

ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ —

ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΕΜΠΕΡΙΣΤΑΤΩΜΕΝΗΣ ΓΝΩΜΗΣ

Θεσσαλονίκη 30.6.2025

Συντάκτης: Κωνσταντίνος Γ. Πασπαλάς, Διπλ. Μηχανολόγος-Ηλεκτρολόγος
Επιστημονικός Συνεργάτης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τηλ. 6909438219
e-mail: paspalas@meng.auth.gr

Σημείωση 1: Ο συντάκτης εκπροσωπεί το ΑΠΘ σε Τεχνικές Επιτροπές Τυποποίησης του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης ΕΛΟΤ για τα Αέρια Καύσιμα και την Πυροπροστασία και αντίστοιχα τον ΕΛΟΤ στην Ευρωπαϊκή Τεχνική Επιτροπή Τυποποίησης CEN/TC 234 Infrastructure. Η παρούσα Τεχνική Έκθεση εκφράζει προσωπικές επιστημονικές απόψεις του συντάκτη, οι οποίες δεν δεσμεύουν το ΑΠΘ.

Σημείωση 2: Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί βελτίωση προηγούμενης, από 2.6.2025, λόγω περαιτέρω ανάλυσης και πρόσθεσης επεξηγηματικών αναφορών.

1 Αντικείμενο της Τεχνικής Έκθεσης

Διερεύνηση της ταυτότητας της υγρής ουσίας η οποία συμμετείχε στην έκρηξη μετά την σύγκρουση μιας εμπορικής και μιας επιβατικής αμαξοστοιχίας στα Τέμπη στις 28.2.2023.

2 Νομοθεσία

2.1 Ελληνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία

[N1] Οδηγία 1999/92/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 16ης Δεκεμβρίου 1999, σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για τη βελτίωση της προστασίας της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων οι οποίοι είναι δυνατόν να εκτεθούν σε κίνδυνο από εκρηκτικές ατμόσφαιρες

[N2] Π. Δ. 42 (ΦΕΚ 44 Α/21.3.2003) - Σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για τη βελτίωση της προστασίας της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων οι οποίοι είναι δυνατόν να εκτεθούν σε κίνδυνο από εκρηκτικές ατμόσφαιρες σε συμμόρφωση με την οδηγία 1999/92/ΕΚ της 16ης Δεκεμβρίου 1999 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου

2.2 Νομοθεσία ξένη (γερμανική)

Σημείωση 1: Η αναφορά σε Τεχνικούς Κανονισμούς άλλου κράτους μέλους της Ευρωπαϊκής Ένωσης οφείλεται στην μη ύπαρξη αντίστοιχου ελληνικού Τεχνικού Κανονισμού ή Τεχνικής Οδηγίας.

Σημείωση 2: Πρόκειται για νομοθεσία του Γερμανικού Ομοσπονδιακού Υπουργείου για την Εργασία και τις Κοινωνικές Υποθέσεις Bundesministerium für Arbeit und Soziales

[B1] TRGS 720: Gefährliche explosionsfähige Gemische – Allgemeines
(Επικίνδυνα εκρηκτικά μίγματα – Γενικά)

[B2] TRGS 721: Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Beurteilung der Explosions-Gefährdung (Επικίνδυνη εκρηκτική ατμόσφαιρα – Εκτίμηση της διακινδύνευσης έκρηξης)

- [B3] TRGS 723: Gefährliche explosionsfähige Gemische – Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Gemische
(Επικίνδυνα εκρηκτικά μίγματα – Αποφυγή της έναυσης επικίνδυνων εκρηκτικών μιγμάτων)

2.3 Πρότυπα

- [S1] IEC 60079-0: Explosive atmospheres – Part 0: Equipment – General requirements
(εναρμονισμένο ως Ευρωπαϊκό πρότυπο EN IEC 60079-0)
Εκρηκτικές ατμόσφαιρες – Μέρος 0: Εξοπλισμός – Γενικές απαιτήσεις
- [S2] IEC 60079-10-1: Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres (εναρμονισμένο ως Ευρωπαϊκό πρότυπο EN IEC 60079-10-1)
Εκρηκτικές ατμόσφαιρες – Μέρος 10-1: Ταξινόμηση περιοχών – Εκρηκτικές ατμόσφαιρες αερίου

Σημείωση: Η IEC (International Electrotechnical Commission) είναι ο αντίστοιχος του ISO οργανισμός για την διεθνή τυποποίηση στα ηλεκτρολογικά, και αντίστοιχη της ευρωπαϊκής CENELEC.

- [S3] EN 13237: Potentially explosive atmospheres – Terms and definitions for equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres
Εκρήξιμες (δυναμικά εκρηκτικές) ατμόσφαιρες – Όροι και ορισμοί για εξοπλισμό για εξοπλισμό και προστατευτικά συστήματα προοριζόμενα για χρήση σε δυναμικά εκρηκτικές ατμόσφαιρες
- [S4] DIN 51603-3: Heizöle – Teil 3: Heizöl S – Mindestanforderungen
Πετρέλαια θέρμανσης – Μέρος 3: Πετρέλαια S (βαρύ μαζούτ) – Ελάχιστες απαιτήσεις

3 Πηγές πληροφοριών

- [Π1] Πόρισμα του ΕΟΔΑΣΑΑΜ για το δυστύχημα στα Τέμπη της 27.2.2025 (αγγλική έκδοση)
- [Π2] Απαντήσεις του Γενικού Χημείου του Κράτους σε ερωτήματα της εφημερίδας ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ στις 27.2.2025
<https://www.kathimerini.gr/society/563488744/tempi-ti-apanta-to-chimeio-toy-kratoys-gia-to-xylolio-ta-elaia-silikonis-kai-tin-pyrosfaira/>
- [Π3] Παρουσιάσεις εμπειρογνομόνων των οικογενειών των θυμάτων και καθηγητών σε ημερίδα στην Πολυτεχνική Σχολή του Αριστοτέλειου Πανεπιστήμιου Θεσσαλονίκης στις 26.2.2025
<https://www.youtube.com/live/4B9JOIHE2Po?si=mbfSQVdspxdN-EUv>
- [Π4] Φωτογραφίες από τις πλατφόρμες των ανοικτών βαγονιών μετά το δυστύχημα.
- [Π5] EDAPO_November2024 λήψη από <https://www.edapo.gr/> και άλλες αναρτήσεις στην ιστοσελίδα της ΕΔΑΠΟ (Επιτροπή Διερεύνησης Ανεξάρτητων Πραγματογνομόνων Οικογενειών)
- [Π6] NFPA: <https://www.nfpa.org/news-blogs-and-articles/blogs/2024/05/01/what-is-arc-flash-and-how-can-you-stay-safer>
- [Π7] Τεχνική Έκθεση κ. Δέδε.
- [Π8] VDI-Wärmeatlas (Heat Atlas), 11. Aufl. Springer 2013, 12. Aufl. Springer 2010
- [Π9] BAYER SILICONES, BAYSILONE FLUIDS M
- [Π10] Επικαιροποιημένη Τεχνική Έκθεση 15/5/2025 των Κokoτσάκη- Παπαδάκη
- [Π11] Yves Carton, Investigation on accident dynamics, explosion, and fire, HELLENIC TRAIN - RAILWAY COMPANY S. A.
- [Π12] Πόρισμα Αχ. Μιχόπουλου και άλλων, 20/3/2025
- [Π13] Έκθεση πραγματογνωμοσύνης, Απ. Βασιλάκος, Στ. Μπατζόπουλος
- [Π14] Συμπληρωματική Έκθεση Αυτοψίας - Διερεύνηση αιτίων πυρκαγιάς της Πυροσβεστικής

- [Π15] Έκθεση πραγματογνωμοσύνης, καθ. Δ. Καρώνης
- [Π16] <https://www.documentonews.gr/article/egklima-tempi-katarriptei-ta-peri-ilektrikon-toxon-kai-elaion-silikonis-o-kathigitis-toy-apth-grigoris-papagiannis/>
- [Π17] Πόρισμα καθ. Παπαγιάννη, 23.5.2025
- [Π18] Baehr, H. D.: Thermodynamik Springer Verlag, 1973, 3. Aufl.
- [Π19] Holman J. P.: Heat Transfer, McGraw-Hill, 2010, 10. ed.

4 Ορισμοί

4.1 Εκρηκτικά μίγματα

4.1.1 Έκρηξη (Explosion)

Έκρηξη είναι μια αιφνίδια αντίδραση οξειδωσης με αύξηση της θερμοκρασίας, της πίεσης ή και των δύο συγχρόνως [B1].

Διακρίνονται

- η υποηχητική έκρηξη, η οποία μεταδίδεται με υποηχητική ταχύτητα (deflagration) και
- η υπερηχητική έκρηξη, η οποία μεταδίδεται με υπερηχητική ταχύτητα (detonation). αυτή χαρακτηρίζεται από ένα κρουστικό κύμα.

4.1.2 Εκρηκτική ατμόσφαιρα (Explosive atmosphere, ορισμός εκ της Οδηγίας 1999/92/EK)

Ως εκρηκτική ατμόσφαιρα νοείται μίγμα με αέρα, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, εύφλεκτων ουσιών υπό μορφή αερίων, ατμών, συγκεντρώσεων σταγονιδίων (αερολυμάτων) ή σκόνης, στο οποίο, μετά την ανάφλεξη, η καύση μεταδίδεται στο σύνολο του μη καιομένου μίγματος. [N1, N2]

Σημείωση: Για διευκρίνιση, η λέξη “ανάφλεξη” της ελληνικής έκδοσης της Οδηγίας 1999/92/EK αποτελεί μετάφραση του όρου “ignition” της αγγλικής έκδοσης.

4.1.3 Αναφλέξιμο αερόλυμα

Σταγονίδια υγρού, διασπαρμένα στον αέρα, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια εκρηκτική ατμόσφαιρα [S2].

Σημείωση: Τα αερολύματα είναι επίσης γνωστά ως αεροζόλ (aerosols [S2]). Για την έννοια αερόλυμα (aerosol) συναντώνται οι όροι στα αγγλικά mist και στα γερμανικά Nebel.

4.1.4 Πηγή έναυσης

Πηγή έναυσης είναι υπό όρους μια φυσική, χημική ή τεχνική διαδικασία, κατάσταση ή πορεία εργασιών, η οποία είναι ικανή να προκαλέσει την έναυση μιας εκρηκτικής ατμόσφαιρας [B3].

4.2 Θερμοκρασίες και όρια ανάφλεξης

4.2.1 Θερμοκρασία ή σημείο ανάφλεξης (ή έναυσης)

Είναι η θερμοκρασία η προσδιορισμένη υπό καθορισμένες συνθήκες δοκιμής, στην οποία πρέπει να θερμανθεί το σύστημα καυσίμου και αέρα (ώστε να λάβει την αναγκαία ενέργεια ενεργοποίησης E_E με βάση τον νόμο του Arrhenius ($MIE = \text{minimum ignition energy}$)) για να μπορέσει να ξεκινήσει η χημική αντίδραση (καύση). (Αγγλικός όρος Ignition Point, γερμανικός Zündtemperatur).

Σημείωση 1: Συχνότατα αναφέρεται ως Auto-ignition Point (θερμοκρασία αυτανάφλεξης) [S2].

Σημείωση 2: Δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ θερμοκρασίας ανάφλεξης και θερμοκρασίας αυτανάφλεξης. Με τον όρο αυτανάφλεξη ουσιαστικά εννοείται ανάφλεξη χωρίς σπινθήρα ή φλόγα.

4.2.2 Θερμοκρασία ή σημείο φλόγας (υγρού)

Είναι η υπό καθορισμένες συνθήκες δοκιμής προσδιορισμένη ελάχιστη θερμοκρασία, στην οποία ένα υγρό αποδίδει καύσιμους ατμούς σε τέτοια ποσότητα, ώστε αυτή να σχηματίσει αναφλέξιμο μίγμα

(εντός των ορίων ανάφλεξης) με τον αέρα τον ευρισκόμενο επάνω από την επιφάνεια του υγρού, το οποίο μίγμα αν έλθει σε επαφή με μια ενεργή πηγή έναυσης προκύπτει αμέσως φλόγα και καίγεται λάμποντας για σύντομο χρόνο. [S3] (Αγγλικός όρος Flash Point, γερμανικός Flammpunkt).

Σημείωση 1: Ο όρος θα μπορούσε να αποδοθεί και ως θερμοκρασία ή σημείο αναλαμπής ή λάμψης (flash).

Σημείωση 2: Συχνότατα αναφέρεται (εσφαλμένα) ως θερμοκρασία αναφλεξιμότητας ή και ανάφλεξης, ενώ αυτή η θερμοκρασία (Flash Point) **δεν προκαλεί ανάφλεξη**.

4.2.3 Θερμοκρασία ή σημείο καύσης

Λίγο επάνω από την θερμοκρασία φλόγας κείται η θερμοκρασία ή σημείο καύσης, στην οποία οι παραγόμενοι ατμοί είναι τόσοι, ώστε να συνεχίζουν να καίονται μετά την απομάκρυνση της φλόγας. (αγγλικός όρος Fire Point, γερμανικός Brennpunkt).

