

Αξιολόγηση και Διαχείριση Κινδύνων κατά τη Φάση Κατασκευής Ηλεκτροπαραγωγικών Σταθμών με Καύσιμο το Φυσικό Αέριο

Νικόλαος Καραβασιλίκος

Μεταπτυχιακός Φοιτητής ΔΧΤ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

Nikos.karava@gmail.com, std169471@ac.eap.gr

Διονυσία-Πηνελόπη Κοντονή

Αναπλ. Καθηγήτρια Παν. Πελοποννήσου και Μέλος
ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

Περίληψη – Η παρούσα εργασία εξετάζει την αξιολόγηση και διαχείριση κινδύνων κατά τη φάση κατασκευής ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών με καύσιμο το φυσικό αέριο, με έμφαση στους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου (CCGT). Μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση διεθνών προτύπων και μελετών, αναπτύσσεται ένα υβριδικό μεθοδολογικό πλαίσιο που συνδυάζει Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (RBS), τεχνικές HAZID/HAZOP και expert elicitation, ποιοτική αξιολόγηση μέσω Risk Matrix, δυναμικό Μητρώο Κινδύνων και μηχανισμό ελέγχου σταδίων (stage-gate governance). Το πλαίσιο εφαρμόζεται ενδεικτικά σε μελέτη περίπτωσης κατασκευής σταθμού CCGT διάταξης 2×1, όπου αναδεικνύονται ως κρίσιμότεροι κίνδυνοι η ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης στη διεπαφή αεριοστροβίλου–HRSG–ατμοστροβίλου, η καθυστέρηση περιβαλλοντικής αδειοδότησης και ο κίνδυνος πυρκαγιάς/έκρηξης. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την ανάγκη ενοποιημένης διαχείρισης τεχνικού και οργανωτικού κινδύνου και προτείνουν συγκεκριμένα μέτρα πρόληψης, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ασφάλειας, της αποδοτικότητας και του ελέγχου κόστους των έργων.

Λέξεις-Κλειδιά: Διαχείριση Κινδύνων, Ηλεκτροπαραγωγικοί Σταθμοί Φυσικού Αερίου, Risk Register, Risk Breakdown Structure, CCGT

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας της ενέργειας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της οικονομικής ανάπτυξης παγκοσμίως, με τους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς φυσικού αερίου, και ιδιαίτερα τους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου (Combined Cycle Gas Turbine – CCGT), να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο σύγχρονο ενεργειακό μείγμα λόγω της υψηλής ενεργειακής απόδοσης και της λειτουργικής ευελιξίας τους (IEA, 2023). Η κατασκευή τέτοιων μονάδων αποτελεί ωστόσο μία σύνθετη και απαιτητική διαδικασία, κατά την οποία εμφανίζονται πολυάριθμοι κίνδυνοι τεχνικής, οργανωτικής, αδειοδοτικής και οικονομικής φύσης, ικανοί να επηρεάσουν το κόστος, το χρονοδιάγραμμα και την ασφάλεια του έργου (Zhao, 2023· Sánchez-Colmenarejo et al., 2022).

Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει τα πρότυπα ISO 31000:2018 και PMBOK® Guide ως το κυρίαρχο πλαίσιο διαχείρισης κινδύνων σε τεχνικά έργα (ISO, 2018· PMI,

2021), ενώ εξειδικευμένες μελέτες έχουν αναδείξει κρίσιμους τεχνικούς κινδύνους στη διεπαφή αεριοστροβίλου–HRSG–ατμοστροβίλου (Rúa & Nord, 2020) και συχνές υπερβάσεις κόστους και χρόνου σε ενεργειακά megaprojects (Sovacool & Ryu, 2025· Flyvbjerg, 2014). Ωστόσο, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση της σχετικής ΜΔΕ, δεν εντοπίζεται ένα ενιαίο, ενοποιημένο πλαίσιο που να καλύπτει ταυτόχρονα τεχνικούς, αδειοδοτικούς, προμηθευτικούς και οργανωτικούς κινδύνους σε έργα CCGT/EPC, με τις κλασικές τεχνικές HAZID/HAZOP να αποδίδουν ισχυρότερα σε κινδύνους διεργασίας παρά σε κινδύνους διεπαφών και governance (Dunjó et al., 2010· Shirali et al., 2014).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός υβριδικού, ενοποιημένου πλαισίου αναγνώρισης, αξιολόγησης και διαχείρισης κινδύνων για την κατασκευαστική φάση σταθμών φυσικού αερίου, το οποίο γεφυρώνει τον τεχνικό κίνδυνο με τον κίνδυνο διακυβέρνησης έργου. Η συμβολή της εργασίας έγκειται στη σύνθεση αυτού του πλαισίου και στην ενδεικτική εφαρμογή του σε ρεαλιστική μελέτη περίπτωσης, όπως παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία της εργασίας περιλαμβάνει οκτώ διαδοχικά στάδια, τα οποία ομαδοποιούνται σε τέσσερα βασικά βήματα: (1) ανάπτυξη Δομής Ανάλυσης Κινδύνου (Risk Breakdown Structure – RBS), (2) δομημένη αναγνώριση κινδύνων μέσω HAZID/HAZOP, επισκόπησης τεχνικών εγγράφων και expert elicitation, (3) ποιοτική αξιολόγηση μέσω πίνακα επικινδυνότητας (Risk Matrix) με δυνατότητα ενίσχυσης από τεχνικές fuzzy/MCDM (Gul, 2018), και (4) ανάπτυξη δυναμικού Μητρώου Κινδύνων (Risk Register) ενσωματωμένου σε μηχανισμό ελέγχου σταδίων (stage-gate governance).

