



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

Πλατφόρμα λογισμικού για την επίτευξη του
στόχου μηδενικές εκπομπές CO₂: Η
περίπτωση της Mærsk

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΓΚΙΝΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων: Μπούρας Χρήστος
Καθηγητής

Πάτρα, Μάιος 2026



Πανεπιστήμιο Πατρών

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής

Πλατφόρμα λογισμικού για την επίτευξη του στόχου μηδενικές εκπομπές CO₂: Η περίπτωση της Mærsk

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΓΚΙΝΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων: Μπούρας Χρήστος
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2026.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Μπούρας Χρήστος
Καθηγητής

.....
Γαροφαλάκης Ιωάννης
Καθηγητής

.....
Παπαϊωάννου Εύη
Επίκουρη Καθηγήτρια

Πάτρα, Μάιος 2026



Πανεπιστήμιο Πατρών
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής

Copyright ©–All rights reserved Κωνσταντίνος Γκίνης, 2026.

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας, και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών.

(Υπογραφή)

.....

Κωνσταντίνος Γκίνης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει τον **Πάγκο Εργασίας Εκπομπών** (Emissions Workbench), μια πλατφόρμα λογισμικού παραγωγικής κλίμακας που σχεδίασε και υλοποίησε η ομάδα Energy Transition (ET) Platform της A.P. Møller-Mærsk A/S. Στόχος της πλατφόρμας είναι η μέτρηση, πιστοποίηση και βελτιστοποίηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) από θαλάσσιες μεταφορές, στο πλαίσιο του στόχου Net Zero 2040 της Maersk και των ρυθμιστικών υποχρεώσεων του κλάδου (CSRD, EU ETS Maritime, FuelEU Maritime).

Η πλατφόρμα βρίσκεται στην ιστοσελίδα <https://emissions-workbench.maersk.com/> (μόνο για χρήστες με δικαίωμα πρόσβασης).

Η εργασία αναλύει τέσσερις αλληλοσυμπληρούμενες διαστάσεις: το επιχειρησιακό και ρυθμιστικό πλαίσιο, το θεωρητικό υπόβαθρο λογιστικής εκπομπών (GHG Protocol, Scope 1/2/3, ISCC, GLEC), την τεχνική αρχιτεκτονική της πλατφόρμας και τη μεθοδολογία ανάπτυξης της ομάδας.

Τεχνικά, το σύστημα βασίζεται στην πλατφόρμα BEAM/Elixir με Phoenix LiveView για διεπαφές πραγματικού χρόνου, Apache Kafka για επεξεργασία δεδομένων καθοδηγούμενη από συμβάντα, προέλευση από συμβάντα για αδιάσπαστη ιχνηλασιμότητα της λογιστικής πράσινου καυσίμου (Energy Bank), PostgreSQL/Ecto, Dremio για αναλυτικά δεδομένα και Microsoft Azure/Kubernetes για αναπτύξεις νέφους. Η ομάδα ανάπτυξης εφαρμόζει πρακτικές Extreme Programming: προγραμματισμό σε ζεύγη, ανάπτυξη καθοδηγούμενη από δοκιμές, συνεχή ενσωμάτωση/παράδοση και κάθετη ιδιοκτησία.

Επιχειρησιακά αποτελέσματα: πάνω από 1.300 ενεργοί χρήστες, Προϊόντα ECO Παράδοσης ύψους 98.000 FFE αξίας \$31 εκατομμυρίων USD κατά το 2024, περίπου 32 αναπτύξεις σε παραγωγή ημερησίως και άνω των 720 μεταπτώσεων σχήματος βάσης δεδομένων χωρίς διακοπή υπηρεσίας.

Λέξεις Κλειδιά

Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, CO₂, Ναυτιλία, Maersk, Elixir, BEAM, Phoenix LiveView, Event Sourcing, Extreme Programming, Net Zero

Abstract

This thesis presents the **Emissions Workbench**, a production-scale software platform designed and implemented by the Energy Transition (ET) Platform team at A.P. Møller-Mærsk A/S. The platform enables accurate measurement, certification, and optimization of greenhouse gas (GHG) emissions from maritime shipping operations, in support of Maersk’s Net Zero 2040 commitment and the evolving regulatory landscape (CSRD, EU ETS Maritime, FuelEU Maritime).

The platform is available in the website: <https://emissions-workbench.maersk.com/> (only accessible by authorized users).

The thesis examines four complementary dimensions: the business and regulatory context; the theoretical framework for GHG accounting (GHG Protocol, Scope 1/2/3, ISCC, GLEC); the technical architecture of the platform; and the software development methodology of the team.

The system is built on the BEAM/Elixir runtime with Phoenix LiveView for real-time web interfaces, Apache Kafka for event-driven data ingestion, event sourcing for the auditable green fuel accounting ledger (Energy Bank), PostgreSQL/Ecto for persistence, Dremio for analytics, and Microsoft Azure/Kubernetes for cloud deployment. The development team applies Extreme Programming practices: pair programming, test-driven development, continuous integration/delivery, and vertical ownership.

Business outcomes include over 1,300 active users, ECO Delivery volumes of 98,000 FFE worth \$31 million USD in 2024, approximately 32 production deployments per day, and over 720 zero-downtime database migrations.

Keywords

Greenhouse gas emissions, CO₂, Maritime shipping, Maersk, Elixir, BEAM, Phoenix LiveView, Event Sourcing, Extreme Programming, Net Zero

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μπούρα Χρήστο για την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα στον τομέα της βιωσιμότητας και της μηχανικής λογισμικού. Επίσης ευχαριστώ τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κ. Γαροφαλάκη Ιωάννη και την κ. Παπαϊωάννου Εύη, για τον χρόνο τους και τις πολύτιμες παρατηρήσεις τους.

Ευχαριστώ τους συναδέλφους συμφοιτητές μου για όλη τη βοήθεια και στήριξη που μου έδωσαν.

Ευχαριστώ τους γονείς μου και τους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξή τους, την υπομονή τους και την ενθάρρυνσή τους σε κάθε βήμα της πορείας μου.

Ευχαριστώ τον Gunpei Yokoi και την ομάδα Nintendo R&D1, χωρίς τους οποίους ίσως να μην είχα αναπτύξει ποτέ την αγάπη μου για την τεχνολογία και την καινοτομία.

Τέλος, ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ σε όλους τους ανώνυμους χρήστες του διαδικτύου, προγραμματιστές, μέλη κοινοτήτων ανοιχτού κώδικα, χρήστες του Stack Overflow, συγγραφείς blog, που με δίδαξαν, με βοήθησαν και με έσωσαν από πολλά τεχνικά αδιέξοδα.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία γεννήθηκε μέσα από τρία χρόνια συμμετοχής στην ομάδα Energy Transition (ET) Platform της Maersk, ως μέλος μιας διεθνούς ομάδας μηχανικών λογισμικού που ανέπτυξε ένα σύστημα παραγωγικής κλίμακας για τη μέτρηση και διαχείριση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Αυτή η εμπειρία ήταν ταυτόχρονα επαγγελματική πρόκληση και πρωτότυπη ευκαιρία: να σχεδιαστεί και να τεθεί σε λειτουργία λογισμικό που συνδέει μηχανική ακρίβεια με έναν στόχο βαθύτατα περιβαλλοντικής σημασίας.

Η επιλογή της Maersk ως μελέτης περίπτωσης δεν ήταν τυχαία. Μια εταιρεία που μεταφέρει περίπου το 17% των παγκόσμιων εμπορευμάτων εμπορευματοκιβωτίων, που δεσμεύτηκε για καθαρές μηδενικές εκπομπές το 2040 — δέκα χρόνια πριν από τον αντίστοιχο στόχο του IMO — και που το 2023 αντιμετώπισε εσωτερικό έλεγχο για την αξιοπιστία των δεδομένων εκπομπών της, αντιπροσωπεύει μια κατηγορία προβλημάτων όπου το λογισμικό δεν είναι απλώς εργαλείο υποστήριξης, αλλά κρίσιμος παράγοντας της επιχειρηματικής και περιβαλλοντικής στρατηγικής.

Η εργασία επιχειρεί να τεκμηριώσει αυτή την εμπειρία με ακρίβεια: όχι απλώς να περιγράψει τι κατασκευάστηκε, αλλά να εξηγήσει γιατί έγιναν συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές και μεθοδολογικές επιλογές, ποιες ήταν οι συνέπειές τους, και τι μαθήματα μεταφέρονται πέραν της συγκεκριμένης υλοποίησης.

