = 30$ m. Παρόμοιων διαστάσεων χωρίο χρησιμοποιήθηκε και για τα σεσάρια S3/S4.



Σχήμα 42: Υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα σεναρίων S1/S2 (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)

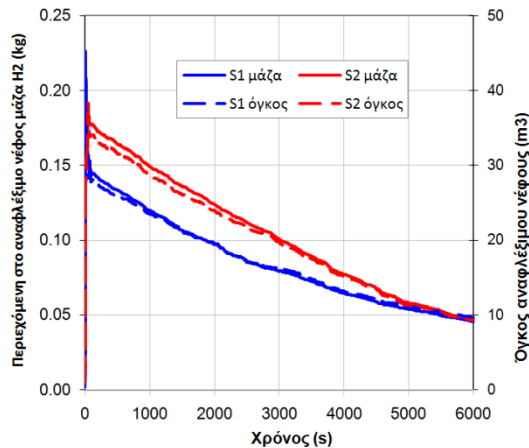
9.4.4.3 Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 43 παρουσιάζονται η περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H₂ και ο όγκος του νέφους για τα σεσάρια S1 και S2. Τα 2 σεσάρια διαφέρουν στην ένταση του ανέμου (S1: 1,5 m/s άνεμος και S2: 5 m/s άνεμος). Για το σεσάριο S1, το μέγιστο του αναφλέξιμου νέφους εμφανίζεται στα 10 s μετά από την έναρξη της έκλυσης (0,22 kg H₂ σε όγκο 45 m³) και μειώνεται κατά 75% στα 4.850 s ενώ για το σεσάριο S2, το νέφος παρουσίασε μέγιστο στα 21 s (0,16 kg H₂ σε όγκο 31 m³) και μειώνεται κατά 75% στα 6.625 s. Σ' αυτήν την περίπτωση ο ισχυρότερος άνεμος προκάλεσε αύξηση του αναφλέξιμου νέφους κατά περίπου 18% επί σημαντικό χρονικό διάστημα (περίπου 2.000 s). Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι νέφος συγκέντρωσης μεταξύ 20% του LFL (0,008%) και UFL είχε μέγιστο όγκο 903 m³ (στα 85 s) για το σεσάριο S1 και 397 m³ (στα 53 s) για το S2 ενώ τα νέφη μειώθηκαν κατά 75% στα 6.450 s και 6.650 s αντίστοιχα. Εν αντιθέσει με το αναφλέξιμο νέφος, στην περίπτωση των νεφών μεταξύ 20%LFL και UFL ισχυρότερος άνεμος είχε ευνοϊκή επίδραση.

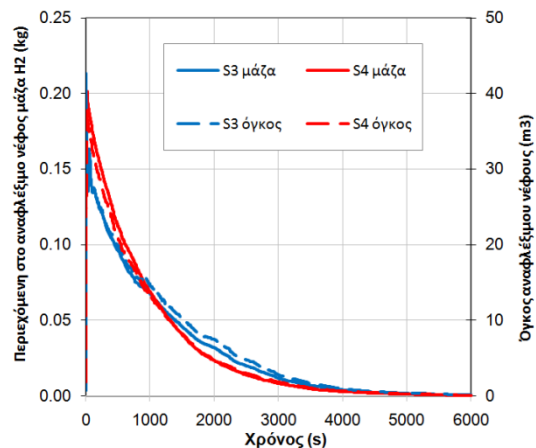
Στο Σχήμα 44 παρουσιάζονται η περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H₂ και ο όγκος του νέφους για τα σεσάρια S3 και S4. Τα 2 σεσάρια διαφέρουν στην ένταση του ανέμου (S3: 1,5 m/s άνεμος και S4: 5 m/s άνεμος) ενώ σε σχέση με τα 2 προηγούμενα, ο εκλυόμενος όγκος H₂ είναι αυτήν την φορά 2,5 m³ αντί 12,5 m³. Τα μέγιστα των αναφλέξιμων νεφών είναι παρόμοια με αυτά των σεναρίων S1 και S2 κατ' αντιστοιχία εφόσον οι αρχικές συνθήκες έκλυσης ήταν οι ίδιες. Το νέφος του σεναρίου S3 μειώθηκε κατά 75% στα 1.390 s ενώ αυτό του S4 στα 1.320 s. Όπως φαίνεται από το σχήμα, τα νέφη είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά. Σε όλες τις

Κεφάλαιο 9: Μελέτη ασφάλειας σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου

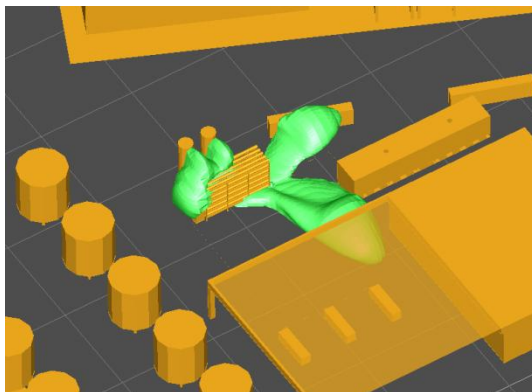
περιπτώσεις το νέφος συγκέντρωσης H_2 18% είχε πολύ μικρή έκταση και βρισκόταν πολύ κοντά στην πηγή έκλυσης. Στο Σχήμα 45 και Σχήμα 46 απεικονίζεται το νέφος συγκέντρωσης 20% LFL στα 14 s μετά την έναρξη της έκλυσης για τα σενάρια S1 και S2. Όπως φαίνεται από τα σχήματα, δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές αλλά το μεν νέφος του S1 έχει λίγο μεγαλύτερη έκταση καθ' ύψος ενώ αυτό του S2 οριζοντίως. Τα 2 νέφη προσεγγίζουν την περιοχή διάθεσης H_2 όπου βρίσκονται οι 3 διανομείς.



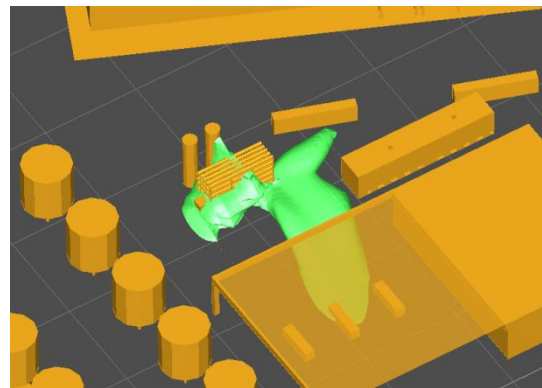
Σχήμα 43: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H_2 και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 1,6 mm, 12,5 m³ H_2 και άνεμος 1,5 m/s (S1 σενάριο) ή 5 m/s (S2 σενάριο))



Σχήμα 44: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H_2 και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 1,6 mm, 2,5 m³ H_2 και άνεμος 1,5 m/s (S3 σενάριο) ή 5 m/s (S4 σενάριο))



Σχήμα 45: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H_2 0,8% (20% του LFL) στα 14 s μετά την έναρξη της έκλυσης (S1 σενάριο)

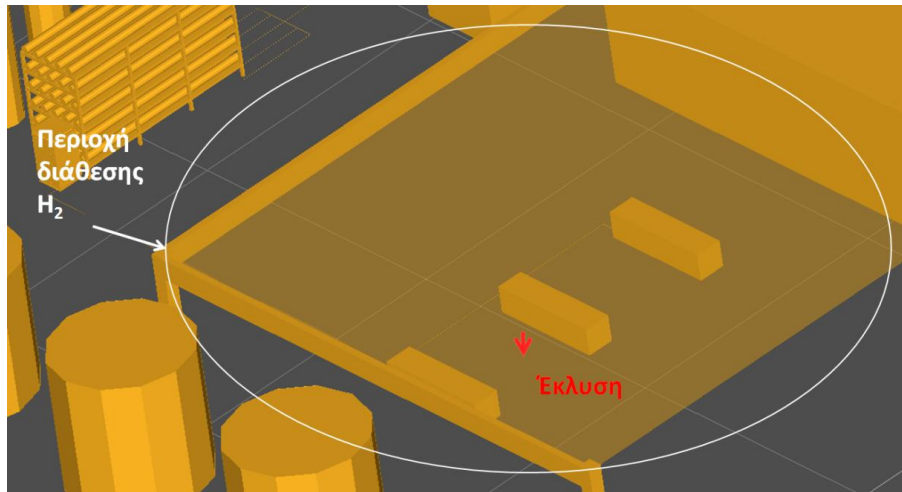


Σχήμα 46: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H_2 0,8% (20% του LFL) στα 14 s μετά την έναρξη της έκλυσης (S2 σενάριο)

9.4.5 Σενάρια στην περιοχή διάθεσης υδρογόνου

Η μονάδα διάθεσης H_2 περιελάμβανε τους 3 διανομείς οι οποίοι βρίσκονταν κάτω από μια προστατευτική στέγη. Μελετήθηκαν 2 σενάρια έκλυσης H_2 από το σωλήνα

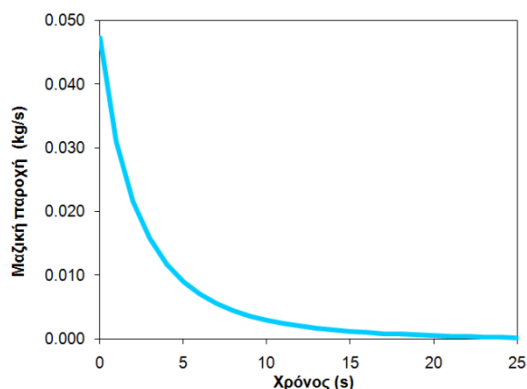
ανεφοδιασμού (σενάρια RF1 και RF2) με τα ίδια χαρακτηριστικά έκλυσης αλλά σε περιβάλλον με ταχύτητα ανέμου είτε 1,5 m/s είτε 5 m/s αντίστοιχα. Στο Σχήμα 47 φαίνεται η περιοχή διάθεσης H₂ καθώς και η κατεύθυνση και θέση της έκλυσης των 2 σεναρίων.



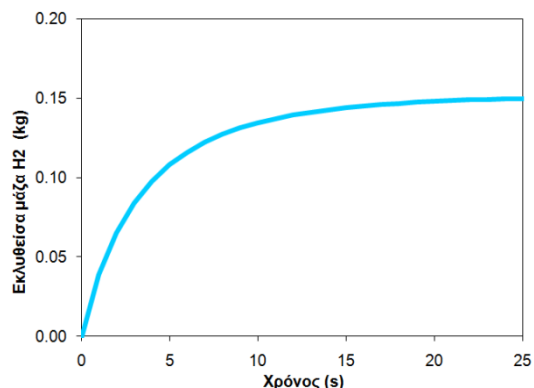
Σχήμα 47: Περιοχή διάθεσης H₂ (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)

9.4.5.1 Υπολογισμός της έκλυσης H₂

Με βάση την περιγραφή των σεναρίων (Sciavetti και συν., 2008) θεωρήθηκε ότι το H₂ εκλύεται υπό πίεση 450 bar και θερμοκρασία 293 K ενώ η διάμετρος έκλυσης ήταν 1,6 mm και για τα 2 σενάρια (RF1 και RF2). Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 48 και Σχήμα 49) φαίνεται η χρονική μεταβολή της μαζικής παροχής και της εκλυόμενης μάζας H₂ των 2 σεναρίων. Η έκλυση διήρκησε 25 s με αρχική μαζική παροχή 0,047 kg/s. Για τον υπολογισμό της φαινόμενης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Birch (1984). Η ταχύτητα της έκλυσης στη φαινόμενη επιφάνεια θεωρήθηκε ηχητική (1300 m/s), σταθερή και σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία (101325 Pa και 293 K αντίστοιχα). Η αρχική διάμετρος της φαινόμενης επιφάνειας ήταν 0,025 m. Τέλος, θεωρήθηκε ότι ο χειριστής χρειάζεται 1 λεπτό από την έναρξη της έκλυσης για την ενεργοποίηση του συστήματος ειτάκτου ανάγκης (ESD) και ότι η γραμμή απομονώνεται μέσα σε 5 s. Τελικά λοιπόν η έκλυση των σεναρίων διήρκησε 90 s με τα πρώτα 65 s να είναι μια σταθερή έκλυση ίση με το μέγιστο της παροχής όπως υπολογίστηκε από τον κώδικα GAJET. Στον εναπομείναντα χρόνο η έκλυση ακολούθησε τη μεταβολή κατά το Σχήμα 48.