Η RBS που αναπτύχθηκε οργανώνει τους κατασκευαστικούς κινδύνους σε πέντε αλληλένδετες κατηγορίες: Project/Governance, Permitting/Regulatory, Procurement/Supply, Field Safety και Technical Interface/Commissioning (Σχήμα 1), όπως προκύπτει από τη σύνθεση της διεθνούς βιβλιογραφίας (Shotts, Adduci & Keller, 2012· Jang, Han & Park, 2015).



Σχήμα 1. Δομή Ανάλυσης Κινδύνου (RBS) για την κατασκευή σταθμών φυσικού αερίου.

Κάθε αναγνωρισμένος κίνδυνος βαθμολογείται ως προς την πιθανότητα εμφάνισης και τη σοβαρότητα των συνεπειών του σε κλίμακα 1–5, με το γινόμενο τους (Risk Score) να καθορίζει το επίπεδο προτεραιότητας. Οι κίνδυνοι καταγράφονται σε Μητρώο Κινδύνων με πεδία ιδιοκτήτη, μέτρων μετριασμού και δεικτών KPI, το οποίο επανεξετάζεται συστηματικά σε κάθε πύλη ελέγχου (stage-gate) του έργου.

III. ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το προτεινόμενο πλαίσιο εφαρμόστηκε ενδεικτικά σε μελέτη περίπτωσης κατασκευής σταθμού CCGT διάταξης 2×1 και ισχύος περίπου 450 MW, με εικοσιτετράμηνο χρονοδιάγραμμα κατασκευής και σύμβαση τύπου EPC. Η μελέτη περίπτωσης είναι ενδεικτική και όχι πραγματικό έργο, ώστε να μην απαιτούνται εμπιστευτικά δεδομένα.

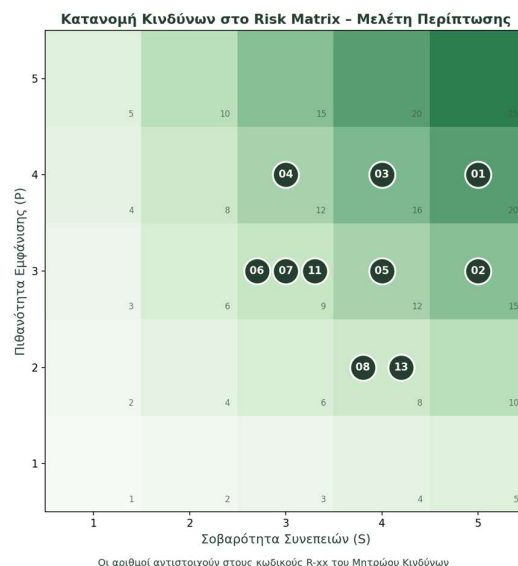
Μέσω προσομοιωμένης διαδικασίας HAZID/HAZOP και expert elicitation, βασισμένης στη βιβλιογραφία και στην πρακτική του κλάδου, προσδιορίστηκαν συνολικά 15 κίνδυνοι, οι οποίοι κατανεμήθηκαν σε όλες τις κατηγορίες της RBS, με τους περισσότερους να συγκεντρώνονται στην κατηγορία Field Safety. Ωστόσο, οι κίνδυνοι με την υψηλότερη βαθμολογία ανήκουν στις κατηγορίες Technical Interface και Permitting. Ο Πίνακας I συνοψίζει τους πέντε κρισιμότερους κινδύνους της μελέτης περίπτωσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ I

ΚΡΙΣΙΜΟΤΕΡΟΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ (P = ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ, S = ΣΟΒΑΡΟΤΗΤΑ)

ID	Κίνδυνος	Κατηγορία	P×S	Επί-εδο
R-01	Ασυμμετρία GT–HRSG–ST	Tech. Interface	20	Κρίσιμος
R-03	Καθυστέρηση άδειας	Permitting	16	Κρίσιμος
R-02	Πυρκαγιά/έκρηξη	Field Safety	15	Υψηλός
R-04	Καθυστ. παράδοση HRSG	Procurement	12	Υψηλός
R-05	Ατύχημα hot work	Field Safety	12	Υψηλός