4.2.4 Όρια έκρηξης

Όρια έκρηξης είναι τα όρια της περιοχής έκρηξης. Το κατώτερο όριο έκρηξης (LEL) και αντίστοιχα το ανώτερο όριο έκρηξης (UEL) είναι το κατώτερο και αντίστοιχα το ανώτερο όριο συγκέντρωσης (μοριακό κλάσμα) μιας καύσιμης ουσίας σε ένα μίγμα αερίων, ατμών, αερολυμάτων ή σκονών με αέρα, στο οποίο μετά την έναυση μια ανεξάρτητη από την πηγή έναυσης φλόγα δεν μπορεί πλέον να διαδίδεται αυτόνομα [B1].

4.2.4.1 Κατώτερο όριο έκρηξης (LEL= lower explosive limit)

Η συγκέντρωση μιας καύσιμης ουσίας σε αέρα, κάτω από την οποία δεν δημιουργείται εκρηκτική ατμόσφαιρα αερίου.

4.2.4.2 Ανώτερο όριο έκρηξης (UEL= upper explosive limit)

Η συγκέντρωση μιας καύσιμης ουσίας σε αέρα, επάνω από την οποία δεν δημιουργείται εκρηκτική ατμόσφαιρα αερίου.

4.3 Παρατηρήσεις ως προς την εφαρμογή της ορολογίας

Σχεδόν σε όλες τις Τεχνικές Εκθέσεις Ελλήνων πραγματογνωμόνων (π.χ. Δέδες (σελ. 90), Μιχόπουλος (σελ. 24), Πυροσβεστική (σελ. 18), ΕΔΑΠΟ (update 17/11/23)) ως κριτήριο εκρηκτικότητας λαμβάνεται το **flash point** και ονοματίζεται ως θερμοκρασία ανάφλεξης, σε αντιπαράθεση με την ευρωπαϊκή Οδηγία 1999/92/ΕΚ, η οποία ορίζει ως θερμοκρασία ανάφλεξης το ignition point.

Ο καθ. κ. Καρώνης (σελ. 7) αναφέρει ότι

“Το σημείο ανάφλεξης κλειστού δοχείου αντιστοιχεί στη θερμοκρασία στην οποία η τάση ατμών ισορροπίας είναι ίση με το κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας. Η εισαγωγή μιας βοηθητικής πηγής ανάφλεξης στον ελεύθερο χώρο πάνω από την επιφάνεια του υγρού προκαλεί μια γρήγορη εμφάνιση φλόγας.”

Όμως αυτός είναι ο ορισμός του Flash point, βλέπε και το επίσημο γερμανικό εγχειρίδιο VDI-Wärmeatlas (Heat Atlas) (κεφάλαιο D4.3) [Π8]

Αμελείται η επίσημη με βάση την Οδηγία ορολογία: σημείο ανάφλεξης = ignition point.

5 Προσδιορισμός του διερευνώμενου φαινομένου

Στις 28.2.2023 έλαβε χώρα στα Τέμπη σύγκρουση δύο αμαξοστοιχιών, μιας εμπορικής, κινούμενης από 2 ηλεκτράμαξες, και μια επιβατικής κινούμενης από 1 ηλεκτράμαξα.

Οι αμαξοστοιχίες κινούνται από ηλεκτράμαξες, οι οποίες λαμβάνουν ρεύμα από αγωγούς τάσης 25.000 V και τροφοδοτείται μετασχηματιστής ο οποίος στην συνέχεια τροφοδοτεί

ηλεκτροκινητήρα.

Κατά την σύγκρουση των τρένων έλαβαν χώρα 2 βραχυκυκλώματα τα οποία δημιούργησαν ηλεκτρικά τόξα. 0,7 s μετά την σύγκρουση και 0,54 s μετά από τα βραχυκυκλώματα ξεκίνησε η πυρόσφαιρα, όπως κατέγραψαν κάμερες, εικόνα 1. [Π3, Π17]



Εικόνα 1 Ηλεκτρικά τόξα και ανάφλεξη

Τα ηλεκτρικά τόξα, όπως φαίνεται από τις καταγραφές των καμερών, ήταν **πολύ έντονα**. Αυτό σημαίνει ότι με τα βραχυκυκλώματα και τα ακόλουθα ηλεκτρικά τόξα **εκλύθηκαν μεγάλες ποσότητες ενέργειας**, καθώς **διαφορετικά δεν θα προέκυπτε τόσο έντονη ακτινοβολία**.

Σημείωση 1: Κάθε ηλεκτράμαξα φέρει μετασχηματιστή ονομαστικής ισχύος 6212 kVA, αντίστοιχα **ισχύος περίπου 6.000 kW**, πολύ μεγάλης.

Σημείωση 2: Εκτίμηση των ποσοτήτων ενέργειας οι οποίες εκλύθηκαν με τα βραχυκυκλώματα δίνεται από τον καθ. κ. Παπαγιάννη, περίπου 5,1 kWh.

Η ποσότητα των 5,1 kWh μπορεί να ελεγχθεί με βάση τις μετρήσεις των σχετικών υποσταθμών της HELLENIC TRAIN, εάν αυτές καταγράφηκαν και οι καταγραφές διατηρούνται ακόμη.

Τα ηλεκτρικά τόξα διατηρήθηκαν ελάχιστο χρόνο. Στα ηλεκτρικά τόξα εκτιμάται ότι αναπτύχθηκαν θερμοκρασίες άνω των 3.000°C.

Σημείωση: Στα ηλεκτρικά τόξα γενικά αναπτύσσονται θερμοκρασίες άνω των 3.000°C. Ο αμερικανικός οργανισμός NFPA αναφέρει θερμοκρασίες μέχρι και 19.000°C. Ένας πραγματογνώμων αναφέρει θερμοκρασία 5.000°C [Π11]. Στην περίπτωση ηλεκτροσυγκολλήσεων αναπτύσσονται θερμοκρασίες 3.800 ÷ 4.200°C. Ο καθ. κ. Παπαγιάννης υποδεικνύει θερμοκρασία πολύ υψηλή, > 5.000 K [Π17].

Από τα ηλεκτρικά τόξα δημιουργήθηκε μια εκτεταμένη περιοχή, στην οποία αναπτύχθηκαν στην μάζα του αέρα θερμοκρασίες ανάλογες προς τις θερμοκρασίες των τόξων. Εκτιμάται ότι σε μια μεγάλη μάζα αέρα αναπτύχθηκε θερμοκρασία περί τους 3.000°C.

Μετά την σύγκρουση των τρένων έλαβε χώρα μια έκρηξη, η οποία δεν ήταν έκρηξη εκρηκτικής ουσίας όπως η δυναμίτιδα, το TNT (τρινιτροτολουένιο) κλπ. και επομένως **έλαβε χώρα έκρηξη μιας εκρηκτικής ατμόσφαιρας**.

Ως «εκρηκτική ατμόσφαιρα» νοείται μίγμα με αέρα, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, εύφλεκτων ουσιών υπό μορφή αερίων, ατμών, συγκεντρώσεων σταγονιδίων ή σκόνης, στο οποίο, μετά την ανάφλεξη, η καύση μεταδίδεται στο σύνολο του μη καιομένου μίγματος [N1].

(Εσφαλμένα γράφεται στα ελληνικά εύφλεκτων. Είναι αναφλέξιμα (*flammable*), δηλαδή καυστά).

Συγκεκριμένα έλαβε χώρα μια

υποηχητική έκρηξη (deflagration) αερολύματος (μίγματος σταγονιδίων υγρού καύσιμου με τον ατμοσφαιρικό αέρα),

φαινόμενο το οποίο καλύπτεται από Ευρωπαϊκή Οδηγία,

— την Οδηγία 1999/92/EK [N1] για τις εκρηκτικές ατμόσφαιρες

(και αντίστοιχα το Προεδρικό Διάταγμα [N2]), αλλά και από

— το διεθνές πρότυπο IEC 60079-10-1 [S2] εναρμονισμένο ως ευρωπαϊκό πρότυπο EN IEC 60079-10-1.

Τα διεθνή πρότυπα είναι προϊόντα παγκόσμιας συνεργασίας και αποδοχής.

6 Το φαινόμενο της έκρηξης εκρηκτικής ατμόσφαιρας

Σύμφωνα με την Οδηγία 1999/92/EK [N1, N2] ως εκρηκτική ατμόσφαιρα νοείται μίγμα με αέρα, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, καυστών (αναφλέξιμων) ουσιών υπό μορφή

- αερίων, (π.χ. φυσικό αέριο, μεθάνιο, υδρογόνο)
- ατμών, (π.χ. τα υγραέρια τα οποία μέσα στην φιάλη είναι υγρά υπό πίεση, ενώ όταν εξέλθουν στην ατμόσφαιρα εξατμίζονται τάχιστα, δηλαδή μεταβαίνουν στην αέρια φάση)
- αερολυμάτων (π.χ. σταγονιδίων ελαίων, σταγονιδίων υγρών υδρογονανθράκων) ή
- σκόνης, (π.χ. σκόνη αμύλου, σκόνη καφέ, σκόνη ξύλου)

στο οποίο μίγμα, μετά την ανάφλεξη, η καύση μεταδίδεται στο σύνολο του μη καιομένου μίγματος.

Φυσικά σε κάποιες περιπτώσεις συνυπάρχουν στο μίγμα με αέρα περισσότερες μορφές της ίδιας ουσίας, όπως σταγονίδια και ατμοί της. Η ύπαρξη αυξημένων ποσοτήτων ατμών (η οποία σημαίνει χαμηλή θερμοκρασία φλόγας (flash point)) σημαίνει ευνοϊκή συμμετοχή στην έκρηξη του αερολύματος, **όχι όμως το καθοριστικό αίτιο της έκρηξης.**

Στην περίπτωση των σταγονιδίων (και αντίστοιχα των σκονών) το μέγεθός τους πρέπει να είναι μικρό, γενικά διάμετρος μέχρι $0,5 \pm 1,0$ mm. Δεν έχουν όλα τα σταγονίδια την ίδια διάμετρο.

Ένα μίγμα αέρα/αναφλέξιμης (καυστής) ουσίας μπορεί να αποτελεί εκρηκτική ατμόσφαιρα εντός των ορίων έκρηξής του, δηλαδή εντός συγκεκριμένων ορίων τιμών της αναλογίας αέρα/καύσιμης ουσίας στο μίγμα.

Επειδή στις αμαξοστοιχίες δεν υπήρχαν

- δεξαμενές αερίων,
- δεξαμενές υγραερίων ή
- δοχεία σκόνης,

τεκμαίρεται ότι έλαβε χώρα έκρηξη νέφους σταγονιδίων υγρού.

Έκρηξη νέφους σταγονιδίων θα είχαμε ακόμη και αν αντί των ελαίων της ηλεκτράμαξας το υγρό ήταν κάποιος άλλος υγρός υδρογονάνθρακας.

Τα αίτια της ανάφλεξης γενικά μπορούν να είναι ποικίλα, βλέπε την γερμανική νομοθεσία [B3]:

- 1) πολύ θερμές επιφάνειες,
- 2) φλόγες και θερμά αέρια,
- 3) πηγές έναυσης από μηχανικές διαδικασίες τριβής, κρούσης και διαχωρισμού,
- 4) ηλεκτρικές εγκαταστάσεις,
- 5) ηλεκτρικά ρεύματα αντιστάθμισης, καθοδική προστασία έναντι διάβρωσης,
- 6) στατικός ηλεκτρισμός,
- 7) πλήγμα κεραυνού,
- 8) ηλεκτρομαγνητικά πεδία στην περιοχή των συχνοτήτων από 9×10^3 Hz έως 3×10^{11} Hz,
- 9) ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην περιοχή των συχνοτήτων από 3×10^{11} Hz έως 3×10^{15} Hz ή αντίστοιχα μήκη κύματος από 1.000 μm έως 0,1 μm (οπτική περιοχή φάσματος),
- 10) ιονίζουσα ακτινοβολία,
- 11) υπέρηχος,
- 12) αδιαβατική συμπίεση, κρουστικά κύματα, ρέοντα αέρια,
- 13) χημικές αντιδράσεις.

Στην θεωρούμενη περίπτωση από τις περιστάσεις προκύπτει ότι ως **αίτια της ανάφλεξης υπήρξαν** βασικά

- **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία** (από τα ηλεκτρικά τόξα)
 - **θερμά αέρια** (θέρμανση του αέρα από τα ηλεκτρικά τόξα, στα οποία η θερμοκρασία υπερέβη τους 3.000°C)
- αλλά και δευτερευόντως

- ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και
- μηχανικές διαδικασίες κρούσης (σύγκρουσης των αμαξοστοιχιών).

Αν δεν είχαν λάβει χώρα τα ηλεκτρικά τόξα, τα δευτερεύοντα αίτια σε καμμία περίπτωση δεν θα έδιναν επαρκή ενέργεια για την ενεργοποίηση της έκρηξης και η έκρηξη δεν θα είχε συμβεί.

Σημείωση: Καμμία πραγματογνωμοσύνη δεν υποδεικνύει κάποιο άλλο αίτιο ανάφλεξης.