Σχήμα 48: Χρονική μεταβολή μαζικής παροχής έκλυσης (σενάρια RF1/RF2)



Σχήμα 49: Εκλυθείσα μάζα H₂ συναρτήσει του χρόνου (σενάρια RF1/RF2)

9.4.5.2 Υπολογισμός της διασποράς H₂ στη μονάδα διάθεσης

Για τον υπολογισμό της διασποράς H₂ στη μονάδα διάθεσης ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα με αυτά των σεναρίων στο θάλαμο αποθήκευσης/διανομής με τα ίδια υπολογιστικά χαρακτηριστικά.

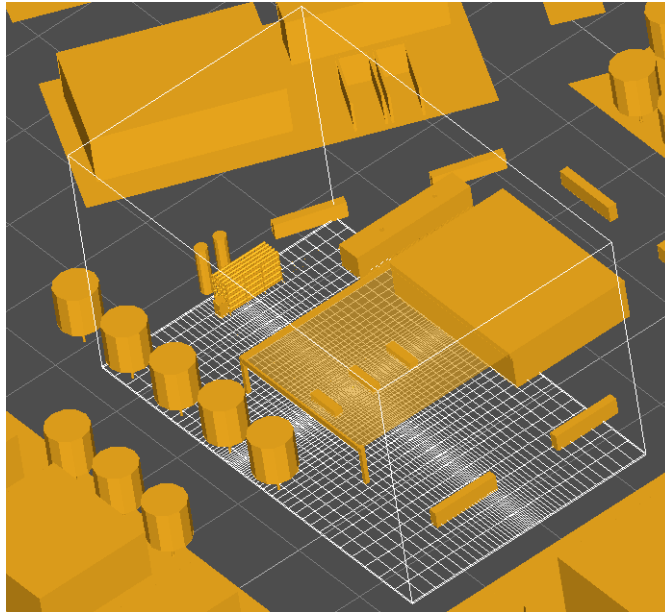
9.4.5.2.1 Υπολογιστικό πλέγμα

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9) παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της διασποράς του H₂. Ως αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκε το ίδιο τρισδιάστατο πεδίο ροής στο σταθμό BBC των προηγούμενων σεναρίων (2^ο βήμα).

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά πλέγματος σεναρίων στη μονάδα διάθεσης

Χαρακτηριστικά πλέγματος	Σενάρια RF1 και RF2
Ελάχιστο μέγεθος κελιού (m)	0,2
Πλήθος κελιών στην x, y και z κατεύθυνση	56×46×31
Συνολικός αριθμός κελιών	78.880

Στο Σχήμα 50 παρουσιάζεται το υπολογιστικό χωρίο και το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της διασποράς H₂ των σεναρίων RF1 και RF2. Το χωρίο είχε διαστάσεις x = 50 m, y = 30 m και z = 30 m.

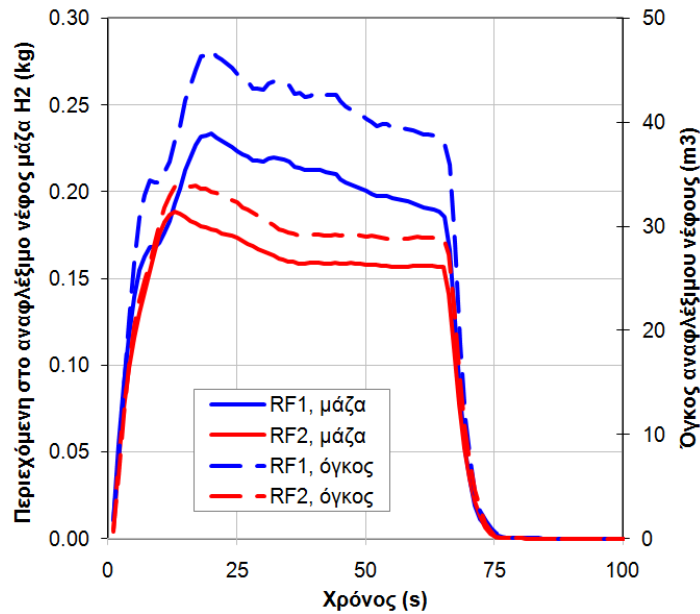


Σχήμα 50: Υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα σεναρίων RF1/RF2 (γεωμετρική προεπεξεργασία με DELTA-B και OpenCascade)

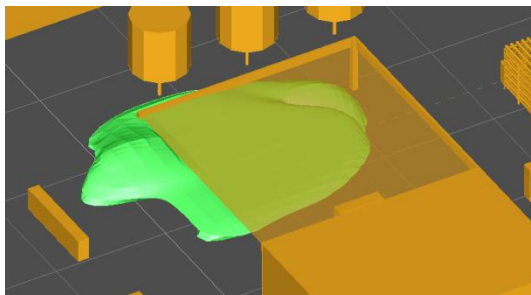
9.4.5.3 Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 51 παρουσιάζονται η περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H_2 και ο όγκος του νέφους των σεναρίων RF1 και RF2. Τα 2 σεσάρια διαφέρουν μόνο στην ένταση του ανέμου (RF1: 1,5 m/s άνεμος και RF2: 5 m/s άνεμος). Για το σεσάριο RF1, το μέγιστο του αναφλέξιμου νέφους εμφανίζεται μετά από 20 s από την έναρξη της έκλυσης (0,23 kg H_2 σε όγκο 47 m³) ενώ για το σεσάριο RF2, το νέφος παρουσίασε μέγιστο στα 14 s (0,19 kg H_2 σε όγκο 34 m³). Σ' αυτήν την περίπτωση ο ισχυρότερος άνεμος προκάλεσε μείωση του μεγίστου του αναφλέξιμου νέφους κατά περίπου 17%. Τα νέφη και στα 2 σεσάρια μηδενίστηκαν μετά από περίπου 75 s από την έναρξη της έκλυσης, δηλαδή μετά από 10 s από την απομόνωση της γραμμής τροφοδοσίας.

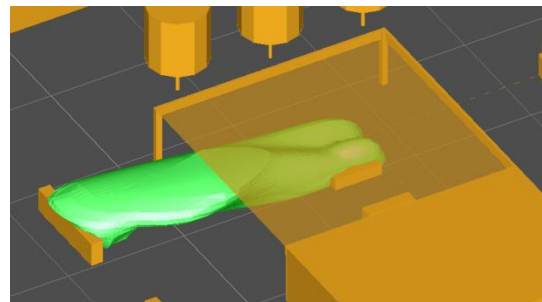
Στο Σχήμα 52 και Σχήμα 53 απεικονίζεται το νέφος συγκέντρωσης 20% LFL στα 30 s μετά την έναρξη της έκλυσης για τα 2 σεσάρια. Το νέφος του σεναρίου RF1 εκτείνεται περισσότερο κατά πλάτος και ύψος ενώ αυτό του σεναρίου RF2 εκτείνεται περισσότερο κατά μήκος λόγω του ισχυρότερου ανέμου. Στην τελευταία περίπτωση το νέφος αγγίζει τα φυσικά όρια της περιοχής διάθεσης. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι νέφος συγκέντρωσης μεταξύ 20% του LFL (0,8%) και UFL είχε μέγιστο όγκο 970 m³ (στα 50 s) για το σεσάριο RF1 και 575 m³ (στα 46 s) για το RF2 ενώ τα νέφη μηδενίστηκαν μετά από 103 s και 96 s από την έναρξη της έκλυσης αντίστοιχα. Τέλος, και για τα 2 σεσάρια, το νέφος συγκέντρωσης 18% H_2 περιορίστηκε στην περιοχή πολύ κοντά της έκλυσης.



Σχήμα 51: Περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H_2 και όγκος αναφλέξιμου νέφους (450 bar πίεση αποθήκευσης, διάμετρος έκλυσης 1,6 mm, 0,15 kg H_2 και άνεμος 1,5 m/s (RF1 σενάριο) ή 5 m/s (RF2 σενάριο)



Σχήμα 52: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H_2 0,8% στα 30 s μετά την έναρξη της έκλυσης (RF1 σενάριο)



Σχήμα 53: Νέφος ογκομετρικής συγκέντρωσης H_2 0,8% στα 30 s μετά την έναρξη της έκλυσης (RF2 σενάριο)

9.4.6 Συμπεράσματα της ποσοτικής εκτίμησης των σεναρίων με τον κώδικα ADREA-HF

9.4.6.1 Σενάριο σε κλειστό χώρο

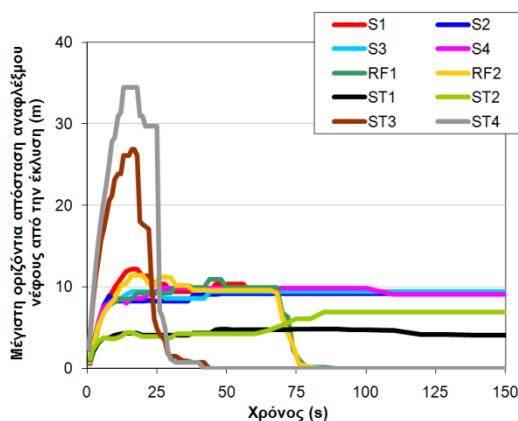
Σχετικά με τα σενάριο που αφορούσαν τη μονάδα συμπίεσης, το σενάριο με τη μεγαλύτερη επιφάνεια έκλυσης μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερες καταστροφές σε σχέση με τα άλλα 2 σενάριο αφού η συγκέντρωση H_2 βρέθηκε να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από 18% (όριο συγκέντρωσης όπου η κατάκαυση μπορεί να μεταβεί σε κατάρρηξη) σε σημαντικό ποσοστό του χώρου. Ωστόσο, η πιθανότητα εμφάνισης αυτού του σεναρίου είχε τη μικρότερη τιμή από τα υπόλοιπα σενάριο. Οι διαφορές στους χρόνους παραμονής του αναφλέξιμου νέφους μεταξύ των 3 σεναρίων αποδίδονται κυρίως στις διαφορετικές χρονικές κατανομές των εκλύσεων. Πιθανοί

τρόποι μετριασμού της έντασης και του χρόνου παραμονής του αναφλέξιμου νέφους στη μονάδα είναι: αύξηση του μηχανικού αερισμού, εκτίμηση της πιθανότητας τοποθέτησης της μονάδας συμπίεσης σε ανοιχτό χώρο, μείωση του περιεχόμενου όγκου H₂ στη μονάδα κατά το ελάχιστο βάσει των προδιαγραφών του σταθμού, χρήση ανιχνευτών H₂ (σε συνδυασμό με σύστημα εκτάκτου ανάγκης) σε σημεία πέραν της οροφής για ταχύτερη ανίχνευση πιθανής έκλυσης, τοποθέτηση μηχανισμού απομάκρυνσης του διαρρέοντος H₂ εκτός της μονάδας.

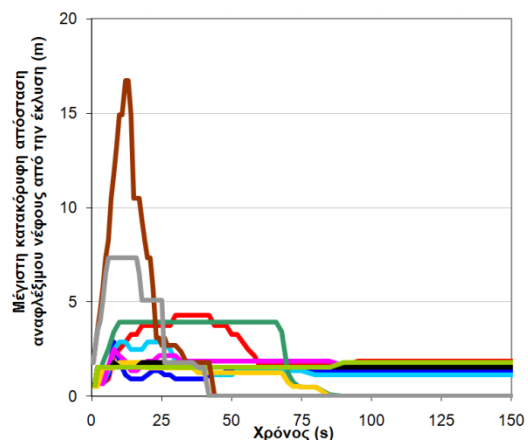
Σχετικά με τα σενάρια που αφορούσαν τη μονάδα καθαρισμού και ξήρανσης, το σενάριο με την μικρότερη επιφάνεια έκλυσης δημιούργησε αμελητέας έντασης αναφλέξιμο νέφος ενώ το νέφος του σεναρίου με τη μεγαλύτερη επιφάνεια έκλυσης είχε πολύ μικρό χρόνο παραμονής.