*Κωνσταντίνος Γκίνης
Πάτρα, Μάιος 2026*

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες	v
Πρόλογος	vii
Κατάλογος σχημάτων	xv
Κεφάλαιο 1 — Εισαγωγή	1
1.1 Πλαίσιο της εργασίας	1
1.2 Στόχος της εργασίας	2
1.3 Συνεισφορές της εργασίας	2
1.4 Δομή του κειμένου	3
Κεφάλαιο 2 — Πλαίσιο και πρόβλημα	5
2.1 Η Maersk και ο τομέας της θαλάσσιας μεταφοράς	5
2.2 Συνεισφορά της ναυτιλίας στις παγκόσμιες εκπομπές	6
2.3 Ο στόχος Net Zero 2040 της Maersk	7
2.4 Ρυθμιστικό πλαίσιο	8
CSRD — Οδηγία Εταιρικής Βιωσιμότητας	8
Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών για τη Ναυτιλία — EU ETS Maritime	8
Κανονισμός Ναυτιλίας FuelEU — FuelEU Maritime	9
IMO MEPC — Στρατηγική GHG 2023	9
Εθελοντικά πλαίσια αναφοράς: CDP και GRESB	9
2.5 Η προηγούμενη χειρωνακτική διαδικασία	10
2.6 Ομάδες χρηστών και ανάγκες τους	12
2.7 Ο εσωτερικός έλεγχος GIA του 2023	13
Κεφάλαιο 3 — Θεωρητικό υπόβαθρο: Λογιστική αερίων θερμοκηπίου	15
3.1 Το Πρωτόκολλο Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου	15
Ιστορικό και θεσμικό πλαίσιο	15

Η έννοια του CO ₂ e και του Δυναμικού Υπερθέρμανσης του Πλανήτη	16
Σχέση με άλλα πρότυπα	16
3.2 Κατηγορίες Εκπομπών (Scopes)	16
Κατηγορία 1 (Scope 1): Άμεσες εκπομπές	16
Κατηγορία 2 (Scope 2): Έμμεσες εκπομπές από ενέργεια	17
Κατηγορία 3 (Scope 3): Εκπομπές αλυσίδας αξίας	17
3.3 Μεθοδολογίες Μέτρησης	18
3.3.1 Μεθοδολογία βάσει κόστους (Cost-based)	18
3.3.2 Μεθοδολογία βάσει δραστηριότητας (Activity-based)	19
3.3.3 Υβριδική μεθοδολογία (Hybrid)	19
3.4 TTW έναντι WTW: Όρια του συστήματος εκπομπών	20
Tank-to-Wake (TTW)	20
Well-to-Wake (WTW)	20
3.5 Ισοζύγιο μάζας (Mass Balance) και Book-and-Claim	21
Φυσική ροή έναντι λογιστικής ροής	21
Ισοζύγιο μάζας (Mass Balance)	21
Αναφορά αποσυνδεδεμένη από φυσική ροή (Book-and-Claim)	22
Πλεονεκτήματα και περιορισμοί	22
3.6 Πρότυπα και Πιστοποιήσεις	22
Διεθνής Πιστοποίηση Βιωσιμότητας και Άνθρακα — ISCC	22
Πρωτοβουλία Στόχων με Επιστημονική Βάση — SBTi Maritime	23
Πλαίσιο Παγκοσμίου Συμβουλίου Εκπομπών Εφοδιαστικής Αλυσίδας	23
Πρόγραμμα Αναφορών Άνθρακα και ISO 14001	24
Σύνοψη κανονιστικού και προτυπικού πλαισίου	24
Κεφάλαιο 4 — Ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών: Επισκόπηση	27
4.1 Στόχοι και αποστολή της ομάδας Πλατφόρμας Μετάβασης Ενέργειας	27
4.2 Οι τέσσερις πυλώνες της Πλατφόρμας	28
4.3 Επιτεύγματα και αντίκτυπος	29
4.4 Επισκόπηση χαρακτηριστικών διεπαφής χρήστη	31
Κεφάλαιο 5 — Πυλώνας A: Ocean Emissions και STAR Connect	33
5.1 Πρόκληση: Ακριβής καταγραφή εκπομπών στόλου	33
5.2 Πηγές δεδομένων	34
5.2.1 Dremio Data Lake	34
5.2.2 Shiptech	34
5.2.3 Δομή κίνησης εμπορευματοκιβωτίου (ContainerMove)	35
5.3 Κύρια δεδομένα πλοίων (Vessel Master Data) — ocean_api	35
5.4 STAR Connect: Τηλεμετρία καυσίμων πραγματικού χρόνου	36
5.4.1 Τι είναι το STAR Connect	36
5.4.2 Ροή δεδομένων: STAR Connect → Kafka → BoW	36

5.4.3 Δομή δεδομένων RemainingFuelOnBoard	37
5.4.4 API πρόσβασης	38
5.5 Υπολογισμός Εκπομπών	38
5.5.1 Συντελεστές εμπορικής διαδρομής (Trade Factors): ο πυρήνας της με- θοδολογίας	38
5.5.2 Υπολογιστής Εκπομπών — EmissionsCalculator	38
5.5.3 Διοχέτευση (Pipeline) μετασχηματισμού εισαγωγής	39
5.6 Επιβαρύνσεις EU ETS (Surcharges)	40
5.6.1 Ρυθμιστικό πλαίσιο	40
5.6.2 Υλοποίηση	40
5.6.3 Τριμηνιαία εγκυρότητα και ίχνος ελέγχου (audit trail)	41
5.7 Βασική γραμμή εκπομπών πελάτη (Customer Baseline Emissions)	41
5.7.1 Σκοπός και λειτουργικότητα	41
5.7.2 Παρασκήνιο (Backend): BaselineEmissionsReport	42
5.7.3 Ίχνος ελέγχου (Audit trail) ανά αναζήτηση	42
5.7.4 Σύνδεση με μετέπειτα (downstream) χρήσεις	42
Κεφάλαιο 6 — Πυλώνας Β: Προϊόντα ECO Παράδοσης και πιστοποιη- τικά	45
6.1 Τι είναι τα ECO Προϊόντα	45
6.2 ECOv1 vs ECOv2: Δύο μεθοδολογίες υπολογισμού	46
ECOv1: Υπολογισμός βάσει απόλυτης διαφοράς CO ₂	46
ECOv2: Υπολογισμός βάσει ποσοστιαίας εξοικονόμησης CO ₂ e	47
6.3 Energy Bank: λογιστική πράσινου καυσίμου	47
6.3.1 Το πρόβλημα του ισοζυγίου μάζας	47
6.3.2 Event Sourcing και CQRS στην Energy Bank	48
6.3.3 Καταθέσεις, Αναλήψεις και Λογαριασμοί Εκκαθάρισης	49
6.3.4 Η αρχή του ισοζυγίου μάζας ως περιορισμός συστήματος	50
6.4 Πιστοποιητικό Βιωσιμότητας (POS) και ISCC	50
6.5 Έκδοση πιστοποιητικών	51
6.5.1 Δομή πιστοποιητικού	51
6.5.2 Παραγωγή PDF και αποθήκευση στο Azure Blob Storage	52
6.5.3 Επανέκδοση, ακύρωση και ιστορικό	53
6.6 Επιβαρύνσεις ECO Delivery: τιμολόγηση και κόστος αποφυγής	54
6.6.1 Κόστος αποφυγής (Cost of Abatement)	54
6.6.2 Υπολογισμός χρέωσης πελάτη	55
Κεφάλαιο 7 — Πυλώνας Γ: Bunker Optimization (Energy Markets)	57
7.1 Το πρόβλημα ανεφοδιασμού	57
7.2 Σύστημα Βελτιστοποίησης Σχεδίου Ανεφοδιασμού — BOPS	58
7.3 Πάγκος Ανεφοδιασμού εν πλω — BoW	58