Ο κρισιμότερος κίνδυνος (R-01) αφορά την ασυμμετρία δυναμικής απόκρισης στη διεπαφή αεριοστροβίλου–HRSG–ατμοστροβίλου κατά το startup, η οποία μπορεί να προκαλέσει θερμική καταπόνηση και κόπωση υλικού (Rúa & Nord, 2020). Ο Κίνδυνος R-03, η καθυστέρηση περιβαλλοντικής αδειοδότησης, επιβεβαιώνει το εύρημα της βιβλιογραφίας ότι η αδειοδότηση λειτουργεί επανειλημμένα ως construction-critical παράγοντας. Το Σχήμα 2 απεικονίζει την κατανομή των κρισιμότερων κινδύνων στο Risk Matrix της μελέτης περίπτωσης.



Σχήμα 2. Κατανομή κρίσιμων κινδύνων στο Risk Matrix της μελέτης περίπτωσης.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία ανέπτυξε ένα υβριδικό, ενοποιημένο πλαίσιο διαχείρισης κατασκευαστικού κινδύνου για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου, το οποίο συνδυάζει RBS, HAZID/HAZOP, ποιοτική αξιολόγηση μέσω Risk Matrix και δυναμικό Μητρώο Κινδύνων ενσωματωμένο σε μηχανισμό stage-gate. Η πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας έγκειται στη γεφύρωση του τεχνικού κινδύνου (ιδίως στη διεπαφή GT–HRSG–ST) με τον κίνδυνο διακυβέρνησης έργου, δύο περιοχές που στη διεθνή βιβλιογραφία εξετάζονται συνήθως ξεχωριστά.

Η ενδεικτική εφαρμογή του πλαισίου επιβεβαίωσε ότι οι σοβαρότεροι κίνδυνοι συγκεντρώνονται στη διεπαφή τεχνικού εξοπλισμού και στην αδειοδότηση, αναδεικνύοντας την ανάγκη συντονισμένης, και όχι αποσπασματικής, διαχείρισης κινδύνου. Βασικός περιορισμός της έρευνας είναι η χρήση ενδεικτικής, και όχι πραγματικής, μελέτης περίπτωσης, γεγονός που περιορίζει την άμεση στατιστική γενίκευση των αποτελεσμάτων.

Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η επικύρωση του πλαισίου σε πραγματικά έργα CCGT/EPC με πρωτογενή δεδομένα, καθώς και η ενσωμάτωση εξωτερικών κινδύνων φυσικής προέλευσης (Natech) στο Μητρώο Κινδύνων (Krausmann et al., 2011).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Dunjó, J., Fthenakis, V., Vilchez, J. A., & Arnaldos, J. (2010). Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.076>
- Flyvbjerg, B. (2014). What you should know about megaprojects and why: An overview. *Project Management Journal*, 45(2), 6–19.
- Gul, M. (2018). A review of occupational health and safety risk assessment approaches based on multi-criteria decision-making methods and their fuzzy versions. *Human and Ecological Risk Assessment*. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1424531>
- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 risk management—Guidelines*. ISO.
- Jang, W., Han, S. H., & Park, H. (2015). A stage-gate integrated risk control system for LNG plant projects: Focusing on the design

- phase. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jngsc.2014.12.018>
- Krausmann, E., Cozzani, V., Salzano, E., & Renni, E. (2011). Industrial accidents triggered by natural hazards: An emerging risk issue. *Natural Hazards and Earth System Science*. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-921-2011>
- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)* (7th ed.). Project Management Institute.
- Rúa, J., & Nord, L. O. (2020). Optimal control of flexible natural gas combined cycles with stress monitoring: Linear vs nonlinear model predictive control. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114820>
- Sánchez-Colmenarejo, J. I., Morales-Camprubí, F., González-Gaya, C., & Sanchez-Lite, A. (2022). Power plant construction projects risk assessment: A proposed method for temporary systems of commissioning. *Buildings*, 12(8), Article 1260. <https://doi.org/10.3390/buildings12081260>
- Shirali, G. A., Askaripoor, T., Kazemi, E., & Marzban, M. (2014). Assessment and risks ranking in a combined cycle power plant using degree of Belief approach in fuzzy logic. *Iran Occupational Health*.
- Shotts, D. J., Adduci, C. M., & Keller, M. (2012). Air quality permitting factors in site selection for natural gas combined cycle power plants. Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition (AWMA).
- Sovacool, B. K., & Ryu, H. (2025). Beyond economies of scale: Learning from construction cost overrun risks and time delays in global energy infrastructure projects. *Energy Research & Social Science*, 123, 104057. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104057>
- Zhao, X. (2023). Construction risk management research: Intellectual structure and emerging themes. *International Journal of Construction Management*, 24(5), 540–550.