9.4.6.2 Σενάρια σε ανοιχτό χώρο ή σε χώρο με εμπόδια

Οι προσομοιώσεις των σεναρίων σε ανοιχτό χώρο έδειξαν ότι γενικά αύξηση της έντασης του ανέμου κατά 3 φορές περίπου δεν επηρεάζει κατ' αναλογία τα χαρακτηριστικά του αναφλέξιμου νέφους. Η περιορισμένη επίδραση της αύξησης του ανέμου στο νέφος, αποδίδεται στην παρουσία των παρακείμενων κτιρίων καθώς και των διαφόρων μονάδων του σταθμού με αποτέλεσμα η ταχύτητα του ανέμου μέσα στα όρια του σταθμού να μην είναι ισοδύναμης έντασης με την ορισθείσα (1.5 m/s και 5 m/s). Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 54 και Σχήμα 55) φαίνεται η μέγιστη οριζόντια και κάθετη απόσταση του αναφλέξιμου νέφους από την έκλυση όλων των σεναρίων ανοιχτού χώρου. Τη μεγαλύτερη ένταση παρουσιάζουν τα σενάρια ST3 και ST4. Αυτά τα σενάρια είχαν την μεγαλύτερη διάμετρο διαρροής (8 mm). Κατ' αντιστοιχία, τη μικρότερη ένταση νέφους παρουσιάζουν τα σενάρια ST1 και ST2 τα οποία είχαν και την μικρότερη διάμετρο διαρροής (0,8 mm). Τα υπόλοιπα σενάρια είχαν διάμετρο διαρροής 1,6 mm και παρουσίασαν νέφη με ενδιάμεση ένταση από αυτήν των 2 προηγούμενων περιπτώσεων. Όπως φαίνεται λοιπόν, η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο το μέγεθος του κινδύνου της παρούσας μελέτης είναι τα χαρακτηριστικά της διαρροής (διάμετρος έκλυσης).



Σχήμα 54: Μέγιστη οριζόντια απόσταση αναφλέξιμου νέφους από την έκλυση



Σχήμα 55: Μέγιστη κατακόρυφη απόσταση αναφλέξιμου νέφους από την έκλυση

9.5 Εκτίμηση κινδύνου

Τα αποτελέσματα των σεναρίων ανοιχτού χώρου με τον κώδικα ADREA-HF συνεκρίθησαν με τα αποτελέσματα του απλοποιημένου μοντέλου Effects 7.6. Η σύγκριση έγινε μόνο για τα σενάρια ανοιχτού χώρου (εκτός από αυτά του θαλάμου αποθήκευσης/διανομής γιατί η έκλυση βρισκόταν στον κλειστό χώρο του θαλάμου) επειδή το μοντέλο Effects 7.6 δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκλύσεις σε κλειστό χώρο. Επίσης δεν είναι δυνατό να εισαχθεί στο μοντέλο Effects 7.6 οποιαδήποτε πληροφορία σχετική με την παρουσία κτιρίων ή εμποδίων στο χώρο.

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 10) παρουσιάζει την περιεχόμενη στο αναφλέξιμο νέφος μάζα H₂ όπως υπολογίστηκε από τον κώδικα ADREA-HF και το μοντέλο Effects 7.6. Στον πίνακα παρουσιάζονται επίσης οι αποστάσεις υπερπίεσεων 30 kPa (100% θνησιμότητα) και 10 kPa (2,5% θνησιμότητα) η οποία υπολογίστηκε με τη μέθοδο MEM. Η μεγαλύτερη απόκλιση (η οποία είναι μια τάξης μεγέθους) εμφανίζεται στα σενάρια με τον ισχυρότερο άνεμο. Το μοντέλο Effects 7.6 λόγω της απουσίας των παρακείμενων κτιρίων και των διαφόρων εμποδίων προβλέπει εντονότερη ανάμιξη του H₂ με τον αέρα με συνέπεια η μάζα H₂ στο αναφλέξιμο νέφος να είναι κατά πολύ μικρότερη από την υπολογισθείσα με τον κώδικα ADREA-HF. Τέτοιου είδους συγκρίσεις μεταξύ κωδίκων CFD και απλοποιημένων μοντέλων όπως το Effects 7.6, που χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, πρέπει να γίνουν συστηματικά στο μέλλον ώστε να αναδειχτούν τα όρια εφαρμογής και ακριβείας των διαφόρων μεθόδων.

Πίνακας 10: Σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των κωδίκων ADREA-HF και Effects 7.6 και υπολογισμός των αντίστοιχων αποστάσεων επικινδυνότητας/ζημίας (Marangon, 2009)

Σενάριο	Κώδικας	Περιεχόμενη μάζα H ₂ στο αναφλέξιμο νέφος (Kg)	Απόσταση 1 (υπερπίεση 30 kPa)	Απόσταση 2 (υπερπίεση 10 kPa)
S3	Effects 7.6	0,52	8	20,2
	ADREA-HF	0,162	5,4	13,7
	<u>Διαφορά</u>	68%	-32%	-32%
S4	Effects 7.6	0,02	2,7	6,8
	ADREA-HF	0,2	5,8	14,7
	<u>Διαφορά</u>	-900%	115%	115%
RF1	Effects 7.6	0,6	8,4	21,2
	ADREA-HF	0,23	6,1	15,4
	<u>Διαφορά</u>	62%	-27%	-27%
RF2	Effects 7.6	0,02	2,7	6,8
	ADREA-HF	0,19	5,7	14,5
	<u>Διαφορά</u>	-850%	111%	111%

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι στο πρόγραμμα HyQRA (Koos, 2009), αναδείχθηκαν σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφόρων συμμετεχόντων από αυτές που παρουσιάζονται εδώ. Οι διαφορές εντοπίστηκαν όχι μόνο στο στάδιο ποσοτικής εκτίμησης του κινδύνου (λόγω της χρήσης CFD και απλοποιημένων μοντέλων) αλλά και σε προγενέστερα στάδια όπως: διαφορές στα κριτήρια αποδοχής του κινδύνου, διαφορές στην εκτίμηση συχνότητας αστοχίας των συστημάτων και της

πιθανότητας και του είδους της έναυσης και τέλος απουσία κοινών σεναρίων για το σταθμό ανεφοδιασμού.

9.6 Βιβλιογραφικές αναφορές

AICHE/CCPS, (1989), “Guidelines for process equipment reliability data with data tables”

Bartzis J.G., (1991), “ADREA-HF: A three-dimensional finite volume code for vapour cloud dispersion in complex terrain”, EUR Report 13580 EN.

Bechtold R. L., (1997), “Alternative Fuels Guidebook, properties, storage, dispensing and vehicle facility modifications”, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, ISBN 0-7680-0052-1, p. 157

Berrogi, G., Abbas, T., Stoop, J. and Aebi M., (1997), “Risk assessment in the Netherlands”, discussion paper, available in: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/1755/pdf/ab91.pdf>

Birch A.D., Brown D.R., Dodson M.G. and Swaffield F., (1984), “The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas”, Combustion Science and Technology, Vol. 36, pp. 249-261

Cadwallader, L.C. and Herring J.S., (1999), “Safety issues with Hydrogen as a vehicle fuel”, INEEL/EXT-99-00522, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory

Chitose, K., Ogushi, H., Kawai, K., Mizuno, Y. and Sadanori, A., (2006), “Risk Assessment Methodology for Hydrogen Refueling Station”, WHEC 16, Lyon France

Deliverable D71, NoE HySAFE, (2007), “An ignition probability model methodology for hydrogen risk analysis”, Internal Report

DNV Research & Innovation, (2008), “Main report – Survey of Hydrogen Risk Assessment methods”, Report 2005-1621, Rev. 2, διαδικτυακός τόπος: <http://ieahia.org/pdfs/Task19/Main%20Report%20-%20Survey%20of%20Hydrogen%20Risk%20Assessment%20Methods%20rev%2002.pdf>

Fuel Cells 2000, Worldwide Hydrogen Fuelling Stations, διαδικτυακός τόπος: <http://www.fuelcells.org/info/charts/h2fuelingstations.pdf>

Haugom, G. P., Holmefjord, K. O. and Skogseth, L. O., (2007), “Assessment and evaluation of 3rd party risk for planned hydrogen demonstration facility”, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

HySAFE, (2003-2009), Safety of hydrogen as an energy carrier, Network of Excellence, FP6, διαδικτυακός τόπος: <http://www.hysafe.org/>

International Energy Agency, Hydrogen Implementing Agreement, Task 19 – Hydrogen Safety, Risk Assessment Studies and Hydrocarbon Fuels, Fueling Stations, Description and Review, prepared by Tchouvelev A., Subtask A “Risk Management” Leader, with input from Ham, K.TNO, version R1

Kikukawa, S., Mitsushashi, H. and Miyake A., (2009), “Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, p. 1135-1141

Koos, H., Marangon, A., Middha, P., Versloot, N., et al., (2009), “Benchmark exercise on risk assessment methods applied to a virtual hydrogen refuelling station”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio

LaChance, J., Tchouvelev, A. and Ohi J., (2007), “Risk-informed separation distances for hydrogen refueling station”, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Launder B.E. and Spalding D.B., (1974), “The numerical computation of turbulent flows”, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, Issue 2, p. 269-289

Lees, F.P. and Mannan S., (2005), “Loss prevention in the process industries”, Vol. 2, 3rd edition, Elsevier Butterworth-Heinemann

Marangon, A., Schiavetti, M. and Carcassi M., (2009), “Quantitative risk assessment of a gaseous hydrogen refueling station – Benchmark Base Case (BBC) for HYQRA IP 3.2”, University of Pisa, HySAFE

Marangon A. and Carcassi M., (2006), “Risk assessment for gaseous hydrogen refueling station”, UNIPI, work presented at the IEA task 19 meeting in Vancouver.

Markatos, N.C., (1986), “Mathematical modelling of turbulent flows”, Applied Mathematical Modelling, Vol. 10, Issue 3, pp. 190-220

Markatos, N.C., Malin, M.R. and Cox G., (1982), “Mathematical modelling of buoyancy-induced smoke flow in enclosures”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 1, pp. 63-75 AND Correspondence, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 25, No. 11, pp. 1777-1778

Markatos, N.C. and Pericleous K.A., (1984), “Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, pp. 755-772

Middha, P. and Hansen O.R., (2009), “Using computational fluid dynamics as a tool for hydrogen safety studies”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 22, p. 295-302

Nilsen, S., Marangon, A., Middha, P., Engeboe, A., Markert, F., Ezponda E. and Chaineaux, J., (2007), “Determination of hazardous zones for a generic hydrogen station – a case study”, Proceedings of the 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain

Olav Hansen, Prankul Middha, Alessia Marangon, Marco Carcassi, Koos Ham, Nico Versloot, (2008), “Description of a Gaseous Hydrogen Refueling Station – Benchmark Base Case (BBC) for HyQRA IP 3.2”, HySAFE, διαδικτυακός τόπος: <http://www.hysafe.org/>

OpenCascade, available: <http://www.opencascade.org>

Papanikolaou, E., Venetsanos, A.G., Schiavetti, M., Marangon, A., Carcassi, M. and Markatos N., (2011), “Consequence assessment of the BBC H2 refuelling station using the ADREA-HF code”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, Issue 3, pp. 2573-2581

Pasman, J.H., (2009), “For a successful arrival of the hydrogen economy improve now the confidence level of risk assessments!”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio

Roos A.J., (1999), “Guidelines for quantitative risk assessment (The Purple Book)”, Committee for the Prevention of Disasters, CPR 18E, The Hague SDU

Sandia Report, La Chance, J., Houf, W., Middleton, B. and Fluer L., (2009), “Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards”, Sandia National Laboratories

Schiavetti, M., Marangon, A. and Carcassi M., (2008), “Scenario selection: C-building, storage cabinet, storage bank, dispensers and P-building”, Report for the internal project HyQRA, HySAFE, διαδικτυακός τόπος: <http://www.hysafe.org/>

Tecplot, version 8.0, διαδικτυακός τόπος: <http://www.tecplot.com/>

Venetsanos, A.G., Papanikolaou, E. and Bartzis, J.G., (2010), “The ADREA-HF CFD code for consequence assessment of hydrogen applications”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, p. 3908-3918

Venetsanos A.G., Huld T., Adams P., Bartzis J.G., (2003), “Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment”, J. of Hazardous Materials, Vol. A105, p. 1-25

Venetsanos A.G., Catsaros N., Wurtz J., Bartzis J.G., (1995), “The DELTA B code. A computer code for the simulation of the geometry of three-dimensional buildings. Code structure and users manual”, EUR Report 16326 EN

Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια, τα μέσα ενημέρωσης και οι κυβερνήσεις ανά τον κόσμο έχουν στρέψει την προσοχή του κοινού σε θέματα όπως η εξοικονόμηση της ενέργειας, η πρόληψη και ο έλεγχος της ρύπανσης, η προστασία του περιβάλλοντος και η ανάγκη ανάπτυξης μιας καθαρής, διαρκούς, αξιόπιστης και χαμηλού κόστους τεχνολογίας παραγωγής ενέργειας. Είναι πλέον κοινή συνείδηση ότι η εξάρτηση της ενεργειακής παροχής από τα ορυκτά καύσιμα σε συνδυασμό με τη διαρκώς αυξανόμενη ενεργειακή απαίτηση έχει ημερομηνία λήξης. Από την οικονομική σκοπιά, αυτό έχει σα συνέπεια την αύξηση της τιμής του πετρελαίου προς τον καταναλωτή. Από την πολιτική σκοπιά, οι περισσότερες βιομηχανοποιημένες χώρες είναι πλέον δέσμιες των χωρών με ασταθές πολιτικό σκηνικό. Ως αποτέλεσμα των ενεργειακών και περιβαλλοντικών προβλημάτων, θα πρέπει να μειωθεί ο ρυθμός κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων, να αυξηθεί η ενεργειακή απόδοση των σταθμών παραγωγής ενέργειας και τέλος να χρησιμοποιηθούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στον τομέα μεταφοράς και στην παραγωγή ηλεκτρισμού εν γένει.