7.4 Ο επιλυτής C++ μέσω Erlang Ports	59
7.4.1 Αρχιτεκτονική σύνδεσης με εξωτερικό επιλυτή	59
7.4.2 Υλοποίηση: BopsApi.Server	60
7.5 Ενσωμάτωση με το Shiptech	62
7.5.1 Αρχιτεκτονική ανταλλαγής δεδομένων	62
7.5.2 Ορισμός υποδομής με Terraform	62
7.6 Χρονοπρογραμματισμός εκτελέσεων πλάνου (Plan Run)	64
7.7 Σύνδεση με EU ETS και πράσινα καύσιμα	65
Κεφάλαιο 8 — Τεχνολογίες	67
8.1 BEAM, Erlang και Elixir	67
8.2 Phoenix Framework και LiveView	68
8.3 PostgreSQL και Ecto	70
8.4 Apache Kafka	71
8.5 Dremio	72
8.6 ODBC ενσωματώσεις	72
8.7 Microsoft Azure	72
8.8 Kubernetes	73
8.9 Terraform	73
8.10 Nix και nix-darwin	74
8.11 GitHub Actions και Custom Runner	74
8.12 Maersk Design System (MDS)	75
8.13 Observability stack	75
8.14 HashiCorp Vault και agenix	76
8.15 Oban	76
8.16 Commanded και EventStore	77
8.17 Λοιπά υποστηρικτικά εργαλεία	77
Κεφάλαιο 9 — Αρχιτεκτονική του συστήματος	79
9.1 Επισκόπηση συστήματος	79
9.2 Clean Architecture στην πράξη	80
9.3 Monorepo οργάνωση	81
9.4 Components και τα όριά τους	82
9.5 Αγωγός ενσωμάτωσης δεδομένων (Data Ingestion Pipeline)	83
9.5.1 Πηγές περιοδικής ανάκτησης (Polling)	84
9.5.2 Ροή δεδομένων (Streaming)	84
9.5.3 Επεξεργασία εργασιών (Job Processing) και GenServer Director	85
9.6 Στρώμα ιστού (Web Layer)	86
9.7 Αυθεντικοποίηση (Authentication) και Εξουσιοδότηση (Authorization)	87
9.8 Στρώμα μονιμότητας (Persistence Layer)	88
9.9 Προέλευση από συμβάντα (Event Sourcing) για την Energy Bank	89

9.10 Αρχιτεκτονική παρατηρησιμότητας (Observability)	91
9.11 Τοπολογία ανάπτυξης (Deployment Topology)	92
9.12 Αποκατάσταση από καταστροφή (Disaster Recovery) και αναπαραγωγικότητα	93

Κεφάλαιο 10 — Εργασιακές μέθοδοι 95

10.1 Agile και Extreme Programming	95
Ιστορικό και φιλοσοφία	95
Οι 12 πρακτικές XP	95
Σύγκριση με Scrum και επιλογή XP	96
10.2 Pair Programming	96
Ρόλοι και ρυθμός	96
Εργαλεία σε κατανεμημένο περιβάλλον	97
Mob/Ensemble Programming	97
Εμπειρικά αποτελέσματα και αντιμετώπιση κριτικής	97
10.3 TDD — Test Driven Development	97
Red-Green-Refactor	97
Πυραμίδα δοκιμών (Test Pyramid)	98
Κουλτούρα κάλυψης δοκιμών (test coverage)	98
Λήμμα 10.3.1: Δοκιμή αποδοχής (Acceptance Test) LiveView	98
10.4 Συνεχής Ενσωμάτωση / Συνεχής Παράδοση (Continuous Integration / Continuous Delivery)	100
Ανάπτυξη βασισμένη στον κορμό (Trunk-based Development)	100
Ρυθμός παραδόσεων	100
GitHub Actions και κατηγορίες ροών εργασίας (Workflows)	100
Ανίχνευση επηρεαζόμενων (Affected Workspace) και τμηματικές κατασκευές (Incremental Builds)	101
Επαναφορά (Rollback)	101
10.5 Κάθετη ιδιοκτησία (Vertical Ownership)	101
Έννοια και εφαρμογή	101
Πλεονεκτήματα	102
Μειονεκτήματα και αντιμετώπισή τους	102
10.6 Βρόχοι ανατροφοδότησης (Feedback Loops)	102
Η αρχή	102
Βρόχοι από δευτερόλεπτα έως μήνες	104
Ασύγχρονη ανατροφοδότηση στην πράξη	104
10.7 Ένταξη (Onboarding) και διαμοιρασμός γνώσης (Knowledge Sharing)	104
Φιλοσοφία και στόχοι	104
Σύστημα αναδόχου (Buddy System)	105
Συνεδρίες μεταφοράς γνώσης (KT Sessions)	105
10.8 Επιθεώρηση κώδικα (Code Review) μέσω εργασίας σε ζεύγη	105
Συνεχής αναθεώρηση ως αρχιτεκτονική επιλογή	105

Ροή χωρίς αιτήματα ενσωμάτωσης (PRs) εσωτερικά	106
Συμβιβασμοί (Trade-offs)	106
Κεφάλαιο 11 — Συμπεράσματα	107
11.1 Σύνοψη της λύσης	107
11.2 Επιτυχίες και μετρήσεις αντίκτυπου	108
11.3 Μαθήματα από την υλοποίηση	109
Κεφάλαιο 12 — Μελλοντική εργασία	111
12.1 Μετρήσεις Scope 2: Γραφεία, Τερματικά και Cold Ironing	111
12.2 Επεκτάσεις Στόλου και Κάλυψης Δραστηριοτήτων	112
12.3 Επέκταση SBTi Αναφοράς	113
12.4 Προηγμένα αναλυτικά στοιχεία (Analytics): Προβλεπτικές Εκπομπές και Σε- νάρια Απανθρακοποίησης	113
12.5 Σύνδεση Bunker Optimization με την Energy Bank	114
Κεφάλαιο 13 — Βιβλιογραφία	115
13.1 Διεθνή πρότυπα και πρωτόκολλα	115
13.2 Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO)	116
13.3 Ευρωπαϊκή νομοθεσία	116
13.4 Βιβλία και τεχνική βιβλιογραφία	116
13.5 Διαδικτυακοί πόροι και τεκμηρίωση τεχνολογιών	117
13.6 Πηγές εικόνων	118

Κατάλογος σχημάτων

1	Κατηγορίες Εκπομπών	17
2	Αρχιτεκτονική Συστήματος	80
3	Βρόγχοι Ανατροφοδότησης ΧΡ	103

Κεφάλαιο 1 — Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο της εργασίας

Η A.P. Møller-Mærsk A/S είναι ένας από τους μεγαλύτερους ομίλους ολοκληρωμένης εφοδιαστικής αλυσίδας παγκοσμίως. Ιδρυθείσα το 1904, η εταιρεία δραστηριοποιείται σε περισσότερες από 130 χώρες, απασχολεί πάνω από 100.000 εργαζομένους και λειτουργεί στόλο άνω των 700 πλοίων εμπορευματοκιβωτίων — τοποθετώντας την μεταξύ των δύο ή τριών μεγαλύτερων μεταφορέων εμπορευματοκιβωτίων (*container carriers*) παγκοσμίως. Πέραν της θαλάσσιας μεταφοράς, ο όμιλος επεκτείνεται σε Logistics & Services, Terminals και Towage, υλοποιώντας τη στρατηγική μετατόπιση από αμιγώς ναυτιλιακή εταιρεία (*shipping company*) σε ολοκληρωμένο πάροχο εφοδιαστικής αλυσίδας (*integrated logistics provider*). Η κλίμακα αυτή συνεπάγεται τεράστιο ενεργειακό αποτύπωμα και, συνακόλουθα, τεράστια ευθύνη στη διαχείριση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (*greenhouse gases* — GHG).

Η θαλάσσια μεταφορά αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του παγκόσμιου εμπορίου, μεταφέροντας περίπου το 80-90% των εμπορευμάτων που κινούνται διεθνώς. Παρά την αποτελεσματικότητά της ανά τόνο-χιλιόμετρο συγκριτικά με άλλες μορφές μεταφοράς, η ναυτιλία συνεισφέρει σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές CO₂. Σύμφωνα με την Τέταρτη Μελέτη Εκπομπών GHG του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization — IMO 4th GHG Study, 2020), η διεθνής ναυτιλία ευθύνεται για περίπου **3% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂** ετησίως. Η απανθρακοποίηση του κλάδου αντιμετωπίζει ιδιαίτερες δυσκολίες: τα πλοία έχουν ωφέλιμη ζωή 25-30 ετών, απαιτούν εξαιρετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που καθιστά την αντικατάσταση των συμβατικών υδρογονανθράκων από εναλλακτικά καύσιμα τεχνολογικά απαιτητική, και δραστηριοποιούνται σε διεθνή ύδατα εκτός ενιαίου εθνικού ρυθμιστικού πλαισίου. Σε αυτό το πλαίσιο, η Maersk έχει θέσει στόχο **καθαρών μηδενικών εκπομπών έως το 2040** — δέκα χρόνια νωρίτερα από τον αντίστοιχο στόχο της IMO για το 2050 — με ενδιάμεσο ορόσημο χρήσης τουλάχιστον **30% βιώσιμης ενέργειας έως το 2030**.