Η εξέλιξη του φαινομένου εξαρτάται από

- τις φυσικές ιδιότητες της καύσιμης ουσίας, βασικά
 - την ενέργεια ενεργοποίησης E_E της χημικής αντίδρασης και
 - την θερμογόνο δύναμη H_i , δηλαδή την ενέργεια η οποία εκλύεται από την χημική αντίδραση, (οι οποίες εκτιμώνται κατωτέρω),
- την περιεκτικότητα της καύσιμης ουσίας στο μίγμα με τον αέρα,
- το μέγεθος των σταγονιδίων στην προκειμένη περίπτωση,
- την κατανομή των πηγών έναυσης.

Κατά την καύση των ουσιών μετά την έναυση στην περίπτωση του αερολύματος καίγονται πλήρως σταγονίδια κάτω από ένα μέγεθος. Από τα υπόλοιπα σταγονίδια κάποια καίγονται ατελώς, οπότε παράγεται αιθάλη, ενώ μπορεί να συνεχισθεί η καύση όταν καταπέσουν στο έδαφος (ή πάτωμα).

7 Εξέλιξη του διερευνώμενου φαινομένου

7.1 Αναφλέξιμα υγρά στις αμαξοστοιχίες

Στις αμαξοστοιχίες υπήρχαν αποδεδειγμένα σε σημαντικές για την έκρηξη ποσότητες ως αναφλέξιμα υγρά τα έλαια των κυκλωμάτων ψύξης των μετασχηματιστών.

Κάθε κύκλωμα μετασχηματιστή περιείχε 2.400 kg, συνολικά στις 3 ηλεκτράμαξες
 $3 \times 2.400 = 7.200 \text{ kg}$

Τα έλαια είναι έλαια χρησιμοποιούμενα ως φορέας μετάδοσης θερμότητας για την ψύξη των μετασχηματιστών, οι οποίοι θερμαίνονται κατά την λειτουργία τους, μέσω εναλλακτών θερμότητας (ψυκτήρων, αντίστοιχων προς τα ψυγεία των αυτοκινήτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης).

Στο κύκλωμα μετασχηματιστών - εναλλακτών θερμότητας αναπτύσσεται θερμοκρασία ελαίου 90°C επάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος

Στις συγκεκριμένες ηλεκτράμαξες χρησιμοποιείται ένα έλαιο, αποκαλούμενο έλαιο σιλικόνης, PDMS oil.

Πρόκειται για το **Polydimethylsiloxane**, ελληνικά πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο, με χημικό τύπο $\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$, $n \approx 20$, CAS Nr 9006-65-9,

Το έλαιο αυτό αναφέρεται ως “έλαιο σιλικόνης” από τον αγγλικό όρο “silicone oil”, στον οποίο η λέξη “silicone” σημαίνει το στοιχείο **πυρίτιο**.

Έλαια πυριτίου περιλαμβάνονται ήδη στο περίφημο γερμανικό εγχειρίδιο VDI-Wärmeatlas, (Heat Atlas) (κεφάλαιο D4.3) [Π8].

Πρόκειται για το έλαιο [Π9]

Baysilone M50 EL της Bayer

Στα έγγραφα της Bayer δίνονται για το έλαιο

— Θερμοκρασία φλόγας κατά DIN 51376

Flash point > 300°C

— Θερμοκρασία καύσης κατά DIN 51376

Fire point > 350 °C

— Θερμοκρασία ανάφλεξης κατά DIN 51794

Ignition temperature > 400°C

Από άλλο παραγωγό (Fisher Scientific) και το πόρισμα του ΕΟΔΟΣΑΑΜ λαμβάνεται θερμοκρασία ανάφλεξης Ignition temperature = 450°C

(Αντίστοιχα το φυσικό αέριο έχει θερμοκρασία ανάφλεξης 640°C).

Από την Έκθεση πραγματογνωμοσύνης του καθ. Καρώνη ([Π15], σελ. 113)) λαμβάνεται ότι το έλαιο έχει

— ενθαλπία (ενέργεια) εξάτμισης $\Delta H_E = 0,92 \text{ kWh/kg}$ (3,3 MJ/kg)

και αντίστοιχα

— κατώτερη θερμογόνο δύναμη (δηλαδή ενέργεια εκλυόμενη από την καύση) $H_i \approx 6,9 \text{ kWh/kg}$ (24,8 MJ/kg)

Σημείωση 1: Οι τιμές της ενέργειας δίνονται και σε kWh, ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή τους με ενέργειες ηλεκτρικής προέλευσης.

Σημείωση 2: Οι ακόλουθοι υπολογισμοί αναλύονται εκτενέστερα μαζί με άλλους στο Παράρτημα Α.

Η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης (ignition temperature) 450°C, σε συνδυασμό με

— την ενθαλπία εξάτμισης του ελαίου $\Delta H_E = 0,92 \text{ kWh/kg}$

— την ειδική θερμοχωρητικότητα του ελαίου $c = 1,5 \text{ kJ/kgK}$, οπότε αντιστοιχούν για την θέρμανση του ελαίου 0,19 kWh/kg,

— την μάζα του αέρα καύσης του ελαίου $m \approx 8 \text{ kg/kg}$ (από την ισομετρική εξίσωση καύσης), οπότε αντιστοιχεί για την θέρμανση του αέρα 1,0 kWh/kg (με $c = 1,0 \text{ kJ/kgK}$)

αποδίδει ενέργεια ενεργοποίησης της καύσης E_E περίπου (0,92 + 0,19 + 1,0)

$E_E \approx 2,1 \text{ kWh/kg}$

Εάν ο αέρας ήταν ήδη θερμός στους 450°C, η απαιτούμενη ενέργεια για την εκκίνηση της καύσης θα ήταν περίπου 1,1 kWh/kg.

Από

— την σχετικά χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης (ignition temperature) 450°C, και

— την όχι πολύ υψηλή τιμή $E_E \approx 2,1 \text{ kWh/kg}$ προκύπτει ότι

το έλαιο Baysilone M50 EL είναι αναμφισβήτητα αναφλέξιμο.

Από το υψηλό σημείο φλόγας flash point > 300°C, προκύπτει ότι το έλαιο δίνει λίγους ατμούς. Από αυτό το δεδομένο σε πρώτη ανάγνωση φαίνεται ότι το έλαιο δύσκολα θα οδηγηθεί σε έκρηξη.

Στο πρότυπο IEC 60079-10-1 σχετικά ορίζεται όμως στο πεδίο εφαρμογής:

Flammable mists may also form when liquids not considered to be a hazard due to the high flash point are released under pressure.

Δηλαδή:

Εύφλεκτα αερολύματα μπορεί να σχηματισθούν επίσης όταν υγρά, τα οποία δεν θεωρούνται ότι αποτελούν κίνδυνο εξ αιτίας του υψηλού σημείου φλόγας, εκλύονται υπό πίεση.

Περαιτέρω στο πρότυπο IEC 60079-10-1 ορίζεται για τα αερολύματα:

Even the liquids that can be considered as non hazardous at process temperatures, in some situations may form a flammable mist which may then give rise to an explosion hazard. Examples of liquids that are commonly considered in this regard include high flash point liquid fuels, heat exchange oils and lubricating oils.

Δηλαδή:

Ακόμη και **τα υγρά** τα οποία μπορούν να θεωρούνται ως μη επικίνδυνα στις θερμοκρασίες της διεργασίας, σε μερικές καταστάσεις **μπορεί να σχηματίσουν ένα εύφλεκτο αερόλυμα**, το οποίο μπορεί τότε να προκαλέσει έναν κίνδυνο έκρηξης. **Παραδείγματα υγρών τα οποία συνήθως**

εξετάζονται από αυτήν την άποψη περιλαμβάνουν υγρά καύσιμα υψηλού σημείου φλόγας, **έλαια εναλλακτών θερμότητας** και λιπαντικά έλαια. Και είναι γνωστό ότι το δεδομένο έλαιο σιλικόνης χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε εναλλάκτες θερμότητας για την ψύξη των μετασχηματιστών.

Περαιτέρω στο πρότυπο IEC 60079-10-1 ορίζεται στο παράστημα G

Note 3: Fuel droplet clouds have generally been found difficult to ignite, unless there is sufficient mass of vapour or very small droplets present.

Δηλαδή:

Σημείωση 3: Σύννεφα σταγονιδίων καυσίμων έχει γενικά βρεθεί ότι είναι δύσκολο να αναφλεγούν, εκτός εάν υπάρχει επαρκής μάζα ατμού ή παρουσία πολύ μικρών σταγονιδίων.

Συμπεραίνεται ότι για την ανάφλεξη των σταγονιδίων πρέπει να υφίστανται συνθήκες ευνοϊκές για το φαινόμενο, δηλαδή

- χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης (ignition temperature),
 - μη υπερβολική τιμή της ενέργειας ενεργοποίησης της χημικής αντίδρασης,
 - σταγονίδια μικρού μεγέθους,
 - κατάλληλη πηγή έναυσης
- και με βάση την Θερμοδυναμική
- θερμογόνος δύναμη (ενέργεια της καύσης) υψηλότερη από την ενέργεια ενεργοποίησης.

Η θερμοκρασία ανάφλεξης είδαμε ότι είναι χαμηλή (Ignition temperature = 450°C), και η ενέργεια ενεργοποίησης 2,1 kWh/kg πολύ μικρότερη από την θερμογόνο δύναμη 6,9 kWh/kg.

Σταγονίδια μικρού μεγέθους είδαμε ότι αναφέρεται ότι παράγονται όταν εκλύονται υπό πίεση.

Σημείωση: Με βάση την Ρευστομηχανική (βλέπε την εξίσωση Bernoulli) η πίεση μπορεί να αντιστοιχίζεται σε κινητική ενέργεια, εξαρτώμενη από την πυκνότητα του υγρού και την ταχύτητα στο τετράγωνο, βλέπε και την §7.4.

7.2 Αναφλεξιμότητα του ελαίου

Ο καθ. κ. Κωνσταντόπουλος απεφάνθη ότι δεν είναι δυνατή η ανάφλεξη του ελαίου σιλικόνης λόγω κινητικής των χημικών αντιδράσεων [Π1]:

“Η μεγάλη πυρσφαιρα στο σιδηροδρομικό ατύχημα των Τεμπών που αναδύθηκε σε χρονική απόσταση 0.4 sec από τη σύγκρουση των τρενών, δεν μπορεί να αποδοθεί στο έλαιο μετασχηματιστών (PDMS) το οποίο αν και εύφλεκτο σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (όπως ορίζει το έγγραφο τεχνικών προδιαγραφών > 400 °C) δεν θα μπορούσε να αναφλεγεί στο επικρατούν περιβάλλον (εξαιτίας κινητικών παραγόντων αντίδρασης).”

Η απλή αναφορά ότι ο χρόνος δεν είναι επαρκής για την μετάδοση θερμότητας, **με δεδομένο το υψηλής ενέργειας ηλεκτρικό τόξο** μέσα από το οποίο διήλθαν τα σταγονίδια, **δεν αποτελεί επιστημονική τεκμηρίωση με βάση τις αρχές της Μετάδοσης Θερμότητας**, βλέπετε το Παράρτημα Β.

Με βάση τις αρχές της Μετάδοσης Θερμότητας έλαβε έντονη μετάδοση θερμότητας

- με ακτινοβολία από το ηλεκτρικό τόξο (λιγότερο),
 - με συναγωγή λόγω υψηλής ταχύτητας των σταγονιδίων μέσα από πολύ θερμό αέρα (περισσότερο).
- (Εκτίμηση της ισχύος της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή δίνεται στην §7.3)

Ο καθ. κ. Καρώνης αναφέρει (σελ. 36)

“Η καύση του ελαίου σιλικόνης είναι μικρότερης έκτασης από τα άλλα έλαια επειδή ένα στρώμα υπολειμματικού διοξειδίου του πυριτίου που σχηματίζεται από την καύση καλύπτει την επιφάνεια του ελαίου σιλικόνης και διακόπτει την παροχή οξυγόνου στο υγρό σιλικόνης κάτω από την φλόγα. Ωστόσο αυτές οι ιδιότητες μπορεί να είναι λιγότερο σημαντικές όταν το έλαιο διαρρέει πάνω σε κατακόρυφη επιφάνεια, η οποία θα διέλυε το στρώμα διοξειδίου του πυριτίου.”

Όμως στην θεωρούμενη περίπτωση η καύση έλαβε χώρα σε σταγονίδια του ελαίου και όχι σε στρώμα, οπότε δεν ισχύει ο πιθανός περιορισμός.

7.3 Πηγές έναυσης

Δεν έχει υποδειχθεί από τις πραγματογνωμοσύνες κάποιο άλλο αίτιο ενεργοποίησης της έκρηξης, οπότε **δεν μπορεί να αμφισβητηθεί ότι το αίτιο ανάφλεξης ήταν τα ηλεκτρικά τόξα.** Διαφορετικά **δεν θα είχε λάβει χώρα η έκρηξη**, επειδή τα δευτερεύοντα αίτια, δηλ. οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και οι μηχανικές διαδικασίες σύγκρουσης των αμαξοστοιχιών σε καμμία περίπτωση δεν θα έδιναν επαρκή ενέργεια για την ενεργοποίηση της έκρηξης.

Μπορούμε σαφώς να ορίσουμε ότι στην θεωρούμενη περίπτωση οι σημαντικές πηγές έναυσης ήταν

- ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και
 - θερμά αέρια
- από τα ηλεκτρικά τόξα.