Οι συστοιχίες κυψελών καυσίμου σε συνδυασμό με το H_2 παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό. Θεωρούνται αποδοτικοί τροφοδότες ενέργειας ενώ πολλοί υποστηρίζουν ότι δεν σχετίζονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο, με τις τρέχουσες τεχνολογίες παραγωγής H_2 (περίπου 50% από την αναμόρφωση του φυσικού αερίου και 20% από την αεριοποίηση του άνθρακα¹) ούτε μειώνεται η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα ούτε οι εκπομπές CO_2 πράγμα που σημαίνει ότι η χρήση του H_2 ως φορέα ενέργειας, εάν αξιολογηθεί στο σύνολό της, προς το παρόν δεν είναι «καθαρή» τεχνολογία. Εν αντιθέσει με τον ηλεκτρισμό, το H_2 μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης, το H_2 και ο ηλεκτρισμός έχουν την ιδιότητα να δρουν συμπληρωματικά και εναλλάξιμα μέσω της χρήσης των συστοιχιών κυψελών καυσίμου και της ηλεκτρολύσης. Ωστόσο, κάνοντας την υπόθεση ότι από το 2050 όλα τα οχήματα θα λειτουργούν με συστοιχίες κυψελών καυσίμου, η ετήσια απαίτηση σε H_2 ανέρχεται στα 112 εκατομμύρια τόνους². Πλήθος τεχνικών προβλημάτων πρέπει να λυθούν όπως η παραγωγή του, η αποθήκευσή του επί του οχήματος και η αποθήκευσή του για παραγωγή ηλεκτρισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος αποθήκευσης του H_2 επί του οχήματος παραμένει τροχοπέδη.

Το H_2 χρησιμοποιείται εδώ και τουλάχιστον 100 χρόνια σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του H_2 έχουν λοιπόν δεόντως διαπιστωθεί. Ωστόσο, οι τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διάθεσης του H_2

¹ Hordeski M.F., “Alternative Fuels: The future of Hydrogen”, CRC Press, 2nd edition, 2008

² Aline Léon, “Hydrogen Technology: Mobile and portable applications”, Springer, 2008

που εφαρμόζονται στις χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες είναι πολύ δαπανηρές για την εφαρμογή τους στις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, για τον χαρακτηρισμό των κινδύνων που εγκυμονούν κατά τη χρήση του H_2 ως φορέα ενέργειας είναι απαραίτητη η μελέτη ρεαλιστικών συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας³ οι οποίες εκ των πραγμάτων είναι διαφορετικές από αυτές που επικρατούν στις χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες. Επιπλέον, για την αποδοχή του H_2 ως εναλλακτική πηγή ενέργειας, τα επίπεδα ασφάλειας πρέπει να είναι τουλάχιστον συγκρίσιμα με αυτά των συμβατικών καυσίμων.

Το H_2 δεν θεωρείται πιο επικίνδυνος φορέας ενέργειας από τα συμβατικά καύσιμα, ωστόσο συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο⁴. Οι κυριότερες ιδιότητες του H_2 που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής από σκοπιάς ασφάλειας και που το διαφοροποιούν από τα υπόλοιπα συμβατικά καύσιμα είναι: τα ευρύτερα όρια αναφλεξιμότητας, η πολύ χαμηλή ελάχιστη ενέργεια έναυσης, το μικρότερο μέγιστο ασφαλές πειραματικό κενό, η μεγαλύτερη θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας, η μεγαλύτερη ταχύτητα στρωτής καύσης, η υψηλή διαχυτότητά του και η τάση του να προσβάλλει σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις το μαλακό χάλυβα προκαλώντας εξανθράκωση και ευθραυστοποίηση. Ωστόσο το H_2 έχει υψηλότερη θερμοκρασία αυτανάφλεξης ενώ η βασικότερη ιδιότητά του που λειτουργεί ευνοϊκά σε θέματα ασφάλειας σε ανοιχτούς χώρους ή χώρους μερικώς κλειστούς είναι η χαμηλή πυκνότητά του. Το H_2 είναι πολύ πιο ελαφρύ από τον αέρα με συνέπεια να διαφεύγει ταχέως προς τα πάνω πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει με τους βαρύτερους υδρογονάνθρακες.

Στην περίπτωση ατυχημάτων των τεχνολογιών και εγκαταστάσεων υποδομής H_2 η αλληλουχία των φυσικών φαινομένων είναι η έκλυση, η διασπορά, η έναυση και τέλος η φωτιά ή έκρηξη. Η αρχική φάση προκύπτει από τη διαρροή του H_2 από το δοχείο αποθήκευσης ή από κάποιο άλλο στοιχείο του συστήματος. Ακολουθεί η διασπορά, κατά την οποία το H_2 αναμιγνύεται με τον περιβάλλοντα αέρα. Το H_2 εν συνεχεία είτε θα αυτοαναφλεγεί είτε θα αναφλεγεί παρουσία κάποιας πηγής έναυσης. Προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος ανάφλεξης και καύσης, είναι απαραίτητο να μελετηθεί πρώτα η χωρική και χρονική κατανομή του H_2 στον περιβάλλοντα χώρο. Ανάλογα με την γεωμετρία του χώρου, την παροχή έκλυσης, το συνολικό εκλυθέν H_2 και την προϋπάρχουσα κινητική κατάσταση του χώρου, το H_2 μπορεί να δημιουργήσει αμελητέο ή σημαντικό αναφλέξιμο νέφος ή ακόμα και αναφλέξιμο/εκρηκτικό νέφος.

Σε πολλές περιπτώσεις των εφαρμογών τεχνολογιών H_2 ως φορέα ενέργειας, οι εγκαταστάσεις θα βρίσκονται σε κλειστούς χώρους όπως παραδείγματος χάριν στην περίπτωση αποθήκευσης H_2 σε σταθμό ανεφοδιασμού ή του χώρου υποδοχής ενεργειακής συστοιχίας σε συνδυασμό με την αποθήκευση και διανομή του H_2 . Η τοποθέτηση των συστημάτων σε κλειστούς χώρους κρίνεται συχνά σκόπιμη για λόγους ασφάλειας και απομόνωσής τους από το ευρύτερο περιβάλλον και τον τελικό αποδέκτη ή το κοινό.

³ Hoagland W., (2009), “The international energy agency hydrogen implementing agreement task on hydrogen safety”, Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio

⁴ Breitung W., (2005), “Analysis methodology for hydrogen behaviour in accident scenarios”, Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy

Η συμπεριφορά του ειλυόμενου H₂ σε κλειστούς χώρους εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες έκλυσης (παροχή, ταχύτητα έκλυσης, θερμοκρασία, θέση έκλυσης και κατεύθυνση), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου (μέγεθος και γεωμετρία, θέση και μέγεθος ανοιγμάτων αερισμού, παρουσία εμποδίων), τις ατμοσφαιρικές συνθήκες μέσα στο χώρο (θερμοκρασία, μηχανικός αερισμός) και αυτές του εξωτερικού χώρου (θερμοκρασία, παρουσία, ένταση και κατεύθυνση ανέμου).

Κάποιες πειραματικές μελέτες έκλυσης και διασποράς H₂ (ή He ως υποκατάστατο για λόγους ασφαλείας) έχουν δημοσιευτεί στο παρελθόν. Στην περίπτωση εκλύσεων σε κλειστούς χώρους, τα πειράματα περιλαμβάνουν είτε πλήρως κλειστούς χώρους είτε χώρους με ανοίγματα αερισμού, ο δε όγκος των χώρων κυμαίνεται από 1 έως 80 m³. Η παροχή έκλυσης κυμαίνεται από 0,1 NI/min έως περίπου 1.900 NI/min. Οι μετρήσεις συνήθως περιορίζονται σε μετρήσεις συγκέντρωσης H₂ μέσα στο χώρο ιδιαίτερος κοντά στην έκλυση στη δε καλύτερη περίπτωση σε κατακόρυφες ή οριζόντιες θέσεις από αυτήν και σε κάποια πειράματα κοντά στα ανοίγματα αερισμού. Όπως αναφέρεται και στο εσωτερικό πρόγραμμα InsHyde⁵ του HySafe, είναι απαραίτητη η περαιτέρω πειραματική μελέτη της έκλυσης και διασποράς H₂/He προκειμένου να εξεταστούν ευρύτερες συνθήκες όπως η θέση, ο προσανατολισμός και η ένταση της έκλυσης, ο προσανατολισμός και το πλήθος και εύρος των ανοιγμάτων αερισμού, η παρουσία εμποδίων στο χώρο και κειλιμένες οροφές αυτού, υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες (άνεμος και θερμοκρασία) οι οποίες θα πρέπει να καταγραφούν.

Από πλευράς υπολογιστικών μελετών, με τη χρήση κωδικών CFD, έχουν δημοσιευτεί κάποιες μελέτες που συνδέονται με πιθανά ατυχήματα στοιχείων υποδομής των τεχνολογιών H₂. Οι μελέτες στοχεύουν ή θα πρέπει να στοχεύουν στην περιγραφή της εξέλιξης και των αποτελεσμάτων του ατυχήματος, την ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων αποσόβησης κινδύνων, τη δημιουργία αξιόπιστης βάσης δεδομένων για τον καθορισμό Κωδικών και Προδιαγραφών ενώ θα πρέπει παράλληλα να έχουν υποστηρικτικό χαρακτήρα για την ανάπτυξη ασφαλών τεχνολογιών. Από την ανασκόπηση των υπολογιστικών μελετών της παρούσας εργασίας αναγνωρίστηκαν τα παρακάτω ζητήματα ως εκκρεμή: α) έλλειψη πειραματικών δεδομένων για την αξιολόγηση των μεθοδολογιών CFD ισχυρών τυρβωδών δεσμών, προσκρουόμενων δεσμών σε τοίχους, εκλύσεις σε πολύπλοκες γεωμετρίες και σήραγγες, β) έλεγχος αξιοπιστίας της μεθόδου αντικατάστασης της πηγής έκλυσης υπο-εκτονωμένων δεσμών από τις λεγόμενες «φαινόμενες» πηγές, γ) έλεγχος προβλέψεων του φαινομένου διαστρωμάτωσης από ασθeneίς εκλύσεις ή εκλύσεις λόγω διαπερατότητας αλλά και των μεθόδων περιγραφής της διαπερατότητας εν γένει, δ) προβλέψεις φυσικού και μηχανικού αερισμού και ε) πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες σεναρίων έκλυσης H₂ σε σταθμούς ανεφοδιασμού.