Παράλληλα, το ρυθμιστικό περιβάλλον έχει εντατικοποιηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Η **Οδηγία CSRD** (*Corporate Sustainability Reporting Directive*) επιβάλλει εκτεταμένες υποχρεώσεις αναφοράς βιωσιμότητας για μεγάλες ευρωπαϊκές οντότητες. Το **EU ETS Maritime** — η επέκταση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών στη ναυτιλία — τέθηκε σε ισχύ από **1/1/2024**, με σταδιακή αύξηση των αποδοτέων εκπομπών (40% το 2024, 70% το 2025, 100% από το 2026). Η κανονιστική πράξη **FuelEU Maritime**, που

εφαρμόζεται από **1/1/2025**, θεσπίζει ποιοτικούς στόχους για την ένταση GHG των καυσίμων. Τέλος, η αναθεωρημένη στρατηγική GHG της IMO (MEPC 80, 2023) εντατικοποιεί τους στόχους μείωσης εκπομπών έως το 2030 και 2050. Η συνδυαστική πίεση αυτών των ρυθμίσεων απαιτεί από εταιρείες της κλίμακας της Maersk επίπεδα ακρίβειας, ιχνηλασιμότητας και αξιοπιστίας στη μέτρηση εκπομπών που δεν μπορούν να επιτευχθούν με χειρωνακτικές διαδικασίες. Τα λεπτομερή στοιχεία του ρυθμιστικού πλαισίου αναλύονται στο Κεφ. 2.

1.2 Στόχος της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί ο **Πάγκο Εργασίας Εκπομπών** (*Emissions Workbench*) — η κεντρική πλατφόρμα λογισμικού που σχεδίασε και υλοποίησε η ομάδα *Energy Transition (ET) Platform* της Maersk κατά το διάστημα Μαρτίου 2023 έως σήμερα. Στόχος της εργασίας είναι η τεκμηριωμένη παρουσίαση της λύσης σε τέσσερις αλληλοσυμπληρούμενες διαστάσεις: τις λειτουργικές ανάγκες και το επιχειρησιακό πλαίσιο που ώθησαν στη δημιουργία της, τις τεχνολογικές αποφάσεις και αρχιτεκτονικές επιλογές που διέπουν την υλοποίησή της, τη μεθοδολογία ανάπτυξης της ομάδας, και τα επιχειρησιακά αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν.

Αναλύεται η αρχιτεκτονική ενός συστήματος παραγωγικής κλίμακας που συνδυάζει επεξεργασία δεδομένων καθοδηγούμενη από συμβάντα (*event-driven*), προέλευση από συμβάντα (*event sourcing*) για λογιστική πράσινου καυσίμου, διεπαφές ιστού πραγματικού χρόνου (*real-time*) και ολοκλήρωση με εξωτερικά συστήματα τηλεμετρίας, αγορών καυσίμου και πιστοποίησης βιωσιμότητας. Εξετάζονται επίσης οι εργασιακές μέθοδοι *Extreme Programming* (ακραίος προγραμματισμός) στο πλαίσιο μιας κατανεμημένης ομάδας 28 μελών, και το πώς αυτές επέτρεψαν έναν κύκλο ανάπτυξης έξι μηνών έως παραγωγική λειτουργία.

Η εργασία δεν καλύπτει εμπορικά ή συμβασιακά ζητήματα της Maersk, λεπτομέρειες τιμολόγησης προς πελάτες, ή ευαίσθητα προσωπικά δεδομένα χρηστών. Επίσης δεν αποτελεί αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων του αγοράς ούτε συγκριτική μελέτη τεχνολογιών εκτός του πλαισίου της συγκεκριμένης υλοποίησης.

1.3 Συνεισφορές της εργασίας

Η συμβολή της παρούσας εργασίας εντοπίζεται σε έξι βασικούς άξονες:

- **Τεκμηριωμένη παρουσίαση των τεσσάρων πυλώνων του ET Platform.** Αποτυπώνεται η πλήρης αρχιτεκτονική των πυλώνων Ocean Emissions, Προϊόντα ECO Παράδοσης, Bunker Optimization και Net Zero 2040 — η εσωτερική αποστολή τους, η τεχνική τους υλοποίηση και η αλληλεπίδρασή τους.
- **Αρχιτεκτονική καθοδηγούμενη από συμβάντα με BEAM σε εμπορικό περιβάλλον παραγωγής.** Η εργασία τεκμηριώνει πώς η πλατφόρμα BEAM/Elixir και οι σχετικές τεχνολογίες (Phoenix LiveView, Commanded, Oban, Kafka) εφαρ-

μόζονται σε ένα σύστημα υψηλής διαθεσιμότητας με ~32 αναπτύξεις σε παραγωγή ημερησίως και 720+ μεταπτώσεις σχήματος χωρίς διακοπή υπηρεσίας.

- **Σύζευξη θεωρητικού πλαισίου με τεχνική υλοποίηση.** Τα πρότυπα λογιστικής εκπομπών GHG Protocol, ISCC, GLEC και οι κατηγορίες Scope 1/2/3 δεν παρουσιάζονται μόνο θεωρητικά, αλλά συνδέονται άμεσα με τα αντίστοιχα σχεδιαστικά πρότυπα (συντελεστές εμπορικής διαδρομής [*trade factors*], ισοζύγιο μάζας [*mass balance*], κράτηση-και-απαίτηση [*book-and-claim*]) που υλοποιήθηκαν στον κώδικα.
- **Εμπειρία εφαρμογής πρακτικών XP (Extreme Programming) σε πραγματική ομάδα παραγωγής (*production team*) της Maersk.** Η εργασία προσφέρει εμπειρική τεκμηρίωση για το πώς ο προγραμματισμός σε ζεύγη (*pair programming*), η ανάπτυξη καθοδηγούμενη από δοκιμές (*test-driven development*), η συνεχής ενσωμάτωση (*continuous integration*) και η κάθετη ιδιοκτησία (*vertical ownership*) λειτούργησαν στην πράξη.
- **Επιχειρησιακά αποτελέσματα σε μετρήσιμο βάθος.** Η εργασία συνδέει τεχνικές επιλογές με επιχειρησιακά αποτελέσματα: 1.300+ ενεργοί χρήστες, ECO Delivery αξίας 98.000 FFE / \$31 εκατομμυρίων USD για το 2024, αντιμετώπιση εσωτερικού ελέγχου GIA (Group Internal Audit) 2023, και αυτόματη παραγωγή πιστοποιητικών για ECOv1 και ECOv2.

1.4 Δομή του κειμένου

Η εργασία οργανώνεται σε δώδεκα κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μια λογική πρόοδο από το ευρύτερο πλαίσιο στην τεχνική υλοποίηση και τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 2 — Πλαίσιο και πρόβλημα αναπτύσσει εκτενώς τον επιχειρησιακό και ρυθμιστικό χώρο μέσα στον οποίο αναπτύχθηκε η πλατφόρμα: το προφίλ της Maersk, η συνεισφορά της ναυτιλίας στις παγκόσμιες εκπομπές, ο στόχος Net Zero 2040, οι ρυθμιστικές υποχρεώσεις (CSRD, EU ETS, FuelEU Maritime), η χειρωνακτική διαδικασία που προηγείτο και ο εσωτερικός έλεγχος GIA 2023 που ανέδειξε τα κενά της.

Κεφάλαιο 3 — Θεωρητικό υπόβαθρο παρουσιάζει το κανονιστικό και επιστημονικό πλαίσιο λογιστικής αερίων θερμοκηπίου: το GHG Protocol, τις κατηγορίες εκπομπών Scope 1/2/3, τις μεθοδολογίες μέτρησης TTW και WTW, τη λογική του ισοζυγίου μάζας και του book-and-claim, και τα πρότυπα ISCC, GLEC που διέπουν την πιστοποίηση βιωσιμότητας.

Κεφάλαιο 4 — Ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών: Επισκόπηση εισάγει την αποστολή και τη δομή της ομάδας ET Platform, παρουσιάζει τους τέσσερις πυλώνες σε επίπεδο αποστολής, και προσφέρει μια πρώτη επισκόπηση της διεπαφής χρήστη και των επιτευγμάτων της πλατφόρμας.

Κεφάλαιο 5 — Πυλώνας A: Ocean Emissions και STAR Connect αναλύει τον πρώτο πυλώνα: την αυτοματοποιημένη συλλογή τηλεμετρίας καυσίμων από τον στόλο

μέσω του STAR Connect, τον υπολογισμό εκπομπών ανά κίνηση εμπορευματοκιβωτίου βάσει συντελεστών εμπορικής διαδρομής, την ενσωμάτωση EU ETS και τον υπολογισμό της βάσης αναφοράς (*baseline*) εκπομπών πελατών.