Η μετάδοση θερμότητας με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τα ηλεκτρικά τόξα ήταν έντονη αλλά διήρκεσε πολύ λίγο.

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή από τα θερμά αέρια τα οποία προέκυψαν από τα ηλεκτρικά τόξα ήταν επίσης έντονη και διήρκεσε περισσότερο.

Με έναν συντηρητικό συντελεστή συναγωγής $\alpha = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (συνήθη σε περιβαλλοντικές συνθήκες, βλέπετε τον Κανονισμό Θερμομόνωσης) και θερμοκρασιακή διαφορά 3000°C είχαμε στην έναρξη του φαινομένου πυκνότητα θερμορροής

$$q = 75 \text{ kW/m}^2 \quad \text{εξαιρετικά υψηλή!}$$

(σε λέβητα πετρελαίου στον θάλαμο καύσης εκτιμάται πυκνότητα θερμορροής $q = 100 \text{ kW/m}^2$)

Σημείωση: Οι υπολογισμοί αποδίδουν λόγω των υψηλών ταχυτήτων των σταγονιδίων εξαιρετικά μεγάλη τιμή του συντελεστή συναγωγής α , βλέπετε το Παράρτημα Β. **Αυτό σημαίνει εξαιρετικά υψηλή τιμή της πυκνότητας θερμορροής από τα ηλεκτρικά τόξα**, μεγαλύτερη από εκείνη στο θάλαμο καύσης λέβητα.

Στην εξέλιξη του φαινομένου, οπότε επικρατούσε η θερμοκρασία της καύσης των σταγονιδίων με αέρα, η θερμοκρασία είχε υψηλή μέση τιμή $\theta_\mu \approx 1250^\circ\text{C}$ (με τιμή αδιαβατικής θερμοκρασίας καύσης $\theta_{ad} \approx 2000^\circ\text{C}$), βλέπε εκτίμηση στο Παράρτημα Α.

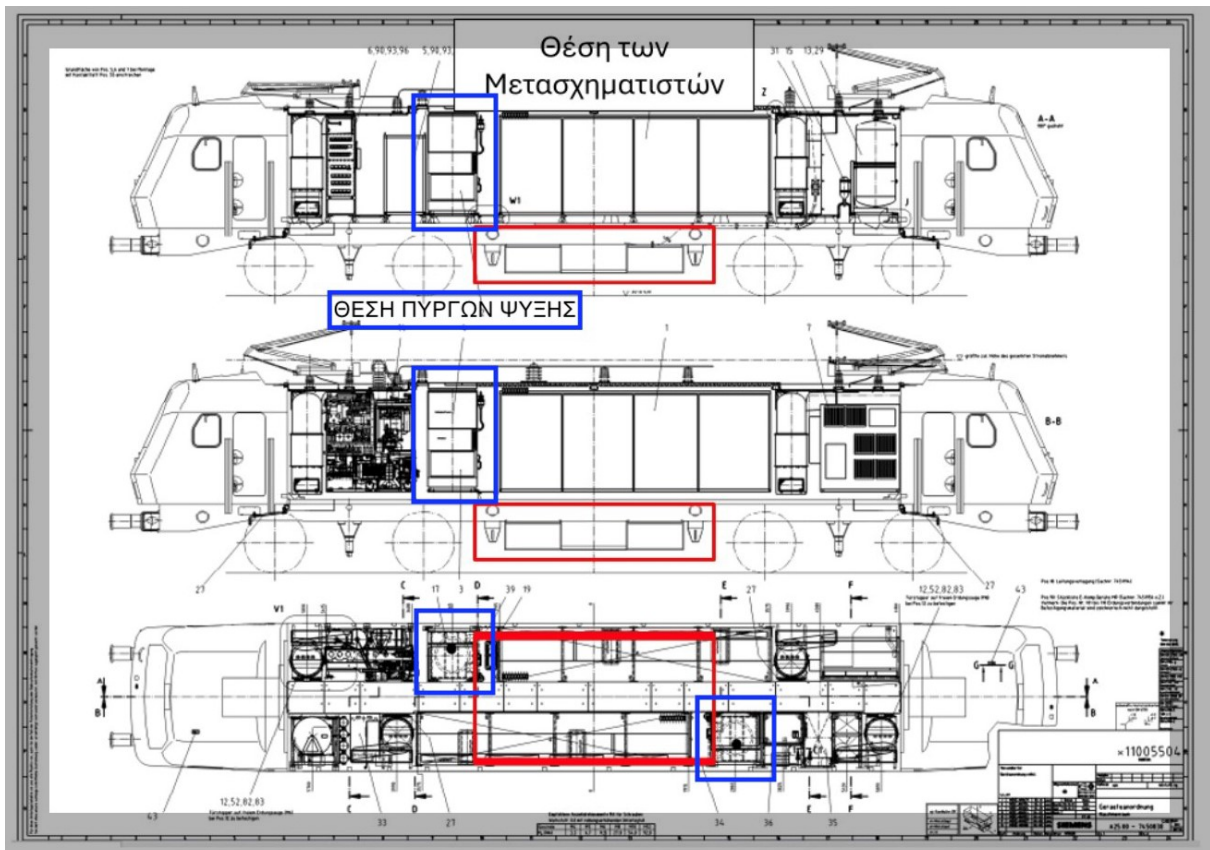
Η μέση θερμοκρασία $\theta_\mu \approx 1250^\circ\text{C}$ είναι αντίστοιχη με την θερμοκρασία η οποία επικρατεί σε φλόγες συνήθων καυσίμων, όπως το πετρέλαιο, και μπορεί να διατηρεί την φλόγα.

7.4 Εκτόξευση σταγονιδίων

Κατ' αρχήν εξετάζουμε την δομή μιας ηλεκτράμαξας, εικόνα 2, και του κυκλώματος του μετασχηματιστή, εικόνα 3.

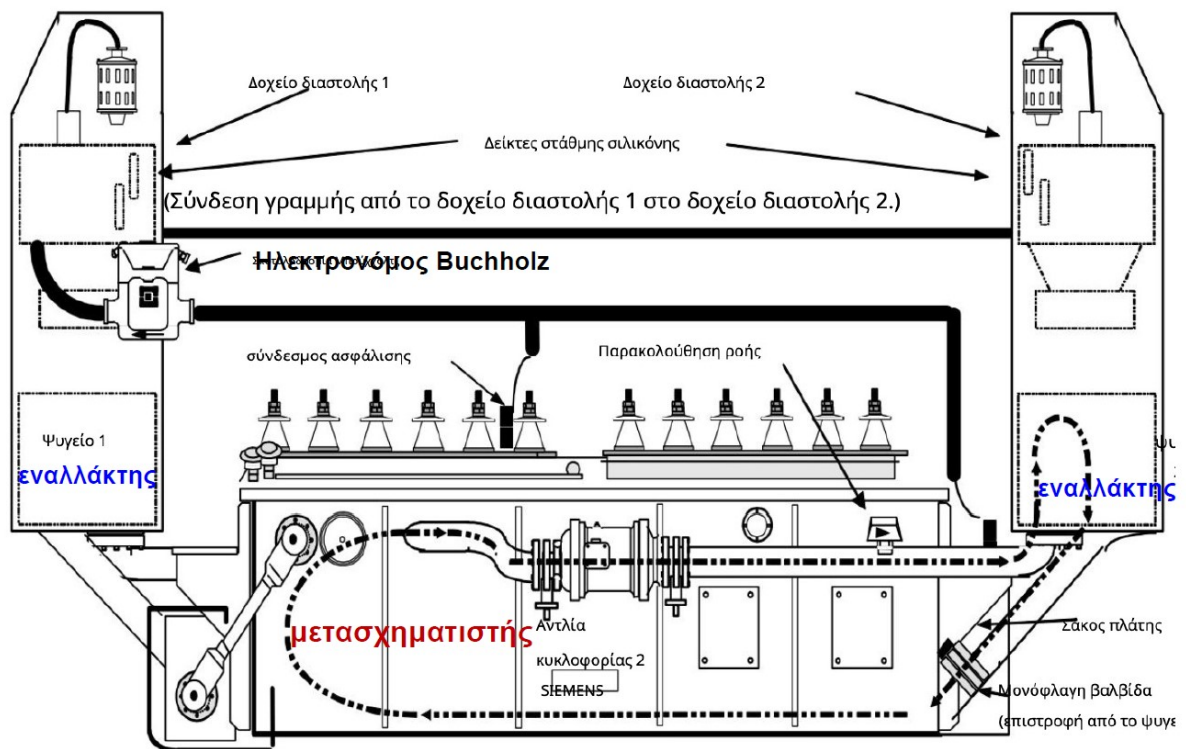
Στις εικόνες φαίνονται

- ο μετασχηματιστής
 - 2 πύργοι ψύξης που περιλαμβάνουν εναλλάκτες θερμότητας (αερόψυκτους) και δοχεία διαστολής
 - αντλίες και σωληνώσεις
- στα οποία εμπεριέχονται τα 2400 kg ελαίου,
- ένα μέρος μέσα στον μετασχηματιστή,
 - ένα μέρος μέσα στους πύργους ψύξης,
 - ένα μέρος μέσα στις σωληνώσεις και τις αντλίες προσαγωγής και απαγωγής του ελαίου



Εικόνα 2 Διάταξη του μετασχηματιστή και των πύργων ψύξης

πύργος ψύξης



Εικόνα 3 Διάγραμμα ροής του κυκλώματος του υγρού ψύξης στην ηλεκτράμαξα



Εικόνα 4 Ηλεκτράμαξες μετά την σύγκρουση

Α εμπορικές ηλεκτράμαξες, η μια διαλύθηκε

Β επιβατική ηλεκτράμαξα, διαλύθηκε



Εικόνα 5 Καταστραμμένος μετασχηματιστής

Με την σύγκρουση τουλάχιστον οι 2 ηλεκτράμαξες υπέστησαν εξαιρετικά μεγάλες καταστροφές, κυριολεκτικά διαλύθηκαν, εικόνα 4, και προφανώς και τα αντίστοιχα στοιχεία των κυκλωμάτων ψύξης.

Οι μετασχηματιστές υπέστησαν περιορισμένες καταστροφές λόγω στιβαρότητας και θέσης, εικόνα 5. Από τις οπές στους μετασχηματιστές εκχύθηκαν ποσότητες ελαίου.

Η αναζήτηση του αιτίου της δημιουργίας της εκρηκτικής ατμόσφαιρας σταγονιδίων, η οποία δημιουργήθηκε (εκ του ορισμού) στην ατμόσφαιρα, εντός των μετασχηματιστών στερείται νοήματος.

Όμως οι εναλλάκτες θερμότητας, τα δοχεία διαστολής και οι σωληνώσεις (τουλάχιστον 2 ηλεκτράμαξών) υπέστησαν μεγάλες καταστροφές, κυριολεκτικά διαλύθηκαν. Η καταστροφή τους είναι εκτενέστερη λόγω θέσης και κατασκευής.

Με την σφοδρή σύγκρουση οι εναλλάκτες θερμότητας και τα δοχεία διαστολής συνεθλίβησαν μεταξύ των τμημάτων των ηλεκτράμαξών τα οποία βρίσκονται μπροστά τους και των τμημάτων των

ηλεκτραμαξών τα οποία βρίσκονται μετά, βλέπετε την εικόνα 2, και διερράγησαν, με αποτέλεσμα να εκτοξευθούν με υψηλές ταχύτητες και να σταγονιδιοποιηθούν ποσότητες των ψυκτικών ελαίων.

Σημείωση: Όλες οι πραγματοποιησόμενες αγνοούν την δυνατότητα εκτόξευσης σταγονιδίων από τους εναλλάκτες θερμότητας και εξετάζουν μόνον την εκροή ελαίων από τους μετασχηματιστές, προφανώς λόγω άγνοιας των κυκλωμάτων.

Λόγω της υψηλής ενέργειας η οποία εκλύθηκε κατά την σύγκρουση των ηλεκτραμαξών, μάζας περίπου 80 τόνων, οι οποίες κινούνταν με ταχύτητες αντίστοιχα περίπου 140 km/h και 110 km/h, μέρος των ελαίων απλώς εκχύθηκε, ενώ εκτοξεύθηκαν με υψηλές ταχύτητες από τα σημεία καταστροφής των εναλλακτών και των δοχείων διαστολής ως σταγονίδια διαφόρων μεγεθών ποσότητες του ελαίου, οι οποίες είναι δύσκολο να εκτιμηθούν έστω και κατά προσέγγιση. Ούτε μπορούν να εκτιμηθούν ακριβώς τα χρονικά σημεία εκτόξευσης των ποσοτήτων ελαίου.

Τα σταγονίδια δεν εκτοξεύθηκαν με υψηλές ταχύτητες λόγω υψηλής πίεσης, όπως αναφέρει το πρότυπο IEC 60079-10-1. **Τα σταγονίδια εκτοξεύθηκαν με υψηλές ταχύτητες λόγω της υψηλής ενέργειας η οποία εκλύθηκε κατά την σύγκρουση των ηλεκτραμαξών.**

Το μέγεθος των σταγονιδίων, εκτός από την πίεση, εξαρτάται και από το κινηματικό ιξώδες του υγρού, φυσική ιδιότητα η οποία χαρακτηρίζει το πόσο λεπτόρρευστο είναι το υγρό.