Τα φαινόμενα λοιπόν που συνδέονται με την ασφάλεια των τεχνολογιών H₂ ως φορέα ενέργειας δεν έχουν επιλυθεί ακόμη τόσο από πλευράς πληρότητας πειραματικών

⁵ Venetsanos, A.G., Adams, P., Azkarate, I.M Bengaouer, A., Brett, L. Carcassi, M.N.M Enebo, A., Gallego, E., Gavrikov, A.I., Hansen, O.R., Hawksworth, S., Jordan, T., Kessler, A., Kumar, S., Molkov, V., Nilsen, S., Reinecke, E., Stöcklin, M., Schmidtchen, U., Teodorcyk, A., Tigreat, D., Versloot, N.H.A., "On the use of hydrogen in confined spaces: Results from the internal project InsHyde", Proceedings of the 3rd International Conference on Hydrogen Safety, Ajaccio, 16-18 September 2009

δεδομένων σε όλο το εύρος των αναμενόμενων συνθηκών λειτουργίας όσο από πλευράς ανάπτυξης και ελέγχου της αξιοπιστίας των υπολογιστικών μέσων όπως οι μεθοδολογίες CFD⁶. Η παρούσα εργασία στοχεύει στη συλλογή πληροφοριών προς αυτήν την κατεύθυνση.

Από την υπολογιστική μελέτη 10 πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου σε κλειστό χώρο με φυσικό αερισμό ελήφθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι προβλέψεις έκλυσης και διασποράς H₂ με το μοντέλο k-ε είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.
- Είναι απαραίτητη η λήψη πειραματικών δεδομένων για τις περιβαλλοντικές συνθήκες (ένταση και κατεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία περιβάλλοντος) προκειμένου να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς για ακριβέστερη αναπαράσταση των συνθηκών των πειραμάτων και καλύτερο υπολογισμό του φυσικού αερισμού.

Από τη γενική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του φυσικού αερισμού χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο και τον κώδικα CFD ADREA-HF βρέθηκε ότι:

- Οι διαθέσιμες θεωρητικές σχέσεις υπερεκτιμούν συστηματικά τον φυσικό αερισμό.
- Η υπερεκτίμηση είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση ανοιγμάτων μόνο κionτά στην οροφή τοποθετημένων σ' έναν μόνο τοίχο.

Παρόμοιες σχέσεις που προτείνονται στις Ιταλικές Οδηγίες (CEI EN-60079-10)⁷ για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας ATEX δεν έχουν αξιολογηθεί εκτενώς με πειραματικά δεδομένα, δεν περιλαμβάνουν την ενδεχόμενη αύξηση του αερισμού που μπορεί να προκαλέσει η έκλυση ανωστικού αερίου υπό ορισμένες συνθήκες, ούτε την πιθανή παρεμπόδισή του από τη θερμική ανακυκλοφορία (όταν δηλαδή ο εξωτερικός αέρας έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη απ' αυτήν στο εσωτερικό του χώρου) και τέλος δεν προτείνονται σχέσεις που συνδυάζουν τα παραπάνω φαινόμενα με την παρουσία ανέμου.

Από την υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης He (αντί H₂) σε μονοθέσιο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτου με 3 διαφορετικές διατάξεις φυσικού αερισμού, βρέθηκαν τα εξής:

- Οι προβλέψεις έκλυσης και διασποράς H₂ με το μοντέλο k-ε και το LVEL έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά.
- Η υπόθεση συμμετρίας δεν επηρεάζει τις προβλέψεις.

⁶ Molkov M., "Hydrogen safety research: State of the art", 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Edinburgh 2007

⁷ CEI EN 60079-10, (2004), "Electrical apparatus for explosive atmospheres – part 10: classification of hazardous areas", 2nd edition

Κεφάλαιο 10: Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

- Η απουσία επέκτασης του πλέγματος εκτός των φυσικών ορίων της πειραματικής εγκατάστασης κατά την οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση δε δημιουργεί μόνο έντονες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης He αλλά και χειρότερες προβλέψεις στους ανιχνευτές.
- Οι συγκεντρώσεις He επηρεάζονται από την ομοιομορφία και πυκνωση του πλέγματος μέσα στο χώρο, δίνοντας πολύ καλές προβλέψεις στην περίπτωση πυκνότερου και ομοιόμορφου πλέγματος και σ' αυτήν με αραιότερο αλλά ομοιόμορφο πλέγμα.

Από τη σύγκριση 4 διαφορετικών μεθοδολογιών CFD με 4 διαφορετικούς κώδικες και μοντέλα:

- Αναδείχθηκε και πάλι η επίδραση των οριακών συνθηκών στις προβλέψεις. Προτείνεται η επέκταση του υπολογιστικού χωρίου εκτός των ορίων των ανοιγμάτων αερισμού για τέτοιου είδους σενάρια.
- Οι προσομοιώσεις με αποτελέσματα πολύ κοντά στα πειραματικά προβλέπουν διαφορετικούς όγκους αναφλέξιμου νέφους. Για τη σύγκριση λοιπόν διαφόρων μεθοδολογιών CFD σεναρίων ασφάλειας είναι σκόπιμη η χρήση πειραμάτων με περισσότερες μετρήσεις συγκέντρωσης καθώς και οπτικής απεικόνισης του εκλυθέντος αερίου.

Από την υπολογιστική μελέτη πειραμάτων έκλυσης υδρογόνου από δοχείο αποθήκευσης 40 MPa σε χώρο αποθήκευσης σταθμού ανεφοδιασμού αυτοκινήτων πραγματικής κλίμακας:

- Οι συνθήκες έκλυσης χρησιμοποιώντας πραγματικές ιδιότητες αερίου και υποθέτοντας ροή Fanno βρίσκονται πολύ κοντά στις πειραματικές.
- Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την κατανομή του H₂ στο χώρο είναι ο προσανατολισμός της έκλυσης.
- Ασθενέστερη επίδραση στην κατανομή έχει ο προσανατολισμός ήπιου ανέμου.

Από την μελέτη εκτίμησης κινδύνου ενός υποθετικού σταθμού ανεφοδιασμού H₂ με έμφαση στην παρουσίαση της ποσοτικής ανάλυσης των επιπτώσεων των σεναρίων ατυχήματος ελήφθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο το μέγεθος του κινδύνου είναι τα χαρακτηριστικά της διαρροής.
- Για τα σενάρια ανοιχτού χώρου, η αύξηση της έντασης του ανέμου δεν επηρεάζει κατ' αναλογία τα χαρακτηριστικά του αναφλέξιμου νέφους.

Η σύγκριση της εκτίμησης του κινδύνου μέσω των αποστάσεων υπερπίεσεων με δεδομένα από τον κώδικα CFD ADREA-HF και του απλοποιημένου μοντέλου Effects 7.6 ανέδειξε τα εξής:

Κεφάλαιο 10: Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

- Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των 2 μεθοδολογιών εμφανίζεται στα σενάρια με τον ισχυρότερο άνεμο. Αυτό αποδίδεται κυρίως στην αδυναμία του μοντέλου Effects 7.6 να συμπεριλάβει την παρουσία των παρακείμενων κτιρίων με αποτέλεσμα την πρόβλεψη μικρότερου αναφλέξιμου νέφους λόγω της εντονότερης ανάμιξης του H₂ με τον αέρα.
- Συγκρίσεις μεταξύ κωδίκων CFD και απλοποιημένων μοντέλων πρέπει να γίνουν συστηματικά στο μέλλον ώστε να αναδειχτούν τα όρια εφαρμογής και ακρίβειας των διαφόρων μεθοδολογιών.

Τέλος, από τη σύγκριση διαφόρων μεθοδολογιών εκτίμησης κινδύνου του ίδιου υποθετικού σταθμού ανεφοδιασμού H₂ συνάγονται τα εξής:

- Υπάρχουν σημαντικές διαφορές σε διάφορα στάδια της μελέτης εκτίμησης κινδύνου πέραν του σταδίου της ποσοτικής εκτίμησης του κινδύνου (λόγω της χρήσης CFD ή απλοποιημένων μοντέλων), όπως:
 - ο διαφορές στην μέθοδο ποσοτικοποίησης του κινδύνου
 - ο διαφορές στα κριτήρια αποδοχής του κινδύνου
 - ο διαφορές στην εκτίμηση συχνότητας αστοχίας των συστημάτων
 - ο διαφορές εκτίμησης της πιθανότητας και του είδους της έναυσης H₂
 - ο απουσία κοινών σεναρίων για τον ίδιο σταθμό ανεφοδιασμού διότι αυτό τελικά έγκειται στην κρίση του μελετητή.

Θα πρέπει λοιπόν στο μέλλον να γίνουν προσπάθειες από τα ενδιαφερόμενα μέρη ώστε να προταθεί μια εναρμονισμένη και κοινή μεθοδολογία και πρακτική των μελετών εκτίμησης κινδύνου.

Προτεινόμενα μελλοντικά βήματα

Για την εισαγωγή και διάθεση του H_2 ως μελλοντικό φορέα ενέργειας πρέπει να μελετηθούν συστηματικά όλες οι πτυχές των θεμάτων ασφαλείας. Οι τεχνολογίες και εφαρμογές της χρήσης του H_2 θα πρέπει να παρέχουν τουλάχιστον τα ίδια επίπεδα ασφάλειας, αξιοπιστίας και ευχρηστίας με τις αντίστοιχες των ορυκτών καυσίμων¹. Ενώ έχουν γίνει κάποια βήματα προς την μελέτη των θεμάτων ασφαλείας, υπάρχουν ζητήματα που παραμένουν εκκρεμή.

Στην περίπτωση ατυχημάτων των τεχνολογιών H_2 η αλληλουχία των φυσικών φαινομένων είναι η έκλυση, η διασπορά, η έναυση και τέλος η φωτιά ή έκρηξη. Η αρχική φάση προκύπτει από τη διαρροή του H_2 , ως δέσμη, από το δοχείο αποθήκευσης ή από κάποιο άλλο στοιχείο του συστήματος. Ενώ υπάρχουν διαθέσιμες σχέσεις αυτομοιότητας για τον υπολογισμό του ρυθμού ανάπτυξης της αξονικής συγκέντρωσης και ταχύτητας της δέσμης, αυτές έχουν καλή εφαρμογή για δέσμες όπου κυριαρχεί η ορμή και όχι για δέσμες όπου κυριαρχεί η άνωση. Επίσης, είναι σημαντική η μελέτη και πρόβλεψη των κατακόρυφων καθοδικών εκλύσεων υποεκτονώμενων δεσμών και ιδιαίτερα το σημείο όπου η ροή μπορεί να λάβει ανοδική πορεία λόγω της επίδρασης της άνωσης μέσω αντίστοιχων σχέσεων. Στην περίπτωση εκλύσεων H_2 σε χώρο με φυσικό αερισμό, συνιστάται η αναθεώρηση των θεωρητικών σχέσεων υπολογισμού του αερισμού. Ο αερισμός επηρεάζεται από τις μετεωρολογικές συνθήκες καθώς επίσης και από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του εσωτερικού με τον εξωτερικό χώρο. Η διαφορά πυκνότητας μπορεί να προκληθεί είτε λόγω διαφοράς θερμοκρασίας είτε λόγω έκλυσης κάποιου ανωστικού αερίου όπως το H_2 ή από τον συνδυασμό και των δυο. Ενδιαφέρον θα είχε η πειραματική και αριθμητική μελέτη σεναρίων που συνδυάζουν την επίδραση του ανέμου με αυτήν της διαφοράς πυκνότητας προκειμένου να προταθούν σχέσεις απλοποιημένων μοντέλων για μια γρήγορη και εύχρηστη συνολική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του αερισμού σε περιπτώσεις ατυχημάτων όπως αυτές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Από πλευράς υπολογιστικών μελετών, με τη χρήση κωδικών CFD, αναγνωρίζονται τα παρακάτω ως εκκρεμή:

- έλλειψη πειραματικών δεδομένων για την αξιολόγηση των μεθοδολογιών CFD ισχυρών τυρβωδών δεσμών, προσκρούόμενων δεσμών σε τοίχους, επίδραση της γειτνίασης των στερεών επιφανειών στην ανάπτυξη της δέσμης

¹ Jordan T., “HySafe – The Network of Excellence for Hydrogen Safety”, In Proceedings of the WHEC, 13-16 June 2006, Lyon France

Προτεινόμενα μελλοντικά βήματα

(φαινόμενο Coanda), αλληλεπίδραση πολλαπλών δεσμών, ειλύσεις σε πολύπλοκες γεωμετρίες, χώρους με κεκλιμένες οροφές και σήραγγες καθώς επίσης γραμμικών δεσμών προεκπτώσεων από ρωγμές ή άλλα μικρά ανοίγματα.