Κεφάλαιο 6 — Πυλώνας Β: Προϊόντα ECO Παράδοσης και πιστοποιητικά εξετάζει τον εμπορικό πυλώνα της πλατφόρμας: τις δύο μεθοδολογίες ECOv1 και ECOv2, τη λογιστική πράσινου καυσίμου μέσω του *Energy Bank*, την αδιάσπαστη αλυσίδα ιχνηλασιμότητας ISCC/POS (Proof of Sustainability — Πιστοποιητικό Βιωσιμότητας) και την αυτόματη έκδοση πιστοποιητικών.

Κεφάλαιο 7 — Πυλώνας Γ: Bunker Optimization περιγράφει το σύστημα βελτιστοποίησης ανεφοδιασμού καυσίμου (BOPS και BoW), τον επιλύτη (*solver*) σε C++ που ενσωματώνεται μέσω Erlang Ports, και τη σύνδεση της βελτιστοποίησης κόστους καυσίμου με την ευρύτερη στρατηγική πράσινης μετάβασης.

Κεφάλαιο 8 — Τεχνολογίες παρουσιάζει αναλυτικά τις τεχνολογίες της πλατφόρμας: BEAM/Elixir, Phoenix/LiveView, PostgreSQL/Ecto, Apache Kafka, Dremio, Microsoft Azure/Kubernetes, Terraform, Nix, Oban, Commanded/EventStore και το σύνολο της στοίβας παρατηρησιμότητας (*observability*).

Κεφάλαιο 9 — Αρχιτεκτονική του συστήματος αναλύει την οργάνωση του ενιαίου αποθετηρίου (monorepo) :nrg — της βάσης κώδικα της ομάδας —, την εφαρμογή της *Clean Architecture*, τα συστατικά (components) και τα όριά τους, τη διοχέτευση (pipeline) εισαγωγής δεδομένων, το επίπεδο ιστού (web layer), την αυθεντικοποίηση και εξουσιοδότηση, τη λογική προέλευσης από συμβάντα για την Energy Bank και την στρατηγική ανάπτυξης (deployment).

Κεφάλαιο 10 — Εργασιακές μέθοδοι εξετάζει τις πρακτικές Extreme Programming που υιοθέτησε η ομάδα: τον προγραμματισμό σε ζεύγη, την ανάπτυξη καθοδηγούμενη από δοκιμές (TDD), τη συνεχή ενσωμάτωση/παράδοση, την κάθετη ιδιοκτησία, τους βρόχους ανατροφοδότησης (*feedback loops*), την ένταξη νέων μελών (*onboarding*) και τη συνεργασία σε κατανεμημένο περιβάλλον.

Κεφάλαιο 11 — Συμπεράσματα συνοψίζει τα κύρια ευρήματα, αξιολογεί τα επιτεύγματα σε σχέση με τους αρχικούς στόχους και αναδεικνύει τα μαθήματα από την υλοποίηση που έχουν μεταφερισιμότητα πέραν του συγκεκριμένου έργου.

Κεφάλαιο 12 — Μελλοντική εργασία σκιαγραφεί τις επεκτάσεις που ήδη σχεδιάζονται ή συζητιούνται: κάλυψη εκπομπών Scope 2 από γραφεία και τερματικά, επέκταση αναφοράς SBTi, προβλεπτικά αναλυτικά στοιχεία (*analytics*) και ενσωμάτωση Bunker Optimization με την Energy Bank.

Κεφάλαιο 2 — Πλαίσιο και πρόβλημα

Στο παρόν κεφάλαιο διαγράφουμε το ευρύτερο πλαίσιο μέσα στο οποίο αναπτύχθηκε ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών (*Emissions Workbench*). Αρχικά παρουσιάζεται η ίδια η Maersk ως επιχείρηση και ο κλάδος θαλάσσιων μεταφορών, στη συνέχεια αναλύεται το ρυθμιστικό και επιχειρησιακό πρόβλημα που έκανε αναγκαία την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης λύσης, και τέλος εξετάζονται οι συγκεκριμένοι καταλύτες — χρήστες, χειρωνακτικές διαδικασίες, εσωτερικός έλεγχος — που ώθησαν στη δημιουργία του συστήματος.

2.1 Η Maersk και ο τομέας της θαλάσσιας μεταφοράς

Η A.P. Møller-Maersk A/S είναι μια δανέζικη πολυεθνική εταιρεία με έδρα στην Κοπεγχάγη, ιδρυθείσα το 1904 από τον Arnold Peter Møller και τον πατέρα του Peter Maersk Møller. Από μια μικρή ατμοπλοϊκή εταιρεία του 19ου αιώνα, η Maersk εξελίχθηκε σε έναν από τους μεγαλύτερους ομίλους ολοκληρωμένης εφοδιαστικής αλυσίδας παγκοσμίως, με παρουσία σε περισσότερες από 130 χώρες και πάνω από 100.000 εργαζομένους.

Ο όμιλος δραστηριοποιείται σε τέσσερις βασικούς τομείς: **Ocean** (ναυτιλία εμπορευματοκιβωτίων), **Logistics & Services** (αποθήκευση, διανομή, τελωνειακές υπηρεσίες), **Terminals** (εμπορικά λιμάνια και τερματικοί σταθμοί) και **Towage** (ρυμουλκητικές εργασίες). Ο τομέας Ocean αποτελεί τον κορμό των δραστηριοτήτων: το 2023-2024 ο στόλος της Maersk αριθμούσε περί τα 700 πλοία εμπορευματοκιβωτίων, με συνολική μεταφορική ικανότητα που τοποθετεί την εταιρεία μεταξύ των δύο ή τριών μεγαλύτερων container carriers παγκοσμίως, διακινώντας εκατομμύρια TEU (*Twenty-foot Equivalent Units*) ετησίως σε κύρια εμπορικά δρομολόγια όλων των ωκεανών.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η Maersk πραγματοποίησε μια στρατηγική μετατόπιση από καθαρά *container shipping company* σε *integrated logistics provider*. Η εξαγορά της Hamburg Süd (2017), της Damco (ενσωμάτωση), της LF Logistics (2022) και πολλών άλλων εταιρειών logistics σηματοδοτεί αυτή τη στρατηγική βούληση. Στόχος είναι η παροχή end-to-end εφοδιαστικών λύσεων — από το εργοστάσιο παραγωγής έως την πόρτα του καταναλωτή — κάτω από μία οροφή, μειώνοντας την πολυπλοκότητα για τους πελάτες και αυξάνοντας την προστιθέμενη αξία πέραν της απλής θαλάσσιας μεταφοράς.

Αυτή η επιχειρηματική εξέλιξη συνεπάγεται και αλλαγή του αποτυπώματος CO₂ της εται-

ρείας: πέραν των εκπομπών από πλοία (Κατηγορία 1 στο GHG Protocol, βλ. Κεφ. 3), προστίθενται εκπομπές από εγκαταστάσεις αποθήκευσης, φορτηγά μεταφοράς τελευταίου μιλίου, αεροπορικές αποστολές και αλυσίδες εφοδιασμού τρίτων (Κατηγορία 3). Συνεπώς η διαχείριση των εκπομπών δεν αφορά μόνο τον στόλο, αλλά ολόκληρο το επιχειρηματικό οικοσύστημα.

2.2 Συνεισφορά της ναυτιλίας στις παγκόσμιες εκπομπές

Η θαλάσσια μεταφορά αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του παγκόσμιου εμπορίου: περίπου το 80-90% των εμπορευμάτων που κινούνται παγκοσμίως μεταφέρονται δια θαλάσσης. Παρά την τεράστια αυτή αποτελεσματικότητα σε σχέση με άλλες μορφές μεταφοράς ως προς εκπομπές ανά τόνο-χιλιόμετρο, η ναυτιλία στο σύνολό της συνεισφέρει σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (*greenhouse gases* — GHG).

Σύμφωνα με την Τέταρτη Μελέτη Εκπομπών GHG του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO 4th GHG Study, 2020), η διεθνής ναυτιλία ευθύνεται για περίπου **2,89% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂** ετησίως, αριθμός που αντιστοιχεί σε περίπου 1.056 εκατομμύρια τόνους CO₂ για το 2018. Αν συμπεριληφθούν και άλλα αέρια θερμοκηπίου (μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου), το ποσοστό ανέρχεται σε ~2,5% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών GHG. Αν συνυπολογίσει κανείς ότι η ναυτιλία αναμένεται να αυξήσει τους όγκους της παράλληλα με την παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη, η IMO εκτιμά ότι χωρίς παρέμβαση οι εκπομπές θα μπορούσαν να αυξηθούν κατά 50% έως 250% έως το 2050 σε σχέση με το 2008.