Για το έλαιο Baysilone M50 EL της Bayer λαμβάνεται στους 90°C ([Π9], σελ. 3) τιμή για το κινηματικό ιξώδες

$$\nu = 18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Αντίστοιχα για το χρησιμοποιούμενο στην Ελλάδα βαρύ μαζούτ, **το οποίο καίγεται μετά από εκνέφωση** (σταγονιδιοποίηση), λαμβάνεται στους 100°C ([S4], σελ. 53) απαίτηση για τιμή μέχρι και

$$\nu = 50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

δηλαδή πολύ μεγαλύτερη, 2,5 φορές.

Αυτό σημαίνει **σαφώς** ότι **υφίσταται δυνατότητα δημιουργίας σταγονιδίων μικρής διαμέτρου** του ελαίου Baysilone M50 EL.

Σημείωση: Μας είναι γνωστό από την εμπειρία της πολυετούς χρήσης του μαζούτ η δυνατότητα εκνέφωσης και καύσης του, καθώς και περιπτώσεις ατελούς καύσης και δημιουργίας αιθάλης σε περιπτώσεις ανεπαρκούς εκνέφωσης. Από την εμπειρία, δεν υφίσταται καμμία περίπτωση αμφισβήτησης δυνατότητας ικανής σταγονιδιοποίησης του ελαίου Baysilone M50 EL, το οποίο έχει πολύ χαμηλότερο ιξώδες.

Από το ισοζύγιο ενέργειας (βλέπε την εξίσωση Bernoulli) σε μια ταχύτητα 50 m/s αντιστοιχεί πίεση $\approx 12 \text{ bar}$.

Η συνολική εκλυθείσα ενέργεια της σύγκρουσης εκτιμάται μεγαλύτερη.

Ο σχηματισμός νέφους σταγονιδίων διαπιστώνεται και από τον καθ. κ. Μ. Παπαδάκη [Π10]. Από την ανάλυση των 3 καμερών διαπιστώνει ύπαρξη νεφελώματος (όπως ονοματίζει το νέφος), παρατηρούμενο στο ορατό και βραχύ υπέρυθρο φάσμα (σελ. 21) μετά από το τελευταίο ηλεκτρικό τόξο (σελ. 30).

Το νέφος διήρκησε 0,24 s και στην συνέχεια ακολούθησε η ανάφλεξη (σελ. 30), βλέπε και χρονοδιάγραμμα της εικόνας 1.

7.5 Ανάφλεξη της εκρηκτικής ατμόσφαιρας και διατήρησή της

Η ακόλουθη ανάλυση βασίζεται σε υπολογισμούς οι οποίοι δίνονται στο Παράρτημα Α.

Η ενέργεια ενεργοποίησης E_E της ανάφλεξης του ελαίου υπολογίστηκε $E_E \approx 2,1 \text{ kWh/kg}$.

Ο υπολογισμός των ποσοτήτων ενέργειας (συμβολίζονται E_{s2}) οι οποίες εκλύθηκαν με τα βραχυκυκλώματα από τον καθ. κ. Παπαγιάννη έδωσε περίπου $E_{s2} = 5,1 \text{ kWh}$, ενώ γίνεται ακόμη εκτίμηση θερμοκρασίας των τόξων $T > 5000 \text{ K}$ [Π17].

Ακόμη και αν από τις 5,1 kWh των βραχυκυκλωμάτων διασπαθίσθηκε η μισή ενέργεια, η απομένουσα ενέργεια μπορεί αναμφίβολα να αναφλέξει ποσότητα σταγονιδίων μεγαλύτερη από 1 kg, όταν αυτά διέλθουν από περιοχή του τόξου θερμοκρασίας 5000 K.

Η ακόλουθη καύση 1 kg ελαίου θα αποδώσει ενέργεια 6,9 kWh/kg. Ακόμη και αν διασπαθισθεί μέρος των 6,9 kWh/kg, η απομένουσα ενέργεια θα αναφλέξει περαιτέρω τουλάχιστον 2 kg σταγονιδίων και ούτω καθ' εξής, διατηρώντας μια αλυσιδωτή αντίδραση.

Αν ληφθεί ένα λογικό χρονικό διάστημα 0,5 s μεταξύ των διαδοχικών βημάτων ενεργοποίησης της έναυσης 2 kg σταγονιδίων, το άθροισμα της σειράς **δίνει στην θεωρητική περίπτωση εξέλιξης του φαινομένου καύση περισσότερων από 2000 kg σε 5 δευτερόλεπτα**, βλέπετε το Παράρτημα Α. Βέβαια το φαινόμενο διήρκησε περισσότερο και το χρονικό βήμα εκτιμάται πολύ μικρότερο, περίπου 0,3 s, βλέπετε το Παράρτημα Β.

Η όποια αμφισβήτηση της ανάλυσης και των υπολογισμών των Παραρτημάτων, οι οποίοι βασίζονται σε ισοζύγια μάζας και θερμότητας της Φυσικής και της Χημείας και σε λογικές εκ της εμπειρίας παραδοχές στην ασφαλή πλευρά, πρέπει να βασίζεται σε απόδειξη ότι παραβιάσθηκαν οι αντίστοιχες αρχές της Φυσικής και της Χημείας και ότι οι παραδοχές περιελάμβαναν σημαντικές υπερεκτιμήσεις ή αντίστοιχα υποεκτιμήσεις μεγεθών

8 Εκτίμηση

Με δεδομένα

- την αποδεδειγμένη καυστότητα του ελαίου σιλικόνης Baysilone M50 EL της Bayer
- την θέρμανση του ελαίου σιλικόνης ήδη στους 90°C περίπου
- ότι ο αέρας καύσης είχε ήδη πολύ υψηλή θερμοκρασία ($\approx 3.000^{\circ}\text{C}$) λόγω των ηλεκτρικών τόξων και
- την αποδεδειγμένη δυνατότητα αρχικής ανάφλεξης ποσότητας σταγονιδίων και την δυνατότητα διατήρησης και διάδοσης της ανάφλεξης σταγονιδίων

τεκμαίρεται ότι επικρατούσαν ιδανικές συνθήκες για έκρηξη αερολύματος,

καθ' όσον δημιουργήθηκαν σταγονίδια κατάλληλου (μικρού) μεγέθους,

δηλαδή δημιουργήθηκαν οι ιδιαίτερες συνθήκες τις οποίες επισημαίνει το διεθνές πρότυπο IEC 60097-10-1.

Το RI.SE (Research Institutes of Sweden), κρατικό ερευνητικό κέντρο της Σουηδίας, παρέδωσε μια τεχνική έκθεση με άποψη την δυνατότητα της σταγονιδιοποίησης του ελαίου σιλικόνης με μεγέθη σταγονιδίων 0,5 έως 4 mm και συμβατότητα αυτών των σταγονιδίων με το μέγεθος της πυρόσφαιρας (σημείο 484) [Π1]. Το RI.SE, δηλαδή απεφάνθη ότι είναι θεωρητικά δυνατόν να είναι το έλαιο σιλικόνης η ουσία η οποία ανεφλέγη και δημιούργησε την πυρόσφαιρα σύμφωνα με την βιβλιογραφία.

Το συμπέρασμα της δυνατότητας δημιουργίας σταγονιδίων μικρού μεγέθους **υποστηρίζεται και από την σχετικά χαμηλή τιμή του κινηματικού ιξώδους του ελαίου.**

9 Αμφισβητήσεις

9.1 Υπολογισμοί με CFD

Στο πόρισμα του ΕΟΔΑΣΑΑΜ (σημείο 486, αγγλική έκδοση) αναφέρεται ότι υπό την επίβλεψη της ΕΔΑΠΟ (Επιτροπή Διερεύνησης Ανεξάρτητων Πραγματογνωμών Οικογενειών) έγιναν από την Επιτροπή διερεύνησης προσομοιώσεις με υπολογιστική ρευστομηχανική (CFD = computational fluid dynamics) στην προσπάθεια να αναδημιουργηθεί το συμβάν το οποίο καταγράφηκε από τις κάμερες με την χρήση μόνον μαθηματικών μοντέλων υπολογιστή και των εργαλείων απεικόνισής τους. Πρόκειται για τα

- Fire Dynamics Simulator (FDS), CFD model, και
- Smokeview (SMV) πρόγραμμα απεικόνισης.

Τα προγράμματα FDS and Smokeview διατίθενται δωρεάν από το NIST (National Institute of Standards and Technology), Εθνικού Ιδρύματος του Υπουργείου Εμπορίου των ΗΠΑ United States Department of Commerce.

Από την ανάλυση CFD:

- Υπολογίσθηκαν ποσότητες της καύσιμης ουσίας για την έκρηξη του αερολύματος και τις λίμνες φωτιάς στο πρώτο στάδιο και το δεύτερο στάδιο της έκρηξης, της τάξης των 2.500 kg.
- Το έλαιο σιλικόνης, χρησιμοποιώντας τις παραδοχές της RI.SE για διάμετρο σταγονιδίων 0,5 mm, δεν μπορούσε να εκραγεί και να δημιουργήσει την μεγάλη πυρόσφαιρα.
- Η ποσότητα η οποία θα μπορούσε να εξέλθει από τους μετασχηματιστές τα πρώτα 0,4 s δεν θα επαρκούσε για μεγάλη πυρόσφαιρα.

Σημείωση: Η παραδοχή εκτόξευσης ελαίου μόνον από τους μετασχηματιστές και όχι και από τις συσκευές ψύξης του ελαίου και τις σωληνώσεις **έρχεται σε αντίθεση με τα πραγματικά δεδομένα.**

Το συμπέρασμα από την ανάλυση CFD ήταν ότι η μεγάλη πυρόσφαιρα δεν μπορεί να αποδοθεί στο έλαιο σιλικόνης.

Η Επιτροπή διερεύνησης του ΕΟΔΑΣΑAM προτείνει να ερευνηθεί αλλού η προέλευση της πυρόσφαιρας, την οποία θεωρεί συμβατή με εύφλεκτη **πτητική** καύσιμη ουσία:

*Hence the origin of the fireball consistent with a few tons of a flammable **volatile** fuel needs to be searched elsewhere."*

Σημείωση 1: Με βάση την Οδηγία 1999/92/EK και το πρότυπο IEC 60097-10-1, εφ' όσον έχουμε έκρηξη αερολύματος σταγονιδίων, απαραίτητη συνθήκη είναι, να είναι η υγρή ουσία αναφλέξιμη, χωρίς απαίτηση να είναι **πτητική**.

Στο Παράρτημα Β του πορίσματος εκτιμάται (Task #1) η δυνατότητα των ελαίων σιλικόνης να αναφλεγούν και να δημιουργήσουν πυρόσφαιρα, τέτοια όπως η παρατηρηθείσα κατά το δυστύχημα.

Η προσομοίωση βασίσθηκε στην παραδοχή ότι η πηγή έναυσης είχε την μορφή

- είτε μιας ανοικτής φλόγας,
 - είτε μιας θερμαινόμενης κατακόρυφης πλάκας
- (igniting in the presence of a heat source, in the form of an open flame (...) or a heated vertical plate, σελ. 158)

δηλαδή θεωρήθηκε ουσιαστικά μια σχεδόν σημειακή πηγή ανάφλεξης

Σημείωση: Χρησιμοποιήθηκε μάλιστα χαμηλή θερμογόνος δύναμη 17 MJ/kg, πολύ μικρότερη από την τιμή την οποία έδωσε ο κ. Καρώνης, 24,8 MJ/kg.

Αναφέρεται ότι έγιναν με το πρόγραμμα CFD πολλές προσομοιώσεις με σταγονίδια μεγέθους 500 nm (μάλλον πρόκειται για λάθος καταγραφής, γράφηκαν nm αντί για μm).

Το πόρισμα αποφαίνεται ότι τα αποτελέσματα απέκλεισαν την δυνατότητα των ελαίων σιλικόνης να δημιουργήσουν μια μεγάλη πυρόσφαιρα, παρά μόνον να προκύψει μια τοπική έναυση, η οποία δεν θα διαδοθεί στο υπόλοιπο υλικό.

Είναι σαφές ότι η παραδοχή του είδους της πηγή έναυσης αντιβαίνει στα πραγματικά δεδομένα. Τα πραγματικά δεδομένα είναι ότι δημιουργήθηκαν ηλεκτρικά τόξα υψηλής ενέργειας και μεγάλου όγκου λόγω βραχυκυκλωμάτων, όπως δείχνουν οι καταγραφές καμερών, τα οποία θέρμαναν μεγάλου όγκου μάζα αέρα. Τα θερμά αέρια (θερμός αέρας) αναμφισβήτητα είναι ικανό αίτιο ανάφλεξης, βλέπε την γερμανική νομοθεσία [B3], και αναμφισβήτητο το πραγματικό.

Ακόμη στην ανάλυση δεν λήφθηκε υπ' όψη ότι τα έλαια σιλικόνης είχαν λόγω της λειτουργίας μια υψηλή θερμοκρασία. Μια εύλογη θερμοκρασία των 90°C σημαίνει ότι ο έλαιο, με θερμοκρασία έναυσης 450°C, είχε λάβει ήδη μέρος ενέργειας ενεργοποίησης της καύσης, οπότε η ενεργοποίηση

των αντιδράσεων ήταν ευκολότερη.