- έλεγχος αξιοπιστίας της μεθόδου αντικατάστασης της πηγής έκλυσης υποεκτονωμένων δεσμών από τις λεγόμενες «φαινόμενες» πηγές και προσδιορισμός των ορίων εφαρμογής τους.
- έλεγχος των μεθοδολογιών περιγραφής της έκλυσης λόγω διαπερατότητας του H_2 από το δοχείο αποθήκευσης ή τις γραμμές μεταφοράς.
- έλεγχος προβλέψεων του φαινομένου διαστρωμάτωσης από ασθενείς ειλύσεις ή ειλύσεις λόγω διαπερατότητας και της διάχυσης μετά το πέρας αυτής.
- προβλέψεις φυσικού αερισμού με έμφαση στη μελέτη της επίδρασης των εξωτερικών συνθηκών (άνεμος, θερμοκρασία) στην αποτελεσματικότητα ή πιθανή παρεμπόδιση του αερισμού.
- πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες σεναρίων έκλυσης H_2 σε οχήματα ενεργειακών συστοιχιών με έμφαση στην μελέτη της πιθανότητας συσσώρευσης του H_2 στο θάλαμο επιβατών.
- πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες σεναρίων έκλυσης H_2 σε σταθμούς ανεφοδιασμού και γενικότερα μελέτες σεναρίων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και σε εγκαταστάσεις πραγματικής κλίμακας.

Τέλος από την μελέτη της ποσοτικής ανάλυσης κινδύνου του σταθμού ανεφοδιασμού H_2 που παρουσιάστηκε σ' αυτήν την εργασία αναδείχθηκαν κάποιες διαφορές στο στάδιο ποσοτικής εκτίμησης του κινδύνου (λόγω της χρήσης CFD και ενός απλοποιημένου μοντέλου). Τέτοιου είδους συγκρίσεις μεταξύ κωδικών CFD και απλοποιημένων μοντέλων που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία, πρέπει να γίνουν συστηματικά στο μέλλον ώστε να αναδειχτούν τα όρια εφαρμογής και ακρίβειας των διαφόρων μεθόδων. Ακόμη, έχουν δημοσιευτεί διαφορές και σε προγενέστερα στάδια της μελέτης ανάλυσης κινδύνου όπως: διαφορές στα κριτήρια αποδοχής του κινδύνου, διαφορές στην εκτίμηση συχνότητας αστοχίας των συστημάτων και της πιθανότητας και του είδους της έναυσης του H_2 και τέλος απουσία κοινών σεναρίων για τον ίδιο σταθμό ανεφοδιασμού. Είναι αναγκαία η ανάπτυξη κοινών μεθοδολογιών για τη μελέτη ασφάλειας των σταθμών ανεφοδιασμού και γενικότερα των εφαρμογών H_2 ως φορέα ενέργειας, τα αποτελέσματα των οποίων θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη νομικών απαιτήσεων, κωδικών και προδιαγραφών.

Γενική περιγραφή του κώδικα ADREA-HF

1. Γενικά χαρακτηριστικά

Ο κώδικας ADREA-HF είναι ένας κώδικας υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) ο οποίος χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (Finite Volume) για την επίλυση των τρισδιάστατων χρονο-εξαρτημένων πλήρως συμπιεστών εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας (ενθαλπίας ή εσωτερικής ενέργειας) του μίγματος και των εξισώσεων μάζας των συστατικών του, για την πρόβλεψη της χωρικής και χρονικής κατανομής τους. Έχει συνταχθεί στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN-90 και είναι διαθέσιμος στα λειτουργικά συστήματα Windows και Linux. Το υπό μελέτη ρευστό μπορεί να είναι πολύ-συστατικά, διφασικά μίγματα ουσιών με αέρα όπου μεταξύ των φάσεων γίνεται η υπόθεση θερμοδυναμικής ισορροπίας οι δε φυσικές ιδιότητες του ρευστού θεωρούνται είτε πραγματικές είτε ιδανικές. Για την εκτίμηση της υγρής φάσης χρησιμοποιείται ο νόμος του Raoult ενώ υπάρχει η δυνατότητα θεώρησης μη υδροδυναμικής ισορροπίας (διαφορετική ταχύτητα μεταξύ υγρής και αέριας φάσης). Οι διακριτοποιημένες εξισώσεις ορμής επιλύονται σε μετατοπισμένο πλέγμα (staggered grid). Η πίεση υπολογίζεται από την εξίσωση διατήρησης μάζας. Η χρονική διακριτοποίηση βασίζεται σε σχήμα πλήρως πεπλεγμένο 1^{ης} ή 2^{ης} τάξης (fully implicit 1st or 2nd order). Η χωρική ακρίβεια είναι έως 3^{ης} τάξης. Ο κώδικας διαθέτει διάφορους επιλύτες όπως: Gauss-Seidel, Line Gauss-Seidel και BI-CGSTAB, GMRES με διάφορους προ-σταθεροποιητές (ILU(0), ILU(1), MILU(0), MILU(1)). Μπορεί να εφαρμοστεί μία αυτόματη διαδικασία μεταβολής του χρονικού βήματος ολοκλήρωσης ενώ ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει ως κριτήριο ευστάθειας λύσεως τον αριθμό συναγωγής Courant (CFL) ή/και το μέγιστο χρονικό βήμα. Οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος μπορούν να δοθούν είτε άμεσα, είτε μέσω παρεμβολής από τη λύση προηγούμενου προβλήματος το οποίο μπορεί να έχει διαφορετικό υπολογιστικό χωρίο και πλέγμα. Ο κώδικας είναι παράλληλος με OpenMP για αρχιτεκτονικές κοινής μνήμης και με MPICH-2 σε συστήματα κατανεμημένης μνήμης.

2. Γεωμετρική προεπεξεργασία

Για τη γεωμετρική προεπεξεργασία χρησιμοποιούνται οι γραφικές/γεωμετρικές βιβλιοθήκες DELTA_B και OpenCascade. Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής της γεωμετρίας από IGES, STEP, BREP, CSFD και εξαγωγής της σε IGES, BREP, STL, VRML και TECPLOT.

Η κατασκευή του υπολογιστικού πεδίου ακανόνιστης γεωμετρίας γίνεται σε καρτεσιανό πλέγμα με τη χρήση της τεχνικής του πορώδους μέσου και της επιφανειακής διαπερατότητας. Τα υπολογιστικά κελιά κατηγοριοποιούνται σε πλήρως ενεργά (πορώδες 1), πλήρως δεσμευμένα από στερεά σώματα της γεωμετρίας (πορώδες 0) και μερικώς δεσμευμένα/ενεργά (πορώδες μεταξύ 0 και 1). Τα πλήρως δεσμευμένα κελιά δεν αποθηκεύονται στη μνήμη και ως εκ τούτου εξαιρούνται από τους υπολογισμούς. Οι εξισώσεις διατήρησης επιλύονται στα πλήρως ενεργά κελιά. Στην περίπτωση των μερικώς ενεργών κελιών, η ολοκλήρωση των εξισώσεων διατήρησης γίνεται στον ενεργό (ελεύθερο) όγκο αυτών. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αποθηκεύονται στη μνήμη σ' αυτήν την περίπτωση είναι: ο ελεύθερος όγκος τους, οι ελεύθερες επιφάνειές τους (μέτωπα κελιών) και οι οριακές επιφάνειες οι οποίες μπορεί να βρίσκονται είτε επί των μετώπων των κελιών είτε εντός αυτών. Ο λόγος μεταξύ του ελεύθερου όγκου προς τον συνολικό όγκο του κελιού καλείται πορώδες του κελιού. Ο λόγος μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας προς τη συνολική επιφάνεια (μέτωπο) του κελιού καλείται επιφανειακή διαπερατότητα. Στην περίπτωση ύπαρξης οριακών επιφανειών στο εσωτερικό ενός κελιού, υπολογίζεται η ελάχιστη εσωτερική επιφάνεια σε κάθε μια από τις συνιστώσες x , y και z . Όταν επί παραδείγματι η ελάχιστη εσωτερική επιφάνεια στην κατεύθυνση x είναι μηδενική, τότε δεν επιτρέπεται η διάχυση και συναγωγή ανάμεσα στο δυτικό και ανατολικό μέτωπο του κελιού. Όταν η ελάχιστη εσωτερική επιφάνεια είναι μη μηδενική τότε στις εξισώσεις ορμής προστίθεται ένας επιπλέον όρος πηγής. Παραδείγματος χάριν, εάν η εσωτερική επιφάνεια στην κατεύθυνση i έχει μη μηδενικό ελάχιστο, προστίθεται ένας όρος F_{oi} στην εξίσωση i -ορμής για την περιγραφή της ώσης λόγω της μεταβολής της επιφάνειας του κελιού στην i κατεύθυνση:

$$F_{oi} = \frac{\rho}{2} |u_i| u_i \frac{\zeta_i}{\Delta x_i} \quad (1)$$

Όπου ο όρος ζ_i είναι ο συντελεστής αντίστασης, Δx_i είναι το μήκος του κελιού στην κατεύθυνση i και u_i είναι η ταχύτητα του κελιού στην ελάχιστη εσωτερική επιφάνεια στην κατεύθυνση i . Ο συντελεστής αντίστασης της εξίσωσης υπολογίζεται βάσει ημ-εμπειρικών σχέσεων, προτεινόμενων από τον Idelchik (1986) όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο ADREA-HF (Venetsanos και συν., 2009).

3. Επίλυση του πεδίου ροής

Το υπό μελέτη ρευστό είναι ένα πολύ-συστατικό μίγμα αποτελούμενο από τον περιβάλλοντα αέρα και τις χημικές ουσίες. Οι χημικές ουσίες είναι δυνατό να βρίσκονται σε συνθήκες ατμού, υγρού ή διαφασικές συνθήκες. Το μίγμα θεωρείται ότι βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία (κοινή θερμοκρασία και πίεση) με ιδανικές ιδιότητες.

3.1. Κλάσματα μάζας

Τα κλάσματα μάζας των συστατικών (q_i) ορίζονται σε σχέση με το ολικό μίγμα:

$$1 = \sum q_i \quad (2)$$

Το ολικό κλάσμα μάζας του συστατικού i αποτελείται από ατμούς και υγρό:

$$q_i = q_{vi} + q_{li} \quad (3)$$

3.2. Πυκνότητα μίγματος

Η πυκνότητα μίγματος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\frac{1}{\rho} = \sum \frac{q_i}{\rho_i} \quad (4)$$

Όπου η πυκνότητα του συστατικού i υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{q_{vi}}{\rho_{vi}} + \frac{q_{li}}{\rho_{li}} \quad (5)$$

3.3. Οι βασικές εξισώσεις διατήρησης

Χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας. Η διατήρηση μάζας του ρύπου εξασφαλίζεται από την εξίσωση μεταφοράς μάζας του.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j} + \tau_{ij}) + \rho g_i \quad (7)$$

$$\text{με: } \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (8)$$

$$\text{ή αλλιώς: } \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j H}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{c_p \mu_t}{\sigma_h} + \lambda \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \frac{dP}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sum_i \left(\frac{\mu_t}{\sigma_q} + D_q \right) H_i \frac{\partial q_i}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

ή σε απλοποιημένη μορφή:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j H}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_h} \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) + \frac{dP}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \sum_i D_{q_i} H_i \frac{\partial q_i}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho q_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j q_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\rho \overline{u_j q_i} + \rho D_i \frac{\partial q_i}{\partial x_j} \right) + S_{q_i} \quad (12)$$

3.4. Μοντελοποίηση της τύρβης

Ο ενεργός συντελεστής συνεκτικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (13)$$

Οι τάσεις Reynolds:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (14)$$

Σχέση τάσεως-ρυθμού παραμόρφωσης:

$$S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \nabla u + \nabla^T u \quad (15)$$

$$S = \left(\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2} \quad (16)$$

Η τυρβώδης μεταφορά μάζας:

$$-\rho \overline{u_j q_i} = \frac{\mu_t}{\sigma} \frac{\partial q_i}{\partial x_j} \quad (17)$$

Η τυρβώδης μεταφορά ενέργειας:

$$-\rho \overline{u_j H} = \frac{\mu_t}{\sigma} \frac{\partial H}{\partial x_j} \quad (18)$$

Η σχέση πυκνότητας-ταχύτητας:

$$-\rho \overline{u_i} = \frac{\mu_t}{\rho \sigma} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right)_{ise} = \frac{\mu_t}{\rho \sigma} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{c_v}{c_p} \frac{\rho}{P} \frac{\partial P}{\partial x_i} \right) \approx \frac{\mu_t}{\rho \sigma} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{c_v}{c_p} \frac{g_i}{P} \right) \quad (19)$$

Στην παραπάνω σχέση γίνεται η υπόθεση ότι το τεμάχιο του ρευστού με διαφορετική πυκνότητα από το περιβάλλον υπόκειται σε ισεντροπική μεταβολή βάσει της βαθμίδας πίεσης του ρευστού (Haltiner και Martin, 1957) και ότι υπό την επίδραση της βαρύτητας η διαφορά των πιέσεων μπορεί να αντικατασταθεί από τους όρους βαρύτητας.