Τα κυρίαρχα καύσιμα ναυτιλίας παραμένουν τα βαριά καύσιμα υδρογονανθράκων: **HFO** (*Heavy Fuel Oil* — βαρύ πετρέλαιο), **VLSFO** (*Very Low Sulfur Fuel Oil* — ναυτιλιακό πετρέλαιο πολύ χαμηλής περιεκτικότητας θείου, εισαχθέν μετά τον κανονισμό IMO 2020 για τα θειώδη) και **MGO** (*Marine Gas Oil* — ναυτιλιακό πετρέλαιο κίνησης). Η καύση αυτών των καυσίμων παράγει όχι μόνο CO₂, αλλά και **SO_x** (οξειδία θείου), **NO_x** (οξειδία αζώτου) και σωματίδια (*particulate matter*), με αρνητικές επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα, ιδίως στις παράκτιες αστικές περιοχές κοντά σε μεγάλα λιμάνια.

Η απανθρακοποίηση της ναυτιλίας αντιμετωπίζει ιδιαίτερες τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες που δεν συναντώνται στις χερσαίες μεταφορές:

- **Μακροβιότητα περιουσιακών στοιχείων:** ένα νέο πλοίο έχει ωφέλιμη ζωή 25-30 ετών, με αποτέλεσμα οι επενδυτικές αποφάσεις σήμερα να δεσμεύουν τον στόλο έως το 2050 και πέραν.
- **Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα:** τα πλοία χρειάζονται τεράστιες ποσότητες ενέργειας για να διανύσουν αποστάσεις χιλιάδων ναυτικών μιλίων. Η αντικατάσταση των υγρών υδρογονανθράκων από εναλλακτικά καύσιμα (υδρογόνο, αμμωνία, μεθανόλη, e-fuels) παραμένει τεχνολογικά ανώριμη ή οικονομικά ασύμφορη σε μεγάλη κλίμακα.
- **Παγκόσμια δικαιοδοσία:** τα πλοία δραστηριοποιούνται σε διεθνή ύδατα, εκτός ενιαίου εθνικού ρυθμιστικού πλαισίου, καθιστώντας τον συντονισμό διεθνώς αναγκαίο

και πολύπλοκο.

Στο πλαίσιο αυτό, μια εταιρεία όπως η Maersk — με στόλο ~700 πλοίων που καταναλώνουν εκατομμύρια τόνους καυσίμου ετησίως — έχει τόσο σημαντικό αντίκτυπο στις παγκόσμιες εκπομπές, όσο και σημαντικό πλεονέκτημα κλίμακας για να πρωτοπορήσει στην αλλαγή. Η ακριβής γνώση των ιδίων εκπομπών αποτελεί προϋπόθεση για οποιαδήποτε μείωσή τους.

2.3 Ο στόχος Net Zero 2040 της Maersk

Η Maersk είναι μία από τις λίγες μεγάλες εταιρείες θαλάσσιων μεταφορών που έχουν δεσμευτεί δημόσια σε **καθαρές μηδενικές εκπομπές μέχρι το 2040** — δέκα ολόκληρα χρόνια πριν από τον στόχο του IMO για καθαρές μηδενικές εκπομπές το 2050. Ο στόχος αυτός δεν αφορά μόνο το μεσοπρόθεσμο, αλλά συνοδεύεται από ενδιάμεσο ορόσημο: **30% χρήση βιώσιμης ενέργειας** (*sustainable energy usage*) μέχρι το 2030.

Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, η Maersk έχει προχωρήσει σε μια σειρά συγκεκριμένων κινήσεων. Πρώτον, έχει παραγγείλει δεκάδες πλοία έτοιμα για μεθανόλη (*methanol-ready*), δηλαδή πλοία σχεδιασμένα να λειτουργούν με πράσινη μεθανόλη, ένα καύσιμο που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και βιομάζα. Το 2023, το *Laura Maersk* αποπλεύσε ως το πρώτο μεγάλο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (*container ship*) παγκοσμίως που λειτουργεί με e-methanol, σηματοδοτώντας μια ορόσημο τεχνολογικής εξέλιξης για τον κλάδο. Παράλληλα, η εταιρεία διερευνά τη χρήση **αμμωνίας** και **βιοκαυσίμων** (*biodiesel*) ως πρόσθετες επιλογές μειωμένου άνθρακα, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και το κόστος τους.

Δεύτερον, η Maersk έχει αναπτύξει ένα χαρτοφυλάκιο **ECO προϊόντων** (*ECO Products*) — υπηρεσιών μεταφοράς που επιτρέπουν στους πελάτες να επιλέξουν αποστολές με μειωμένες ή μηδενικές εκπομπές, χρεώνοντας την αντίστοιχη προνομιακή (*premium*) τιμή. Αυτά τα προϊόντα, που αναλύονται στο Κεφ. 6, προϋποθέτουν ακριβή καταγραφή και πιστοποίηση εκπομπών — ακριβώς αυτό που ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών παρέχει.

Τρίτον, η Maersk συνεργάζεται με διεθνείς οργανισμούς επαλήθευσης και πιστοποίησης, όπως η **ABS** (*American Bureau of Shipping*) και η **Lloyd's Register**, για την ανεξάρτητη επαλήθευση των εκπομπών και τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ISCC Plus και διάφορα κλαδικά πρότυπα ανανεώσιμης ενέργειας. Η αξιοπιστία των δεδομένων εκπομπών απέναντι σε τρίτους ελεγχτές αποτελεί κρίσιμη απαίτηση που διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό τον τεχνικό σχεδιασμό του Emissions Workbench (βλ. Κεφ. 4, 9).

Αξίζει να τονιστεί ότι ο στόχος Net Zero 2040 δεν είναι απλώς μια δήλωση εταιρικής κοινωνικής ευθύνης. Είναι συνδεδεμένος με επενδυτικές αποφάσεις δισεκατομμυρίων ευρώ, εμπορικά προϊόντα που ήδη πωλούνται στην αγορά και ρυθμιστικές υποχρεώσεις που απαιτούν επαληθεύσιμα αποδεικτικά στοιχεία. Κατά συνέπεια, η μέτρηση και διαχείριση εκπομπών δεν αποτελεί περιθωριακή λειτουργία, αλλά στρατηγική επιχειρηματική ανάγκη πρώτης γραμμής.

2.4 Ρυθμιστικό πλαίσιο

Η στρατηγική βούληση της Maersk για Net Zero 2040 συνυπάρχει με έναν εντυπωσιακά πολύπλοκο και ταχέως εξελισσόμενο κανονιστικό χώρο. Την περίοδο 2023-2025, σειρά ρυθμίσεων σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο εισήγαγε νέες υποχρεωτικές απαιτήσεις μέτρησης, αναφοράς και κόστους για τις εκπομπές του ναυτιλιακού κλάδου. Κατανοώντας αυτό το πλαίσιο, γίνεται σαφές γιατί ένα σύστημα όπως ο Emissions Workbench είναι αναγκαίο.

CSRD — Οδηγία Εταιρικής Βιωσιμότητας

Η **Οδηγία για την Εταιρική Αναφορά Βιωσιμότητας** (*Corporate Sustainability Reporting Directive* — CSRD, Οδηγία ΕΕ 2022/2464) αποτελεί σημαντική αναβάθμιση της προηγούμενης Οδηγίας NFRD (*Non-Financial Reporting Directive*). Ισχύει σταδιακά από τα οικονομικά έτη 2024 και 2025 για μεγάλες εταιρείες δημοσίου συμφέροντος, και επεκτείνεται στις μεγαλύτερες μη εισηγμένες εταιρείες από το 2026. Η Maersk, ως εισηγμένη στο χρηματιστήριο της Κοπεγχάγης και με εταιρίες δραστηριοποιούμενες εντός ΕΕ, εμπίπτει στις πρώιμες υποχρεώσεις.

Βάσει της CSRD, οι εταιρείες υποχρεούνται να δημοσιεύουν ετήσιες εκθέσεις βιωσιμότητας σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα Αναφοράς Βιωσιμότητας (*European Sustainability Reporting Standards* — ESRS), που περιλαμβάνουν λεπτομερή δεδομένα εκπομπών GHG κατηγοριών 1, 2 και 3. Κρίσιμο στοιχείο: οι εκθέσεις αυτές υπόκεινται σε **ανεξάρτητο έλεγχο** (*limited assurance*) από πιστοποιημένους ελεγκτές. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα εκπομπών πρέπει να είναι επαληθεύσιμα, τεκμηριωμένα και ελέγξιμα — ακριβώς η λειτουργία που ο Emissions Workbench παρέχει (βλ. Κεφ. 4).

Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών για τη Ναυτιλία — EU ETS Maritime

Το **Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών** (*EU Emissions Trading System* — EU ETS) επεκτάθηκε στη ναυτιλία από **1 Ιανουαρίου 2024** (βάσει αναθεωρημένης Οδηγίας ETS, 2023/959). Σύμφωνα με αυτό:

- Από 1/1/2024: υποχρεωτική αναφορά και παράδοση **δικαιωμάτων εκπομπών** (*EU Allowances* — EUA) για το 40% των εκπομπών CO₂ πλοίων άνω των 5.000 GT που πραγματοποιούν δρομολόγια εντός ή μεταξύ λιμανιών του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου (EOX).
- Από 1/1/2025: κάλυψη αυξάνεται στο **70%** των εκπομπών.
- Από 1/1/2026: πλήρης κάλυψη **100%** των εκπομπών.

Πέραν του CO₂, σταδιακά εντάσσονται και άλλα αέρια (μεθάνιο CH₄, υποξείδιο του αζώτου N₂O) για συγκεκριμένες κατηγορίες πλοίων. Το EU ETS Maritime εισάγει άμεσο οικονομικό κόστος για τις εκπομπές: κάθε τόνος CO₂ χωρίς αντίστοιχο δικαίωμα εκπομπής

(allowance) επισύρει χρηματική ποινή. Κατά συνέπεια, η ακριβής παρακολούθηση και η δυνατότητα βελτιστοποίησης των εκπομπών αποκτούν άμεση χρηματοοικονομική αξία — μειώνοντας τη δαπάνη για αγορά EUA από τα χρηματιστήρια άνθρακα.

Κανονισμός Ναυτιλίας FuelEU — FuelEU Maritime

Ο Κανονισμός **FuelEU Maritime** (Κανονισμός ΕΕ 2023/1805) εστιάζει στην ποιότητα καυσίμων αντί για τις ποσοτικές εκπομπές. Εφαρμόζεται από **1 Ιανουαρίου 2025** σε πλοία άνω των 5.000 GT που χρησιμοποιούν λιμάνια EOX. Ορίζει στόχους μείωσης **εντάσεως GHG** (*GHG intensity*) του ενεργειακού μίγματος που χρησιμοποιούν τα πλοία σε σχέση με μια βασική τιμή αναφοράς:

- 2025: −2% σε σχέση με τη βάση 2020
- 2030: −6%
- 2035: −14,5%
- ... σταδιακά έως −80% το 2050

Η ένταση GHG υπολογίζεται σε βάση κύκλου ζωής (*Well-to-Wake*) για κάθε τύπο καυσίμου, παρέχοντας κίνητρα χρήσης βιοκαυσίμων, ηλεκτρο-καυσίμων (e-fuels) και ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Η Maersk, επενδύοντας σε πλοία έτοιμα για μεθανόλη και εναλλακτικά καύσιμα, εντάσσεται στη στρατηγική συμμόρφωσης με αυτόν τον κανονισμό.

IMO MEPC — Στρατηγική GHG 2023

Στο διεθνές επίπεδο, η **Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος** (*Marine Environment Protection Committee* — MEPC) του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας (*International Maritime Organization* — εφεξής IMO) υιοθέτησε αναθεωρημένη στρατηγική GHG το 2023 (MEPC 80):

- Μείωση εκπομπών GHG κατά **20-30%** έως το 2030 σε σχέση με το 2008 (με φιλόδοξο στόχο 30%).
- **Μηδενισμός** εκπομπών GHG έως το **2050** ή κοντά σε αυτό.
- Ενδιάμεσο ορόσημο: μείωση **70-80%** έως το 2040.

Η στρατηγική αυτή είναι πιο φιλόδοξη από την προηγούμενη (2018) και αναμένεται να μεταφραστεί σε δεσμευτικούς κανονισμούς — όπως ο **Carbon Intensity Indicator** (*CII*) που ήδη λειτουργεί από 2023 και βαθμολογεί κάθε πλοίο ετησίως σε κλίμακα A-E.

Εθελοντικά πλαίσια αναφοράς: CDP και GRESB

Πέραν των υποχρεωτικών κανονισμών, η Maersk συμμετέχει εθελοντικά στο **Carbon Disclosure Project** (*CDP*), έναν μη κερδοσκοπικό οργανισμό που διαχειρίζεται το μεγαλύτερο σύστημα αποκάλυψης περιβαλλοντικών δεδομένων παγκοσμίως, καθώς και στο **GRESB** (*Global ESG Benchmark for Real Assets*) για τα ακίνητα και τελματικά περιουσιακά

στοιχεία. Αυτές οι αναφορές λαμβάνονται υπόψη από επενδυτές, δανειστές και μεγάλους εταιρικούς πελάτες που αξιολογούν την απόδοση ESG (*Environmental, Social, Governance*) των εφοδιαστικών τους αλυσίδων.

Το ρυθμιστικό αυτό τοπίο παρουσιάζεται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Κανονισμός	Ισχύει από	Πεδίο εφαρμογής	Βασικός μηχανισμός
CSRD	Οικ. έτος 2024	Μεγάλες εταιρείες ΕΕ	Υποχρεωτική αναφορά βιωσιμότητας, ανεξάρτητος έλεγχος
EU ETS Maritime	1/1/2024	Πλοία >5.000 GT, λιμάνια EOX	Αγορά δικαιωμάτων εκπομπών (EUA)
FuelEU Maritime	1/1/2025	Πλοία >5.000 GT, λιμάνια EOX	Στόχοι έντασης GHG, Well-to-Wake
IMO CII	2023	Πλοία >5.000 GT, διεθνής	Ετήσια βαθμολόγηση ενεργειακής απόδοσης A-E
IMO Net Zero 2050	Μεσοπρόθεσμη δέσμευση	Διεθνής ναυτιλία	Στόχοι μείωσης 2030/2040/2050

Ο συνδυασμός αυτών των κανονισμών δημιουργεί ισχυρά κίνητρα — τόσο κανονιστικά όσο και οικονομικά — για την επένδυση σε ακριβή συστήματα μέτρησης και διαχείρισης εκπομπών.

2.5 Η προηγούμενη χειρωνακτική διαδικασία

Πριν αναπτυχθεί ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών, οποιοδήποτε αίτημα για δεδομένα εκπομπών στη Maersk ακολουθούσε μια πλήρως χειρωνακτική, κατακερματισμένη διαδικασία πέντε σταδίων:

1. **Υποβολή αιτήματος μέσω email:** Ένας χρήστης (πωλητής, υπεύθυνος προϊόντος, κ.λπ.) αποστέλλει email στην ομάδα Emissions Reporting ζητώντας δεδομένα εκπομπών για συγκεκριμένο πελάτη ή χρονικό διάστημα.
2. **Χειρωνακτική εξαγωγή δεδομένων αποστολών:** Μέλος της ομάδας Emissions Reporting εξάγει χειρωνακτικά τα σχετικά δεδομένα αποστολών από εσωτερικά πληροφοριακά συστήματα και βάσεις δεδομένων.
3. **Χειρωνακτική εφαρμογή συντελεστών εκπομπών:** Τα δεδομένα αποστολών επεξεργάζονται — επίσης χειρωνακτικά — ώστε να υπολογιστούν οι εκπομπές CO₂ βάσει της καθορισμένης μεθοδολογίας, χρησιμοποιώντας κατά κανόνα αρχεία Excel.

4. **Κατασκευή έκθεσης:** Τα αποτελέσματα ενσωματώνονται σε μια αναφορά, με σχεδιασμό και μορφοποίηση που επίσης απαιτεί χειρωνακτική εργασία.
5. **Αποστολή αποτελέσματος μέσω email:** Η έκθεση επιστρέφεται στον αρχικό αιτούντα, ολοκληρώνοντας έτσι έναν κύκλο που αθροιστικά μπορούσε να διαρκέσει **3 έως 8 εβδομάδες**.

Αυτή η διαδικασία, εκτός από τη χρονοβόρα φύση της, εμφάνιζε μια σειρά δομικών αδυναμιών που την καθιστούσαν ακατάλληλη τόσο για εσωτερικές επιχειρησιακές ανάγκες όσο και για εξωτερική κανονιστική συμμόρφωση.