Επίσης, ο αέρας καύσης είχε ήδη πολύ υψηλή θερμοκρασία λόγω των ηλεκτρικών τόξων, τα οποία αναπτύσσουν θερμοκρασίες της τάξης των 3.000°C.

Από την εσφαλμένη επιλογή και διανομή στον χώρο των πηγών (και όχι μίας σχεδόν σημειακής πηγής) ανάφλεξης και τη μη θεώρηση της θέρμανσης του ελαίου και του αέρα καύσης συμπεραίνεται ότι η φυσική αρχή της προσομοίωσης με CFD είναι εσφαλμένη και σε καμμία περίπτωση δεν είναι επιστημονικά αποδεκτό να θεωρηθούν ως αναμφισβήτητα αποδεικτικά στοιχεία τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης με CFD.

9.2 Ανάφλεξη της εκρηκτικής ατμόσφαιρας εξ αιτίας των ηλεκτρικών τόξων

Ο καθ. κ. Παπαγιάννης σε δηλώσεις του σε ΜΜΕ ανέφερε [Π16]:

“... Η δική μου κατάθεση αφορούσε περισσότερο, το γεγονός ότι δεν υπήρξε κάποια έκρηξη από εσωτερικό βραχυκύκλωμα στους μετασχηματιστές. Επίσης, η ενέργεια η οποία εκλύθηκε από τα ηλεκτρικά τόξα στα βραχυκυκλώματα που δημιουργήθηκαν, θεωρώ ότι δεν είναι αρκετή για να δημιουργήσει πυρόσφαιρα από έλαια σιλικόνης μετασχηματιστών.”

Ο καθ. κ. Παπαγιάννης στην τεχνική έκθεσή του [Π17] υπολόγισε ποσότητες ενέργειας οι οποίες εκλύθηκαν με τα βραχυκυκλώματα περίπου $E_{s2} = 5,1 \text{ kWh}$ και εκτίμησε την θερμοκρασία των τόξων $T > 5000 \text{ K}$.

Θεωρεί ότι αυτή η ενέργεια η οποία εκλύθηκε από τα ηλεκτρικά τόξα στα βραχυκυκλώματα που δημιουργήθηκαν, δεν είναι αρκετή για να δημιουργήσει πυρόσφαιρα από έλαια σιλικόνης.

Η θεώρηση αυτή της μη επάρκειας βασίζεται στην παραδοχή του ([17] σελ. 21)

.... “ Όπως προαναφέρθηκε, οι εκτιμήσεις των ειδικών προσδιορίζουν την απαιτούμενη ποσότητα καύσιμης ύλης για τη δημιουργία μιας πυρόσφαιρας αυτών των διαστάσεων σε τουλάχιστον **2-7 tn**.” ... Προφανώς θεώρησε, ορθά, ότι η ενέργεια $E_{s2} = 5,1 \text{ kWh}$ δεν επαρκεί, ώστε να ενεργοποιήσει την ανάφλεξη 2 ÷ 7 τόνων.

Σημείωση: Μια εκτίμηση “2-7 tn” στις τεχνικές επιστήμες είναι μη παραδεκτή λόγω πολύ μεγάλου εύρους.

Όμως η ενέργεια η οποία εκλύθηκε από τα ηλεκτρικά τόξα δεν ήταν αναγκαίο να αναφλέξει μόνη της την όλη μάζα των σταγονιδίων. Χρειάζονταν να ενεργοποιήσει την ανάφλεξη σε μέρος της μάζας σταγονιδίων και το υπόλοιπο μέρος ανεφλέγη με αλυσιδωτές αντιδράσεις από την ενέργεια της καύσης των αναφλεγέντων σταγονιδίων, επειδή η ενέργεια ενεργοποίησης της καύσης των 2,1 kWh/kg είναι πολύ μικρότερη από την εκλυόμενη από την καύση ενέργεια 6,9 kWh/kg, βλέπε και το Παράρτημα Α.

Επομένως δεν μπορεί να στοιχειοθετηθεί το συμπέρασμα ([17] σελ. 21)

“... Η εκλυόμενη ενέργεια όμως από τα βραχυκυκλώματα, όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς, ακόμη και στη δυσμενέστερη περίπτωση σφάλματος, δεν επαρκεί για να προκαλέσει το φαινόμενο αυτό.”

Σημείωση: Προς επίρρωση των ανωτέρω αναφέρεται η περίπτωση της καύσης μαζούτ, πετρελαίου κλπ. σε λέβητες, η οποία είναι εφαρμογή γνώριμη στην πλειοψηφία των μηχανολόγων. Πριν την εκνέφωση του υγρού καυσίμου μέσω ακροφυσίου, ξεκινάει η δημιουργία σπινθηρισμού (ηλεκτρικού τόξου) μεταξύ δύο ηλεκτροδίων στα οποία έχει επιβληθεί μέσω μετασχηματιστή διαφορά δυναμικού 5÷16 kV, ως μέσου ανάφλεξης. Τα πρώτα σταγονίδια του υγρού καυσίμου αναφλέγονται από τον σπινθηρισμό και στην συνέχεια, αφού ελεγχθεί μέσω φωτοκύτταρου ή φωτοαντίστασης η σταθεροποίηση της ανάφλεξης, διακόπτεται ο σπινθηρισμός και η ανάφλεξη των νέων προσερχόμενων από το ακροφύσιο σταγονιδίων πραγματοποιείται από την ενέργεια η οποία εκλύεται από την καύση των σταγονιδίων τα οποία προηγήθηκαν και ανεφλέγησαν.

Στην τεχνική έκθεση δεν αναφέρεται εναλλακτική εκτίμηση για το ποιό ήταν το αίτιο της ενεργοποίησης της εκρηκτικής ατμόσφαιρας.

9.3 Εύρεση ουσιών στον τόπο του ατυχήματος

Πραγματογνώμονες των οικογενειών ζήτησαν και έγιναν 29 ημέρες μετά το δυστύχημα δειγματοληψίες από το Γενικό Χημείο του Κράτους σε χώματα τα οποία είχαν μεταφερθεί από την περιοχή του δυστυχήματος.

Στα δείγματα διαπιστώθηκε η ύπαρξη ποσοτήτων ελαίου σιλικόνης καθώς και ιχνών διαφόρων υδρογονανθράκων (ξυλόλια, τολουόλιο και άλλα) σε ποσότητες μεγαλύτερες από τις συνήθως αναμενόμενες σε χώματα.

Οι ποσότητες οι οποίες ανιχνεύθηκαν ήταν πολύ μικρές, π.χ. για το ξυλόλιο της τάξης μεγέθους 1 ppm.

Το Γενικό Χημείο του Κράτους καθώς και η πραγματογνωμοσύνη του καθ. κ. Καρώνη διευκρινίζουν ότι στον χώρο έχει γίνει καύση και πυρόλυση πληθώρας οργανικών χημικών ουσιών που είναι συστατικά αντικειμένων που αναμένεται να βρίσκονται σε μια αμαξοστοιχία.

Μάλιστα το ξυλόλιο αποτελεί παραπροϊόν καύσης ή/και πυρόλυσης του ξύλου (φυσικό συστατικό), των πολυεστερικών, αλκυδικών και λοιπών πλαστικών και ρητινών.

Με την παραδοχή ότι η υγρή ουσία η οποία συμμετείχε στον σχηματισμό της πυρόσφαιρας έγιναν διάφοροι υπολογισμοί από εμπειρογνώμονες.

Στην Τεχνική Έκθεση του Μιχόπουλου και άλλων υπολογίσθηκαν με διάφορα υπολογιστικά εργαλεία ποσότητες **13,9 έως 17 τόνων** αρωματικών υδρογονανθράκων (βενζόλιο, τολουόλιο και ξυλόλιο), σελ. 5.

Στο πόρισμα του ΕΟΔΟΣΑΑΜ αναφέρεται ότι υπό την επίβλεψη της ΕΔΑΠΟ έγιναν υπολογισμοί οι οποίοι απέδωσαν ότι κάηκε ποσότητα **2.500 kg** άγνωστων υδρογονανθράκων, σελ. 106.

Οι υγρές χημικές ουσίες, όπως οι αναφερόμενοι υδρογονάνθρακες, μεταφέρονται με παλετοδεξαμενές, εικόνα 6.



Εικόνα 6 Παλετοδεξαμενή μεταφοράς υδρογονανθράκων

Οι παλετοδεξαμενές κατασκευάζονται από πλαστικό με ενίσχυση από ράβδους αλουμινίου ή επιψευδαργυρωμένου χάλυβα, ενδεχομένως με σανίδες ξύλου στο τμήμα της ενσωματωμένης παλέτας.

Δεν μεταφερόταν επισήμως με την εμπορική αμαξοστοιχία κάποιο υγρό, το οποίο θα μπορούσε να δημιουργήσει εκρηκτική ατμόσφαιρα

Δεν διαπιστώθηκαν κατά την αυτοψία της Πυροσβεστικής ίχνη υπολειμμάτων παλετοδεξαμενών, (όπως υπολείμματα των μεταλλικών ράβδων ενίσχυσης, έστω σε μορφή τηγμάτων).

Δεν φαίνονται ίχνη υπολειμμάτων παλετοδεξαμενών στις αεροφωτογραφίες των πλατφορμών των ανοικτών φορταμαζών.

Στην μη ύπαρξη παλετοδεξαμενών συνάδουν και τα 3 video κίνησης της εμπορικής αμαξοστοιχίας, τα οποία αμφισβητούνται αναπόδεικτα.

Αν μεταφερόταν με παλετοδεξαμενές άλλο αναφλέξιμο υγρό (π.χ. υδρογονάνθρακες), για να συμμετάσχει αυτό στην δημιουργία του εκρηκτικού αερολύματος θα πρέπει με την σύγκρουση

— να διαλύθηκαν εντελώς οι παλετοδεξαμενές,

— να εκτοξεύθηκαν οι ποσότητες του υγρού με πολύ υψηλές ταχύτητες μέσα από τα συντρίμια (των ενισχυμένων με μεταλλικές ράβδους) παλετοδεξαμενών,

— λόγω των υψηλών ταχυτήτων να εκνεφώθηκε σε σταγονίδια μικρής διαμέτρου σημαντική μάζα του υγρού,

— τα σταγονίδια να εισήλθαν στην θερμή από τα ηλεκτρικά τόξα μάζα αέρα (καθώς δεν προκύπτει άλλη πηγή έναυσης) υπερπηδώντας τουλάχιστον την μία ηλεκτράμαξα μήκους 20 m.

Σημειώνεται ότι σε αντίθεση με την περίπτωση των εναλλακτών θερμότητας και των δοχείων διαστολής που περιείχαν ψυκτικό έλαιο και **συνεθλίβησαν** μεταξύ των τμημάτων των ηλεκτραμαζών τα οποία βρίσκονται μπροστά τους και των τμημάτων των ηλεκτραμαζών τα οποία βρίσκονται μετά και διερράγησαν, με αποτέλεσμα να εκτοξευθούν με υψηλή ταχύτητα και να σταγονιδιοποιηθούν ποσότητες των ψυκτικών ελαίων και στην συνέχεια τα σταγονίδια να εισέλθουν στον εγγύς ευρισκόμενο χώρο στον οποίο είχαν σχηματισθεί τα ηλεκτρικά τόξα, **στην υποθετική περίπτωση** ύπαρξης παλετοδεξαμενών **θα ελάμβανε χώρα λόγω αδρανείας μόνον ισχυρή πρόσκρουση** και καταστροφή των παλετοδεξαμενών στο ανασηκωμένο τελικό αντιστήριγμα της πλατφόρμας του ανοικτού βαγονιού και ενδεχομένως στην προηγούμενη ηλεκτράμαξα, **χωρίς να λάβει χώρα σύνθλιψη** λόγω πρόσκρουσης επάνω στις παλετοδεξαμενές κάποιου ακόλουθου αντικειμένου αντίστοιχης πολύ μεγάλης μάζας και ανάλογου όγκου, καθώς δεν υπήρχε επάνω στο ανοικτό βαγόνι κάποιο τέτοιο αντικείμενο. **Τεκμαίρεται εκ των πραγματικών συνθηκών** ότι η καταστροφή των παλετοδεξαμενών και η ακόλουθη εκτόξευση και σταγονιδιοποίηση υγρού προερχόμενου μέσα από παλετοδεξαμενές θα ήταν πολύ μικρότερη λόγω άσκησης περιορισμένων δυνάμεων, και τα δυνητικά σταγονίδια θα είχαν αποκτήσει μικρότερες ταχύτητες, οι οποίες θα ήταν δύσκολο να τα μεταφέρουν, υπερπηδώντας τουλάχιστον την μία ηλεκτράμαξα μήκους 20 m, ώστε να εισέλθουν στον χώρο στον οποίο είχαν σχηματισθεί τα ηλεκτρικά τόξα.

Δεν υπάρχει **καμμία φυσική απόδειξη** ύπαρξης δεξαμενών μεταφοράς αναφλέξιμων υγρών στην εμπορική αμαξοστοιχία.

Μετρήθηκαν μόνον ίχνη υδρογονανθράκων από το Γενικό Χημείο του Κράτους.