3.4.1 Το μοντέλο k-ε

Το προκαθορισμένο μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται είναι το μοντέλο k-ε των Launder και Spalding (1974) επεκτεταμένο για ανωστικές ροές.

Συντελεστής συνεικτικότητας τυρβώδους ροής:

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (20)$$

Εξίσωση διατήρησης τυρβώδους κινητικής ενέργειας:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G + G_B - \rho \varepsilon \quad (21)$$

Παραγωγή τύρβης:

$$G = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \mu_t S^2 \quad (22)$$

Όρος άνωσης:

$$G_B = \overline{\rho u_i g_i} \quad (23)$$

Ο αριθμός Richardson ρυθμού ροής:

$$Ri_f = -\frac{G_B}{G} \quad (24)$$

Ο αριθμός κλίσης Richardson:

$$Ri = \sigma Ri_f = \frac{\mu_t g_i}{\rho G} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{c_v}{c_p} \frac{\rho}{P} \frac{\partial P}{\partial x_i} \right) \approx \frac{\mu_t g_i}{\rho G} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{c_v}{c_p} \frac{g_i}{P} \right) \quad (25)$$

Εξίσωση διατήρησης της τυρβώδους κινητικής απορρόφησης:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G + C_3 G_B) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (26)$$

Οι σταθερές του μοντέλου παίρνουν τις εξής τιμές: $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$,

$C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma = 0.72$ και $C_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } G_B > 0 \\ 0 & \text{if } G_B \leq 0 \end{cases}$. Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης

διαφόρων μοντέλων τύπου RANS εκτός από το k-ε όπως το γενικευμένο μοντέλο

ανάμιξης μήκους, το μοντέλο LVEL, το μοντέλο μιας εξίσωσης Anisotropic one-equation model (Bartzis), το μοντέλο Isotropic one equation model (Bartzis).

3.4.2 Ο τυρβώδης αριθμός Prandtl

Ο τυρβώδης αριθμός Prandtl υπολογίζεται βάσει διαφόρων μοντέλων. Στο μοντέλο σταθερού τυρβώδους αριθμού Prandtl, ο αριθμός δεν εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες ευστάθειας:

$$\sigma_h = \sigma_{h0} \quad (27)$$

Η τιμή που λαμβάνει συνήθως είναι $\sigma_{h0} = 0,72$ (υπόθεση ουδέτερων συνθηκών).

Σε όλες τις υπολογιστικές μελέτες της παρούσης διατριβής έγινε η υπόθεση ότι ο τυρβώδης αριθμός Prandtl είναι σταθερός και ίσος με την τιμή 0,72.

Κατά τους Ellison και Turner (1960) και για ευσταθείς συνθήκες ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\sigma_h = \sigma_{h0} \frac{(1 - Ri_f)^2}{1 - Ri_f / Ri_{f,cr}} \quad (28)$$

Κατά τους Venetsanos, Andronopoulos και συν. (1998) και βάσει της θεωρίας Monin-Obukhov, ο τυρβώδης αριθμός Prandtl στο μονοδιάστατο ατμοσφαιρικό στρώμα είναι γενικά συνάρτηση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας (Businger, 1973) και εκφράζεται ως ακολούθως:

$$\sigma_h = \frac{\Phi_h(z/L_{MO})}{\Phi_m(z/L_{MO})} \quad (29)$$

Όπου Φ_h και Φ_m είναι συναρτήσεις ευστάθειας, z είναι η απόσταση από το έδαφος και L_{MO} είναι η κλίμακα μήκους Monin-Obukhov η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{MO} = \frac{U_*^3 \rho_p T}{Q_w \kappa g} \quad (30)$$

Οι Venetsanos και συν. επέκτειναν το μοντέλο προκειμένου να εφαρμοστεί σε περιοχές μακριά από τοίχια:

$$\sigma_h = \frac{\Phi_h(\zeta)}{\Phi_m(\zeta)} \quad (31)$$

Η παράμετρος ζ υπολογίζεται επαναληπτικά και για δεδομένο αριθμό κλίσης Richardson (Ri) δίνεται από την παρακάτω σχέση η οποία έχει το πλεονέκτημα

ανεξαρτησίας από τα τοιχώματα ενώ στην περίπτωση μονοδιάστατου ατμοσφαιρικού στρώματος ο παράγοντας ζ τείνει στην τιμή z/LMO :

$$\zeta = Ri \frac{(\Phi_m(\zeta))^2}{\Phi_h(\zeta)} \quad (32)$$

Οι συναρτήσεις ευστάθειας που χρησιμοποιούνται είναι:

$$\Phi_m = \begin{cases} (1-15\zeta)^{-1/4}, & \text{αν } \zeta \leq 0 \\ 1+4.7\zeta & , \text{αν } \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (33)$$

$$\Phi_h = \begin{cases} \sigma_{h0}(1-9\zeta)^{-1/2}, & \text{αν } \zeta \leq 0 \\ \sigma_{h0}\left(1+\frac{4.7}{\sigma_{h0}}\zeta\right) & , \text{αν } \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (34)$$

4. Οριακές συνθήκες

Ο κώδικας έχει τη δυνατότητα χρήσης διαφόρων οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες, ταξινομημένες βάσει της φύσης των οριακών επιφανειών παρουσιάζονται παρακάτω.

4.1. Ελεύθερες οριακές επιφάνειες

4.1.1 Δεδομένη τιμή (εφαρμόζεται συνήθως σε επιφάνειες εισόδου):

$$\psi = f_\psi(t) \quad (35)$$

4.1.2 Μηδενική κλίση (εφαρμόζεται συνήθως σε επιφάνειες εξόδου αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε επιφάνειες εισόδου/εξόδου):

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0 \quad (36)$$

4.1.3 Δεδομένος ρυθμός ροής:

$$-D_\psi \frac{\partial \psi}{\partial n} = f_\psi(t) \quad (37)$$

4.1.4 Επιφάνειες εισόδου (εφαρμόζεται σε επιφάνειες εισόδου όπου επιλέγεται η μεταφορά μόνο από συναγωγή και όχι από διάχυση):

$$\psi = f_\psi(t) \text{ και } \frac{\partial \psi}{\partial n} = 0 \quad (38)$$

4.1.5 Επιφάνειες συμμετρίας:

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = 0 \text{ και } u_n = 0 \quad (39)$$

4.1.6 Επιφάνειες σταθερής πίεσης:

$$P_n = f_{np}(t) \quad (40)$$

Σ' αυτήν την περίπτωση η κάθετη στην οριακή επιφάνεια συνιστώσα της ταχύτητας υπολογίζεται από την εξίσωση διατήρησης μάζας.

4.2. Στερεές επιφάνειες

Η ολοκλήρωση των εξισώσεων ορμής απαιτεί την εκτίμηση της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα τ_w . Οι προσεγγίσεις με τις συναρτήσεις τοιχωμάτων γενικά συνδέουν τη διατμητική τάση στο τοίχωμα με την εφαπτομενική ταχύτητα κοντά στην επιφάνεια του τοιχώματος. Η γνώση της εφαπτομενικής ταχύτητας επιτρέπει τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω των εξισώσεων ορμής. Οι εξισώσεις ορμής για την εφαπτομενική στο τοίχωμα ταχύτητα ολοκληρώνονται από ένα σημείο κοντά στο τοίχωμα (ύψος τραχύτητας n_0) μέχρι την κάθετη απόσταση n από αυτό με ταυτόχρονη παράλειψη των χρονικά μεταβαλλόμενων όρων και των όρων συναγωγής:

$$\frac{d\vec{U}_\tau}{dn} = \frac{\vec{\tau}_w + (n - n_0)(\nabla P - \rho \vec{g})_\tau}{\mu + \mu_t} \quad (41)$$

$$\vec{U}_\tau = \vec{U} - [\vec{n}\vec{U}]_{\vec{n}} \quad (42)$$

$$(\nabla P - \rho \vec{g})_\tau = (\nabla P - \rho \vec{g}) - [\vec{n}(\nabla P - \rho \vec{g})]_{\vec{n}} \quad (43)$$

Ολοκλήρωση της εξίσωσης (41) για μια ακόμη φορά από το σημείο n_0 μέχρι το n , δίνει:

$$\rho \kappa U_* \Delta \vec{U}_\tau = \vec{\tau}_w \Psi_m + (\nabla P - \rho \vec{g})_\tau \Omega_m \quad (44)$$

$$\Delta \vec{U}_\tau = \vec{U}_\tau(n) - \vec{U}_\tau(n=0) \quad (45)$$

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (46)$$

$$\Psi_m = \rho \kappa U_* \int_{n_0}^n \frac{dn}{\mu + \mu_t} \quad (47)$$

$$\Omega_m = \rho \kappa U_* \int_{n_0}^n \frac{(n - n_0) dn}{\mu + \mu_t} \quad (48)$$

Η εξίσωση για την διατμητική ταχύτητα U_* λαμβάνεται μετά από μια αναδιατύπωση της εξίσωσης (44):

$$\left| \rho \kappa U_* \Delta \vec{U}_\tau - (\nabla P - \rho \vec{g})_\tau \Omega_m \right| = \rho U_*^2 \Psi_m \quad (49)$$

Όταν η επίδραση της κλίσης της πίεσης και της βαρύτητας παραλειφθούν, οι εξισώσεις (44) και (49) απλοποιούνται στις εξής:

$$\vec{\tau}_w = \frac{\rho \kappa U_*}{\Psi_m} \Delta \vec{U}_\tau \quad \text{και} \quad U_* = \frac{\kappa}{\Psi_m} \left| \Delta \vec{U}_\tau \right| \quad (50)$$

Για τον υπολογισμό των συναρτήσεων Ω_m και Ψ_m χρησιμοποιείται η θεωρία των Monin-Obukhov:

$$\mu_t = \frac{\rho \kappa U_* n}{\Phi_m(n)} \quad (51)$$

$$L_{MO} = \frac{U_*^3}{Q_n} \frac{\rho c_p T(n_0)}{\kappa(-\bar{g}\bar{n})} \quad (52)$$

$$\Psi_m = \int_{n_0}^n \frac{\Phi_m}{n} dn \quad (53)$$

$$\Omega_m = \int_{n_0}^n \left(1 - \frac{n_0}{n} \right) \Phi_m dn \quad (54)$$

Στη γενική περίπτωση, η διατμητική ταχύτητα υπολογίζεται επαναληπτικά από την εξίσωση (49). Έχοντας υπολογίσει την τιμή της διατμητικής ταχύτητας, υπολογίζεται η διατμητική τάση στο τοίχωμα με τη χρήση της εξίσωσης (44). Εάν η ροή θερμότητας δεν είναι γνωστή, τότε είναι απαραίτητη η χρήση της συναρτήσεων τοιχώματος για τη θερμοκρασία, η οποία περιγράφεται παρακάτω.

Σε όλες τις υπολογιστικές μελέτες της παρούσης διατριβής για τον υπολογισμό των συναρτήσεων τοίχου αγνοήθηκε η επίδραση της βαθμίδας πίεσης ενώ παράλληλα θεωρήθηκε ότι επικρατούν ουδέτερες συνθήκες.