Επομένως κάθε συμπέρασμα ύπαρξης άλλων αναφλέξιμων υγρών λόγω της μέτρησης ιχνών υδρογονανθράκων, οι οποίοι μπορούν να είναι προϊόντα καύσης ή/και πυρόλυση πληθώρας οργανικών χημικών ουσιών που είναι συστατικά αντικειμένων που αναμένεται να βρίσκονται σε μια αμαξοστοιχία, αντιβαίνει στις απαιτήσεις της επιστήμης και της λογικής

Το συμπέρασμα ύπαρξης άλλων αναφλέξιμων υγρών λόγω της μέτρησης ιχνών υδρογονανθράκων, **με βάση τις απαιτήσεις των θετικών επιστημών είναι απαράδεκτο.**

10 Κατακλείδα

Δεν υπάρχει καμμία ουσιαστική φυσική απόδειξη παρουσίας άλλου καυστού υγρού, εκτός από το έλαιο σιλικόνης.

Σε καμμία περίπτωση η χρήση υπολογιστικών εργαλείων δεν μπορεί να αποδείξει την ύπαρξη κάποιων ουσιών, όπως οι ανιχνευθείσες, πολύ περισσότερο να καθορίσει ποιές ήταν.

Το RI.SE (Research Institutes of Sweden), κρατικό ερευνητικό κέντρο της Σουηδίας, επειδή διαπίστωσε την δυνατότητα δημιουργίας σταγονιδίων μικρού μεγέθους, απεφάνθη ότι υπό όρους είναι θεωρητικά δυνατόν να είναι το έλαιο σιλικόνης η ουσία η οποία ανεφλέγη και δημιούργησε την πυρόσφαιρα σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Το συμπέρασμα της δυνατότητας δημιουργίας σταγονιδίων μικρού μεγέθους υποστηρίζεται και από την σχετική τιμή του κινηματικού ιξώδους του ελαίου.

Η καυστότητα του ελαίου σιλικόνης είναι αποδεδειγμένη. Λόγω της υψηλότατης ενέργειας της σύγκρουσης των τραίνων και της καταστροφής δομικών στοιχείων τα οποία περιείχαν ποσότητες του ελαίου δημιουργήθηκαν σταγονίδια κατάλληλου (μικρού) μεγέθους. Ακόμη, η ενέργεια η οποία εκλύθηκε από τα ηλεκτρικά τόξα ήταν επαρκής για την αρχική ενεργοποίηση της ανάφλεξης σταγονιδίων και η ανάφλεξη διαδόθηκε με αλυσιδωτές αντιδράσεις στα λοιπά σταγονίδια. Άρα επικρατούσαν ιδανικές συνθήκες για έκρηξη αερολύματος, δηλαδή ιδιαίτερες συνθήκες τις οποίες επισημαίνει το διεθνές πρότυπο IEC 60097-10-1.

Το συμπέρασμα είναι ότι η υγρή ουσία, η οποία υπό τους όρους οι οποίοι προέκυψαν με την σύγκρουση συμμετείχε στην δημιουργία της εκρηκτικής ατμόσφαιρας και της πυρόσφαιρας, είναι το έλαιο το οποίο χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές των ηλεκτράμαξών ως φορέας μετάδοσης θερμότητας για την ψύξη τους.

Εάν αμφισβητείται το ανωτέρω εύλογο συμπέρασμα, **πρέπει να αποδειχθεί ότι στην επίδικη περίπτωση δεν ισχύουν οι πρόνοιες της τεχνικής νομοθεσίας και τυποποίησης** μόνον πειραματικά από πιστοποιημένο εργαστήριο. Τα πειράματα πρέπει να αποκλείσουν την δυνατότητα του ελαίου σιλικόνης να δημιουργήσει την εκρηκτική ατμόσφαιρα αερολύματος υπό καθορισμένες συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές είναι:

- θερμοκρασία του ελαίου ίση με την πραγματική θερμοκρασία του κατά την λειτουργία,
- σταγονίδια διαμέτρου της τάξης 0,5 mm,
- συνθήκες ανάφλεξης οι οποίες αντιστοιχούν στις συνθήκες ηλεκτρικού τόξου από γραμμές 25 kV.

Η προσπάθεια να αντιμετωπισθεί η περίπτωση με προγράμματα CFD απαιτεί αυτά να αναπτυχθούν από άτομα με ιδιαίτερες γνώσεις τόσο των φαινομένων όσο και προγραμματισμού. Τα προγράμματα CFD θα δώσουν αποτελέσματα τα οποία πιθανότατα θα αμφισβητηθούν.

Άλλωστε τα προγράμματα CFD **δεν μπορούν να αποδείξουν φυσική παρουσία ουσιών. Μπορούν μόνον να δημιουργήσουν αμφιβολίες** για την δυνατότητα καύσης των ελαίων.

Σε τέτοια περίπτωση, **η οποία αφορά θανατηφόρο ατύχημα**, η αδιαμφισβήτητη μέθοδος είναι η εκτέλεση πειραμάτων.

ο συντάξας

Κωνσταντίνος Γ. Πασπαλάς

Πασπαλάς

Παράρτημα Α

Υπολογισμοί μαζών και ενέργειας

Δεδομένα

Μοριακός τύπος ελαίου: $\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$, $n \approx 20$ [Π9]

Για $n = 20$: $\text{Si}_{21}\text{C}_{44}\text{H}_{132}\text{O}_{20}$

Ατομικές μάζες: (προσεγγιστικά) C: 12, H: 1, O: 16 Si: 28, N: 14

Αναλογία κατ' όγκο N_2/O_2 στον αέρα = $79/21 = 3,76$

Στοιχειομετρική εξίσωση καύσης με αέρα

$\text{Si}_{21}\text{C}_{44}\text{H}_{132}\text{O}_{20}$	+	88O_2	+	$330,9\text{N}_2$	→	21SiO_2	+	44CO_2	+	$66\text{H}_2\text{O}$	+	$326,5\text{N}_2$
--	---	----------------	---	-------------------	---	------------------	---	-----------------	---	------------------------	---	-------------------

σε kg

$\text{Si}_{21}\text{C}_{44}\text{H}_{132}\text{O}_{20}$	+	88O_2	+	$330,9\text{N}_2$	→	21SiO_2	+	44CO_2	+	$66\text{H}_2\text{O}$	+	$326,5\text{N}_2$
1568		2816		9264,4		1260		1396		1188		9264,4

Αέρας: $2816 + 9264,4 = 12080,4$ kg

Αναγωγή σε 1 kg ελαίου

$\text{Si}_{21}\text{C}_{44}\text{H}_{132}\text{O}_{20}$	+	88O_2	+	$330,9\text{N}_2$	→	21SiO_2	+	44CO_2	+	$66\text{H}_2\text{O}$	+	$326,5\text{N}_2$
1		1,80		5,91		0,80		0,89		0,76		5,91

Αέρας: $1,80 + 5,91 = 7,71$ kg ανά kg ελαίου

Υπολογισμός της ενέργειας ενεργοποίησης της καύσης

Η ενέργεια ενεργοποίησης E_E (ανά kg ελαίου) συντίθεται από την ενέργεια θέρμανσης των δύο αντιδρώντων, του αέρα της καύσης και του ελαίου μέχρι την θερμοκρασία ανάφλεξης (ignition point), η οποία είναι 450°C .

Η ενέργεια θέρμανσης του αέρα Q_a υπολογίζεται

$$Q_a = m_a \cdot c_a \cdot \Delta\theta_a \quad [\text{kJ}] \text{ (ή kWh)}$$

όπου

m_a η μάζα του αέρα, $m_a = 7,71$ kg/kg

c_a η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα, $c_a \approx 1$ kJ/kgK

$\Delta\theta_a$ η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα, $\Delta\theta_a = 450$ K (θέρμανση από 0°C σε 450°C)

Υπολογίζεται

$$Q_a = 7,71 \cdot 1 \cdot 450 = 3470 \text{ kJ/kg} = 0,96 \text{ kWh/kg} \approx 1,0 \text{ kWh/kg}$$

Η ενέργεια θέρμανσης του ελαίου Q_λ συντίθεται από

— την ενέργεια θέρμανσης του ελαίου μέχρι την θερμοκρασία εξάτμισης του ελαίου,

— την ενθαλπία (ενέργεια) εξάτμισης του ελαίου ΔH_E

— την ενέργεια θέρμανσης του ελαίου από την θερμοκρασία εξάτμισης μέχρι τους 450°C .

Με δεδομένο ότι η ειδική θερμοχωρητικότητα της υγρής φάσης είναι υψηλότερη από την ειδική θερμοχωρητικότητα της αέριας φάσης, επειδή δεν είναι σαφώς γνωστή η θερμοκρασία εξάτμισης του

ελαίου, ο υπολογισμός θα απλοποιηθεί, κείμενος στην ασφαλή πλευρά, με την χρήση μιας ενιαίας ειδικής θερμοχωρητικότητας, ίσης με εκείνη της υγρής φάσης. Έτσι υπολογίζεται

$$Q_{\lambda} = m_{\lambda} \cdot c_{\lambda} \cdot \Delta\theta_{\lambda} + \Delta H_E \quad [\text{kJ}] \text{ (ή kWh)}$$

όπου

m_{λ}	η μάζα του ελαίου,	$m_{\lambda} = 1 \text{ kg/kg}$	
c_{λ}	η ειδική θερμοχωρητικότητα του ελαίου,	$c_{\lambda} \approx 1,5 \text{ kJ/kgK}$	[Π9]
$\Delta\theta_{\lambda}$	η διαφορά θερμοκρασίας του ελαίου,	$\Delta\theta_{\lambda} = 450 \text{ K}$	
ΔH_E	η ενθαλπία εξάτμισης του ελαίου	$\Delta H_E = 3300 \text{ kJ/kg} = 0,92 \text{ kWh/kg}$	[Π15]

$$Q_{\lambda} = 1 \cdot 1,5 \cdot 450 + 3300 = 3975 \text{ kJ/kg} = 1,1 \text{ kWh/kg}$$

ή αντίστοιχα

$$Q_{\lambda} = 0,19 + 0,92 \approx 1,1 \text{ kWh/kg}$$

Με τις υπολογισμένες τιμές η ενέργεια ενεργοποίησης της καύσης E_E υπολογίζεται

$$E_E = Q_{\alpha} + Q_{\lambda} = 3470 + 3975 = 7445 \text{ kJ/kg}$$

ή αντίστοιχα

$$E_E = Q_{\alpha} + Q_{\lambda} \approx 1,0 + 1,1 \text{ kWh/kg}$$

$$E_E \approx 2,1 \text{ kWh/kg}$$

Σημείωση: Οι τιμές της ενέργειας δίνονται και σε kWh, ώστε να είναι δυνατή η σύγκρισή τους με ενέργειες ηλεκτρικής προέλευσης.

Υπολογισμός της αδιαβατικής θερμοκρασίας $\theta_{\alpha\delta}$ καύσης του ελαίου

Η αδιαβατική θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται από την καύση, αν δεν αποβάλλεται θερμότητα από το σύστημα.

Η αδιαβατική θερμοκρασία $\theta_{\alpha\delta}$ καύσης του ελαίου θα υπολογισθεί με την παραδοχή ότι το έλαιο εκτοξεύθηκε με θερμοκρασία λειτουργίας 90°C . Θα υπολογισθεί με περίσσεια αέρα 20%.

Η αδιαβατική θερμοκρασία $\theta_{\alpha\delta}$ υπολογίζεται από το ισοζύγιο ενέργειας

$$H_i + m_{\lambda} \cdot c_{\lambda} \cdot \Delta\theta_{\lambda} = \sum m_{ki} c_{ki} \cdot \theta_{\alpha\delta}$$

όπου

H_i	η κατώτερη θερμογόνο του ελαίου	$H_i = 24.800 \text{ kJ/kg} \approx 6,9 \text{ kWh/kg}$	[Π15]
m_{λ}	η μάζα του ελαίου,	$m_{\lambda} = 1 \text{ kg/kg}$	
c_{λ}	η ειδική θερμοχωρητικότητα του ελαίου,	$c_{\lambda} \approx 1,5 \text{ kJ/kgK}$	[Π9]
$\Delta\theta_{\lambda}$	η διαφορά θερμοκρασίας του ελαίου,	$\Delta\theta_{\lambda} = 90 \text{ K}$	
m_{ki}	η μάζα κάθε συστατικού προϊόντος της καύσης, σε kg/kg		
$\sum m_{ki} c_{ki}$	το άθροισμα των γινομένων $m_{ki} c_{ki}$, σε kJ/K		
c_{ki}	η ειδική θερμοχωρητικότητα κάθε συστατικού, σε kJ/kgK		

Η θερμοκρασία και ενέργεια του αέρα καύσης λαμβάνονται μηδενικές.

Οι ποσότητες των μαζών υπολογίσθηκαν με την στοιχειομετρική εξίσωση καύσης. Οι ειδικές θερμοχωρητικότητες κάθε συστατικού λήφθηκαν προσεγγιστικά για 2000°C από την βιβλιογραφία [Π8 και Π17] και δίνονται στον κατωτέρω πίνακα.

Πίνακας μαζών και θερμοχωρητικοτήτων (εκτιμήσεις)

	SiO ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	αέρας
m _{Ki} [kg/kg]	0,80	0,89	0,76	5,91	7,71·0,2 = 1,54
c _{Ki} [kJ/kgK]	0,9	1,24	2,44	1,19	1,15

Με αυτές τις τιμές σχηματίζεται η εξίσωση

$$24.800 + 1 \cdot 1,5 \cdot 90 = (0,8 \cdot 0,9 + 0,89 \cdot 1,24 + 0,76 \cdot 2,44 + 5,91 \cdot 1,19 + 1,54 \cdot 1,15) \cdot \theta_{\alpha\delta}$$

και υπολογίζεται

$$\theta_{\alpha\delta} = 1998 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Η τιμή προέκυψε ανάλογη με την θερμοκρασία των συνήθων υγρών καυσίμων (πετρέλαιο θέρμανσης, μαζούτ).

Η τιμή της αδιαβατικής θερμοκρασίας $\theta_{\alpha\delta} = 1998 \text{ }^{\circ}\text{C}$ σημαίνει ότι κατ' εκτίμηση η μέση θερμοκρασία θ_{μ} της φλόγας καύσης των σταγονιδίων, λόγω αποβολής (μετάδοσης) θερμότητας, είναι της τάξης μεγέθους $\theta_{\mu} = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, συνήθης τιμή φλογών.

Η θερμοκρασία των 1250 °C αποδεικνύει την ικανότητα να ενεργοποιεί η καύση μιας ποσότητας σταγονιδίων την ανάφλεξη και περαιτέρω καύση άλλης ποσότητας σταγονιδίων.

Ενεργοποίηση της ανάφλεξης σταγονιδίων του ελαίου από προηγούμενη καύση άλλης ποσότητας

Η ενέργεια ενεργοποίησης E_E της ανάφλεξης του ελαίου υπολογίστηκε $E_E \approx 2,1 \text{ kWh/kg}$

Η εκτίμηση των ποσοτήτων ενέργειας E_{s2} οι οποίες εκλύθηκαν με τα βραχυκυκλώματα έδωσε περίπου $E_{s2} = 5,1 \text{ kWh}$

ενώ γίνεται ακόμη εκτίμηση θερμοκρασίας των τόξων $T > 5000 \text{ K}$.

Ακόμη και αν από τις 5,1 kWh των βραχυκυκλωμάτων διασπαθίστηκε η μισή ενέργεια και απέμειναν διαθέσιμες μόνον 2,5 kWh, η ενέργεια αυτή μπορεί αναμφίβολα να αναφλέξει ποσότητα σταγονιδίων μεγαλύτερη από 1 kg ($2,5/2,1=1,19$), όταν αυτά διέλθουν από περιοχή του τόξου θερμοκρασίας 5000 K.

Η ακόλουθη καύση 1 kg ελαίου θα αποδώσει ενέργεια 6,9 kWh/kg. Ακόμη και αν διασπαθισθεί μέρος των 6,9 kWh/kg, η απομένουσα ενέργεια θα αναφλέξει περαιτέρω τουλάχιστον 2 kg σταγονιδίων, (στα οποία αντιστοιχεί απαίτηση ενέργειας $2 \times 2,1 = 4,2 \text{ kWh/kg}$, πολύ μικρότερη από τα 6,9 kWh/kg) και ούτω καθ' εξής, διατηρώντας μια αλυσιδωτή αντίδραση.

Αν ληφθεί χρονικό διάστημα 0,5 s μεταξύ των διαδοχικών βημάτων ενεργοποίησης της έναυσης 2 kg σταγονιδίων, το άθροισμα της σειράς δίνει στην θεωρητική περίπτωση της εξέλιξης του φαινομένου καύση περισσότερων από 2.000 kg σταγονιδίων σε 5 δευτερόλεπτα.

Πίνακας εκτίμησης καμένων μαζών

χρόνος [s]	αναφλεγείσα μάζα βήματος [kg]	άθροισμα μαζών [kg]
0	1	1
0,5	2	3
1	4	7
1,5	8	15
2	16	31
2,5	32	63
3	64	127
3,5	128	255
4	256	511
4,5	512	1023
5	1024	2047

Προφανώς δεν εξελίχθηκε το φαινόμενο θεωρητικά. Κάποιες ποσότητες ελαίου δεν κήκαν πλήρως ή εν μέρει, λόγω αυξημένης διαμέτρου, δηλαδή κάποιοι κλάδοι της αλυσιδωτής αντίδρασης δεν ενεργοποιήθηκαν

Το χρονικό διάστημα υπολογίζεται στο Παράρτημα Β μικρότερο από 0,5 s, (περίπου 0,3 s) δηλαδή η τιμή αυτή βρίσκεται στην ασφαλή πλευρά.

Αν το χρονικό διάστημα ληφθεί 0,4 s, τα 2.000 kg σταγονιδίων αντιστοιχούν σε χρόνο 4 s.

Ακόμη, γνωρίζουμε ότι το φαινόμενο της πυρόσφαιρα διήρκεσε περισσότερο από 5 s, ενώ δεν υπάρχει καμία αδιαμφισβητούμενη εκτίμηση της ποσότητας του ελαίου που κήκε.

Πάντως **σε κάθε περίπτωση αποδεικνύεται ότι ήταν δυνατόν να καεί σημαντική ποσότητα του ελαίου**, όχι βέβαια όση υπολογίζεται θεωρητικά, καθώς υπήρξαν και σταγονίδια μεγαλύτερης διαμέτρου.

Από τα ανωτέρω εκτεθέντα και τους υπολογισμούς **αποδεικνύεται ότι το έλαιο των μετασχηματιστών είναι δυνατόν να είναι η υγρή ουσία η οποία συμμετείχε στον σχηματισμό της εκρηκτικής ατμόσφαιρας αερολύματος (σταγονιδίων) και στην συνέχεια στον σχηματισμό της πυρόσφαιρας.**

ο συντάξας

Κωνσταντίνος Γ. Πασπαλάς

Πασπαλάς

Παράρτημα Β

Εκτιμήσεις μετάδοσης θερμότητας και του αναγκαίου χρόνου

Θα υπολογισθεί η μετάδοση θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή κατά την ροή σταγονιδίων (ως σφαιρών) μέσα στα αέρια καύσης του ελαίου.

Θα εκτιμηθεί η προκύπτουσα αντίστοιχη θερμορροή (θερμική ισχύς).

Θα εκτιμηθεί ο αναγκαίος χρόνος για την θέρμανση των σταγονιδίων μέχρι την θερμοκρασία ανάφλεξης (ignition point).

Οι εκτιμήσεις θα δίνουν μόνον για μια διάμετρο σταγονιδίων.

Αναγκαστικά, λόγω περιορισμένης βιβλιογραφίας, οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων προσδιορίζονται όχι με απόλυτη ακρίβεια αλλά με σχετική, επαρκή για την εκτίμηση των μεγεθών. (για σύγκριση δίνονται οι αντίστοιχες τιμές για τον αέρα, τους υδρατμούς)

Παραδοχές

Διάμετρος σταγονιδίων:	$d = 0,5 \text{ mm} = 0,0005 \text{ m}$
Ταχύτητα σταγονιδίων:	$u = 40 \text{ m/s} (144 \text{ km/h})$
θερμοκρασία καυσαερίων:	$\theta = 1250^\circ\text{C}$
θερμοκρασία σταγονιδίων:	$\theta_w = 450^\circ\text{C}$ (θερμοκρασία ανάφλεξης, τελική)

Φυσικές ιδιότητες

Χρειάζονται

- ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ
- το δυναμικό ιξώδες η
- το κινηματικό ιξώδες ν
- ο αριθμός Prandtl Pr

Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων για την μετάδοση θερμότητας

	$\lambda \text{ [W/mK]}$	$\eta \text{ [Pas]}$	$\eta_w \text{ [Pas]}$	$\nu \text{ [m}^2\text{/s]}$	Pr
καυσαέρια	0,098	$55 \cdot 10^{-6}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$220 \cdot 10^{-6}$	0,75
αέρας	0,087	$53,22 \cdot 10^{-6}$	$34,93 \cdot 10^{-6}$	$230 \cdot 10^{-6}$	0,735

Υπολογισμοί όγκων και μαζών

Όγκος σταγονιδίου

$$V = \frac{\pi}{6} d^3 = \frac{\pi}{6} 0,0005^3 = 6,544 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$$

Μάζα σταγονιδίου (πυκνότητα $\rho = 910 \text{ kg/m}^3$) $m = \rho \cdot V$

$$m = 910 \cdot 6,544 \cdot 10^{-11} = 5,955 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

Αριθμός σταγονιδίων ανά kg

$$n = 1/5,955 \cdot 10^{-8} = 0,168 \cdot 10^8$$

Εμβαδό επιφάνειας σταγονιδίου

$$A_{\sigma\tau} = \pi d^2 = \pi \cdot 0,0005^2 = 7,854 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

Συνολικό εμβαδό επιφάνειας 1 kg σταγονιδίων

$$A = n \cdot A_{\sigma\tau} = 0,168 \cdot 10^8 \cdot 7,85 \cdot 10^{-7} = 13,2 \text{ m}^2$$

Συντελεστής συναγωγής κατά την ροή σταγονιδίων

Ο συντελεστής συναγωγής α για ροή γύρω από σφαίρα υπολογίζεται [Π18]

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = 2 + (0,4Re^{1/2} + 0,06Re^{2/3}) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,25}$$

όπου

Nu ο αριθμός Nusselt

Re ο αριθμός Reynolds

$$Re = \frac{ud}{\nu} = \frac{40 \cdot 0,0005}{220 \cdot 10^{-6}} = 90,9$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} \cdot \left[2 + (0,4Re^{1/2} + 0,06Re^{2/3}) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,25} \right]$$

$$\alpha = \frac{0,098}{0,0005} \cdot \left[2 + (0,4 \cdot 90,9^{1/2} + 0,06 \cdot 90,9^{2/3}) \cdot 0,75^{0,4} \cdot \left(\frac{55}{30}\right)^{0,25} \right]$$

$$\alpha = 1413 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Υπολογισμός θερμορροής (θερμικής ισχύος)

Μετάδοση θερμότητας έχουμε

— με συναγωγή και,

— με ακτινοβολία

Επειδή δεν έχουμε διαθέσιμα κατάλληλα υπολογιστικά για την μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, θα υπολογίσουμε την συνολική θερμορροή εμμέσως, αυξάνοντας την μέση θερμοκρασία της φλόγας σε $\theta = 1500^\circ\text{C}$, από $\theta = 1250^\circ\text{C}$, τιμή η οποία είχε εκτιμηθεί λαμβάνοντας υπ' όψη την ακτινοβολία.

Η θερμορροή υπολογίζεται

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta\theta_m$$

όπου

α ο συντελεστής συναγωγής (εκτιμήθηκε $\alpha = 1413 \text{ W/m}^2\text{K}$)

A το συνολικό εμβαδό της επιφάνειας 1 kg σταγονιδίων

$\Delta\theta_m$ η μέση θερμοκρασιακή διαφορά σε K

Υπολογίζεται

$$\Delta\theta_m = \frac{\Delta\theta_{gr} - \Delta\theta_{kl}}{\ln \frac{\Delta\theta_{gr}}{\Delta\theta_{kl}}}$$

$$\Delta\theta_{gr} = 1500 - 0 = 1500 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_{kl} = 1500 - 450 = 1050 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_m = \frac{\Delta\theta_{gr} - \Delta\theta_{kl}}{\ln \frac{\Delta\theta_{gr}}{\Delta\theta_{kl}}} = \frac{1500 - 1050}{\ln \frac{1500}{1050}} = 1262 \text{ K}$$

Η θερμορροή άρα υπολογίζεται

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta \theta_m = 1413 \cdot 13,2 \cdot 1262 = 23538319 \text{ W} = 23538 \text{ kW}$$

Αναγκαίος χρόνος μετάδοσης θερμότητας

Η ενέργεια ενεργοποίησης της καύσης E_E υπολογίσθηκε για 1 kg

$$E_E \approx 2,1 \text{ kWh} = 7560 \text{ kJ} \text{ (ακριβέστερα } 3470 + 3975 = 7445 \text{ kJ)}$$

Ο αναγκαίος χρόνος για την μετάδοση των 7560 kJ υπολογίζεται

$$t = \frac{E_E}{\dot{Q}} = \frac{7560}{23538} = 0,32 \text{ s}$$

Ο χρόνος $t = 0,32 \text{ s}$ βέβαια υπολογίσθηκε βασιζόμενος σε παραδοχές.

Πρόκειται για τον αναγκαίο χρόνο για την μετάδοση θερμότητας από την φλόγα για την αντίστοιχη θερμορροή.

Αναντίρρητα η θερμορροή κατά την αρχική ανάφλεξη λόγω των βραχυκυκλωμάτων με πολύ υψηλότερη θερμοκρασία, $> 5000 \text{ K}$, ενώ στην φλόγα αντιστοιχίσθηκε πολύ μικρότερη θερμοκρασία 1500°C ($= 1773 \text{ K}$), ήταν πολύ μεγαλύτερη. Επομένως **ο πραγματικός αναγκαίος χρόνος για την αρχική ανάφλεξη είναι σαφώς μικρότερος από $t = 0,3 \text{ s}$.**

Αποδεικνύεται ότι οι ισχυρισμοί ανεπάρκειας του χρόνου για την αρχική ανάφλεξη του ελαίου δεν ευσταθούν.

ο συντάξας

Κωνσταντίνος Γ. Πασπαλάς

Πασπαλάς