Η ολοκλήρωση της εξίσωσης ενέργειας απαιτεί την εκτίμηση του ρυθμού θερμότητας στο τοίχωμα Q_w . Η ολοκλήρωση της εξίσωσης γίνεται από το σημείο n_0 μέχρι την κάθετη απόσταση n από το τοίχωμα με ταυτόχρονη παράλειψη των χρονικά μεταβαλλόμενων όρων και των όρων συναγωγής:

$$-\frac{dT}{dn} = \sigma_h \frac{Q_w}{c_p \mu_t} \quad (55)$$

Ολοκλήρωση της εξίσωσης (55) για μια ακόμη φορά από το σημείο n_0 μέχρι το n , δίνει:

$$T(n_0) - T(n) = \frac{Q_w}{\rho c_p \kappa U_*} \Psi_h \quad (56)$$

$$\Psi_h(n) = \rho \kappa U_* \int_{n_0}^n \frac{\sigma_h}{\mu_t} dn \quad (57)$$

Με βάση και πάλι τη θεωρία των Monin-Obukhov, ο τυρβώδης αριθμός Prandtl σ_h δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_h = \frac{\Phi_h(n)}{\Phi_m(n)} \quad (58)$$

Όπου τελικά έχουμε:

$$\Psi_h(n) = \int_{n_0}^n \frac{\Phi_h}{n} dn \quad (59)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία στο έδαφος/τοιχώμα γενικά διαφέρει από τη θερμοκρασία του γειτονικού αέρα η οποία εκτιμάται στο ύψος τραχύτητας n_0 . Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_{cn} ορίζεται ως εξής:

$$T_g(n=0) - T(n_0) = \frac{Q_w}{\rho c_p h_{cn}} \quad (60)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_{cn} υπολογίζεται ως εξής:

$$h_{cn} = 10.395 \kappa U_* \left(\frac{\rho U_* n_0}{\mu} \right)^{-0.45} \quad (61)$$

Ο συνδυασμός των εξισώσεων (56) και (60) δίνει την παρακάτω εξίσωση:

$$T_g(n=0) - T(n) = \frac{Q_w}{\rho c_p} \left(\frac{1}{h_{cn}} + \frac{\Psi_h}{\kappa U_*} \right) \quad (62)$$

Η τελευταία εξίσωση περιλαμβάνει τη διατμητική ταχύτητα η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση (49). Για δεδομένη θερμοκρασία τοιχώματος T_g , ο ρυθμός ροής θερμότητας στο τοίχωμα υπολογίζεται επαναληπτικά από τις εξισώσεις (62) και (49).

Για δεδομένο ρυθμό ροής θερμότητας στο τοίχωμα χρησιμοποιείται η εξίσωση (62) για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας στο τοίχωμα.

Σε όλες τις υπολογιστικές μελέτες της παρούσης διατριβής θεωρήθηκε ότι η βαθμίδα θερμοκρασίας είναι μηδέν και ως εκ τούτου δεν εφαρμόστηκαν συναρτήσεις τοίχου για τη θερμοκρασία.

Για τον υπολογισμό των τιμών των μεταβλητών k και ε γίνεται η υπόθεση ότι η τυρβώδης διάχυση είναι αμελητέα σε σχέση με την παραγωγή και απορρόφησή της:

$$k(n) = \left(\frac{\kappa U_*}{C_\mu \Phi_m(n)} \right)^2 \quad (63)$$

$$\varepsilon(n) = \frac{C_E \Phi_m(n) k^2}{\kappa U_* n} \quad (64)$$

5. Διακριτοποίηση των εξισώσεων μεταφοράς

Η διακριτοποίηση των όρων συναγωγής των εξισώσεων μεταφοράς γίνεται με τη χρήση του σχήματος First Order Upwind (προκαθορισμένο). Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης κι άλλων σχημάτων όπως: Linear Upwind, Fromm, Cubic Upwind, QUICK με τη χρήση συναρτήσεων περιοριστών της εκροής – μη γραμμικοί συντελεστές διόρθωσης (flux limiters) οι οποίοι ελέγχουν τη βαθμίδα της υπολογιζόμενης λύσης ώστε να προλαμβάνουν την εμφάνιση υπερακόντισης ή υποακόντισης της, όπως: Van Leer, Van Albada, OSPRE, MinMod, Super-B, MUSCL, Smart, Umist.

6. Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και τη γραφική παράσταση του πεδίου λύσης, χρησιμοποιείται το Edes ενώ υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής της λύσης του πεδίου ροής στο TECPLOT.

7. Γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας (GUI)

Το γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας (Graphical User Interface – GUI) για την προεπεξεργασία και μετεπεξεργασία είναι το Edes σε περιβάλλον Windows (VC++, F90) και χρησιμοποιούνται οι γεωμετρικές/γραφικές βιβλιοθήκες Open Cascade και Delta-B.

8. Βιβλιογραφικές αναφορές σχετικές με τον κώδικα ADREA-HF

Andronopoulos, S., Bartzis, J.G., Wurtz, J., Asimakopoulos D., (1994), “Modelling the effects of obstacles on the dispersion of denser-than-air gases”, *Journal of Hazardous Materials*, 37, pp. 327-352

Andronopoulos, S., Grigoriadis, D., Robins, A., Venetsanos, A.G., Rafailidis, S., Bartzis, J.G., (2001), “Three dimensional modelling of concentration fluctuations in complicated geometries”, *Environmental Fluid Mechanics I*, pp. 415-440

Andronopoulos, S., Bartzis, J.G., Statharas, J., (1993), “Three dimensional modelling of dense gas dispersion”, *ERCOFTAC Bulletin* 16, pp 18-21

Baraldi D., Venetsanos A.G., Papanikolaou E., Heitsch M., Dallas V., (2009), “Numerical Analysis of Release, Dispersion and Combustion of Liquid Hydrogen in a Mock-up Hydrogen Re-Fuelling Station”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, pp. 303–315

Bartzis, J.G., (1991), “ADREA-HF: A three-dimensional finite volume code for vapour cloud dispersion in complex terrain”, Report EUR 13580 EN

Bartzis, J.G., Venetsanos, A.G., Varvayanni, M., Andronopoulos, S., Davakis, S., Statharas, J., Catsaros, N., Deligiannis, P., (1997), “Wind flow and dispersion modelling over terrain of high complexity”, *Proceedings of the AIR POLLUTION 97 International Conference*, Bologna, Italy, 16-18 Sept.

Businger J.A., (1973), “Turbulent Transfer in the Atmospheric Surface Layer”, *Workshop in Micrometeorology*, Amer. Meteorol. Soc., Chapter 2

Ellison T.H. and Turner J.S., (1960), “Mixing of dense fluid in a turbulent pipe flow. Part 2. Dependence of transfer coefficients on local stability”, *J. Fluid Mech.*, 8, pp. 529-544

Gallego E., Migoya E., Martin-Valdepenas J.M., Crespo A., Garcia J., Venetsanos A.G., Papanikolaou E., Kumar S., Studer E., Dagba Y., Jordan T., Jahn W., Oíset S., Makarov D., (2007), “An Intercomparison Exercise on the Capabilities of CFD Models to Predict Distribution and Mixing of H₂ in a Closed Vessel”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 32, No 13, pp. 2235-2245

Gallego, E., Migoya, E., Martin-Valdepenas, J. M., Garcia, J., Crespo, A., Venetsanos, A., Papanikolaou, E., Kumar, S., Studer, E., Hansen, O. R., Dagba, Y., Jordan, T., Jahn, W., Oíste, S., Makarov, D., (2005), “An Intercomparison Exercise on the Capabilities of CFD”, *International Conference on Hydrogen Safety*, Pisa, Italy, 8-10 September

Haltiner G.J., Martin F.L., (1957), “*Dynamical and Physical Meteorology*”, Mc Graw Hill Co.

Koutsourakis, N., Bartzis, J.G., Venetsanos, A.G., Rafailidis, S., (2006), “Computation of pollutant dispersion during an airplane take-off”, *Environ. Model. Softw.*, 21 (4), pp. 486-493

Koutsourakis, N., Neofytou, P., Venetsanos, A.G., Bartzis, J.G., (2005), “Parametric study of the dispersion aspects in a street-canyon area”, *Int. J. Environ. Pollut.*, 25 (1-4), pp. 155-163

Launder B.E. and Spalding D.B., (1974), “The numerical computation of turbulent flow”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, Issue 2, pp. 269-289

Neofytou, P., Venetsanos, A.G., Rafailidis, S., Bartzis, J.G., (2006), “Numerical investigation of the pollution dispersion in an urban street canyon”, *Environ. Model. Softw.*, 21 (4), pp. 525-531

Neofytou, P., Venetsanos, A.G., Vlachogiannis, D., Bartzis, J.G., Scaperdas, A., (2006), “CFD simulations of the wind environment around an airport terminal building”, *Environ. Model. Softw.*, 21 (4), pp. 520-524

Papanikolaou, E. A., Venetsanos, A. G., “CFD Modelling for Slow Hydrogen Releases in a Private Garage without Forced Ventilation”, *International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy, 8-10 September, 2005*

Statharas, J.C., Bartzis, J.G., Venetsanos, A.G., Wuertz, J., (1993), “Prediction of Ammonia Releases using the ADREA-HF code”, *Process Safety Progress*, 12, pp. 118-122

Statharas, J.C., Venetsanos, A.G., Bartzis, J.G., Wuertz, J., Schmidtchen, U., (2000), “Analysis of data from spilling experiments performed with liquid hydrogen”, *Journal of Hazardous Materials*, A77 (1-3), pp. 57-75

Venetsanos A.G., Andronopoulos S., Statharas J., Bartzis J.G., (1998), “Local scale dispersion model evaluation exercise”, *Proceedings of the Sixth International Conference AIR POLLUTION 98, Genoa, Italy*

Venetsanos, A.G., Bartzis, J.G., Würtz, J., Papailiou D.D., (2000), “Comparative modeling of a passive release from an L-shaped building using one, two and three-dimensional dispersion models”, *International Journal of Environment and Pollution*, Vol 14, Nos. 1-6, pp. 324-333

Venetsanos, A.G., Vlachogiannis, D., Papadopoulos, A., Bartzis, J.G., Andronopoulos, S., (2002), “Studies on pollutant dispersion from moving vehicles”, *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, Vol 2, pp. 325-337

Venetsanos, A.G., Huld, T., Adams, P., Bartzis, J.G., (2003), “Source, dispersion and combustion modeling of an accidental release of hydrogen in an urban environment”, *Journal of Hazardous Materials*, A105, pp. 1-25

Venetsanos, A.G., Bartzis, J.G., Andronopoulos, S., (2004), “One Equation Turbulence Modeling for Atmospheric and Engineering Applications”, *Boundary-Layer Meteorology*, 113, pp. 321-346

Venetsanos A.G., Bartzis J.G., (2007), “CFD modelling of large-scale LH2 spills in open environment”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 32, pp. 2171-2177

Venetsanos A.G., Baraldi D., Adams P., Heggem P.S., Wilkening H., (2008), “CFD Modelling of Hydrogen Release, Dispersion and Combustion for Automotive Scenarios”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 21, pp. 162-184

Venetsanos A.G. et al., (2009), “ADREA-HF CFD code v5.0, Model Description (Physics)”, Version 10 Sept. 2009, NCSR D

Venetsanos A.G., Papanikolaou E., Delichatsios M., Garcia J., Hansen O.R., Heitsch M., Huser A., Jahn W., Jordan T., Lacombe J-M., Ledin H.S., Makarov D., Middha P., Studer E., Tchouvelev A.V., Teodorczyk A., Verbecke F., Van der Voort M.M., (2009), “An Inter-Comparison Exercise On the Capabilities of CFD Models to Predict the Short and Long Term Distribution and Mixing of Hydrogen in a Garage”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, Issue 14, pp. 5912-5923

Vlachogiannis, D., Rafailidis, S., Bartzis, J.G., Andronopoulos, S., Venetsanos, A.G., (2002), “Modelling of Flow and Pollution Dispersion in Different Urban Canyon Geometries”, *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, Vol 2, pp. 405-417

Wuertz, J.G. Bartzis, A.G. Venetsanos, S. Andronopoulos, J. Statharas, R. Nijsing, (1996), “A Dense Vapour Dispersion Code Package for Applications in the Chemical and Process Industry”, *Journal of Hazardous Materials*, 46, pp. 273-284