Εξάρτηση από χειρωνακτική εργασία: Κάθε αίτημα απαιτούσε ανθρώπινη παρέμβαση σε κάθε στάδιο. Δεν υπήρχε δυνατότητα αυτεξυπηρέτησης (*self-service*) για τους χρήστες, ούτε αυτοματισμός οποιουδήποτε μέρους της ροής.

Προβλήματα ποιότητας δεδομένων και κανονικοποίησης: Δεδομένα από διαφορετικά πληροφοριακά συστήματα (σε διαφορετικές μορφές, με διαφορετικές συμβάσεις ονοματολογίας) κανονικοποιούνταν χειρωνακτικά. Για παράδειγμα, η ίδια τοποθεσία μπορούσε να αναγράφεται με διαφορετικό τρόπο σε δύο βάσεις δεδομένων (πχ “Rotterdam”, “RTM”, “Port of Rotterdam”), και ο χειριστής έπρεπε να αναγνωρίσει και να συγχωνεύσει αυτές τις ασυνέπειες. Αυτό αποτελούσε σημαντική πηγή σφαλμάτων.

Εγγύηση πρόσφατων δεδομένων (*data freshness*): Στο διάστημα μεταξύ συλλογής δεδομένων και παράδοσης αποτελεσμάτων, τα υποκείμενα δεδομένα μπορούσαν να είχαν αλλάξει στα συστήματα πηγής (π.χ. αναθεώρηση καταναλωθέντος καυσίμου, διόρθωση στοιχείων αποστολής). Ο αποδέκτης της έκθεσης δεν είχε τρόπο να γνωρίζει αν τα δεδομένα αντικατόπτριζαν ακόμη την πραγματικότητα.

Απουσία ελεγχιμότητας (*audit trail*): Δεν υπήρχε αυτόματη καταγραφή του ποια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν, πότε, και ποια μεθοδολογία εφαρμόστηκε. Αν μια ελεγκτική αρχή (π.χ. EU ETS, ελεγκτής CSRD) ζητούσε αναπαραγωγή ενός υπολογισμού από παλαιότερο έτος, μπορεί να διαπιστωνόταν ότι τα πηγαία δεδομένα είχαν αντικατασταθεί ή χαθεί, και η μεθοδολογία δεν μπορούσε να αποδειχθεί ότι εφαρμόστηκε ορθώς.

Μη επαναληψιμότητα: Ένας χειρωνακτικός υπολογισμός στο Excel δεν εγγυάται ότι εφαρμόστηκε ακριβώς η ίδια μεθοδολογία κάθε φορά. Διαφορετικοί χειριστές μπορεί να εφάρμοζαν ελαφρώς διαφορετικές εκδοχές της μεθοδολογίας, οδηγώντας σε ασυνέπειες μεταξύ αναφορών.

Έλλειψη κλιμάκωσης (*scalability*): Καθώς η Maersk επέκτεινε τα ECO προϊόντα και αυξανόταν η ζήτηση για δεδομένα εκπομπών από περισσότερες ομάδες (βλ. ενότητα 2.6), η χειρωνακτική διαδικασία δεν μπορούσε να ανταποκριθεί στον όγκο — οδηγώντας σε ουρές αιτημάτων, καθυστερήσεις και συσσωρευμένη εργασία για την ομάδα Emissions Reporting.

Η συνολική εικόνα ήταν ένα σύστημα που λειτουργούσε ως εμπόδιο αντί ως διευκολυντής. Η ομάδα Emissions Reporting δαπανούσε το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου της σε επαναλαμβανόμενες, χειρωνακτικές εργασίες χαμηλής αξίας, αντί να επικεντρώνεται στη βελτίωση μεθοδολογίας, στην ανάλυση τάσεων ή στην υποστήριξη στρατηγικών αποφάσεων. Αυτή η αποτυχία της υφιστάμενης κατάστασης (*status quo*) ήταν ο άμεσος επιχειρησιακός

καταλύτης για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου λογισμικού.

2.6 Ομάδες χρηστών και ανάγκες τους

Η χειρωνακτική διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 2.5 δεν εξυπηρετούσε έναν μεμονωμένο τύπο χρήστη, αλλά ένα διευρυμένο φάσμα εσωτερικών ομάδων με διαφορετικές ανάγκες, που συχνά λειτουργούσαν σε χρονικά αντικρουόμενες προθεσμίες. Κατά την έναρξη του έργου Emissions Workbench, πριν ακόμη παρουσιαστεί στους χρήστες, οι εσωτερικές ομάδες που επηρεάζονταν από την ανεπαρκή ροή δεδομένων εκπομπών αριθμούσαν **πάνω από 1.300 ενεργούς χρήστες**.

Οι έξι κύριες ομάδες χρηστών, όπως αποτυπώθηκαν κατά τη φάση ανάλυσης απαιτήσεων, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ομάδα χρηστών	Τύπος δεδομένων που ζητούν	Συχνότητα	Μορφή
ECO Delivery Ocean Products	Εκπομπές ανά αποστολή για ECO προϊόντα, πιστοποιητικά ECOv1/ECOv2	Πολλαπλές φορές ημερησίως	Αυτόματα πιστοποιητικά, API
Regional Product Management	Συγκεντρωτικά δεδομένα εκπομπών ανά περιοχή / προϊόν, τάσεις	Εβδομαδιαία / μηνιαία	Αναφορές, αρχεία Excel
Commercial Sustainability	Εκπομπές πελατών για αναφορά ESG, στοιχεία CSRD	Τριμηνιαία / ετήσια	Αναφορές συμμόρφωσης, επαληθεύσιμα δεδομένα
Regional Sales	Δεδομένα εκπομπών για τρέχουσες διαπραγματεύσεις με πελάτες, ανταγωνιστική σύγκριση	Κατά περίπτωση (ad hoc), υψηλή χρονική πίεση	Σύντομες αναφορές, γρήγορη πρόσβαση
Contract Management	Επαλήθευση εκπομπών σύμφωνα με συμβατικές δεσμεύσεις προς πελάτες	Ανά σύμβαση / περίοδο	Πιστοποιητικά, δεδομένα έτοιμα για έλεγχο (audit-ready)

Ομάδα χρηστών	Τύπος δεδομένων που ζητούν	Συχνότητα	Μορφή
Account Managers	Τρέχουσες εκπομπές συγκεκριμένου πελάτη για υποστήριξη συζητήσεων	Κατά περίπτωση, σε πραγματικό χρόνο	Οθόνη αποτελεσμάτων, λήψη αρχείου

Κάθε ομάδα εμφανίζει ξεχωριστά χαρακτηριστικά που θέτουν διαφορετικές τεχνικές απαιτήσεις στο σύστημα:

Τα **ECO Delivery Ocean Products** (προϊόντα ECO) χρειάζονται τα δεδομένα σε πλήρως αυτοματοποιημένη μορφή — πιστοποιητικά που δημιουργούνται χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, έτοιμα να αποσταλούν σε πελάτες. Ο όγκος και η ταχύτητα (πλήθος αποστολών σε πραγματικό χρόνο) καθιστούν τη χειρωνακτική διαδικασία αδύνατη.

Οι **Regional Sales** (πωλήσεις) και **Account Managers** (διαχειριστές λογαριασμών) χρειάζονται γρήγορη πρόσβαση κατά τη διάρκεια διαπραγματεύσεων ή συναντήσεων πελατών — συχνά κατά περίπτωση, χωρίς τη δυνατότητα αναμονής 3-8 εβδομάδων. Μια καθυστέρηση σε αυτό το πλαίσιο μπορεί να σημαίνει απώλεια σύμβασης.

Η **Commercial Sustainability** (εμπορική βιωσιμότητα) εστιάζει στην επαληθευσσιμότητα: τα δεδομένα που υποβάλλονται για CSRD ή CDP πρέπει να μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα, με πλήρες ιστορικό αλλαγών δεδομένων.

Η **Contract Management** (διαχείριση συμβολαίων) απαιτεί αρχεία που αποδεικνύουν συμμόρφωση με συγκεκριμένες συμβατικές δεσμεύσεις εκπομπών, αναφορικά με συγκεκριμένες αποστολές και χρονικές περιόδους.

Αυτή η ποικιλομορφία αναγκών (ταχύτητα, επαληθευσσιμότητα, αυτοματισμός, κλιμακωσιμότητα) ορίζει ουσιαστικά το φάσμα των λειτουργικών απαιτήσεων που καλείται να καλύψει ο Emissions Workbench. Απαιτείται μια πλατφόρμα ικανή να εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολύ διαφορετικές χρήσεις, με δεδομένα ανανεωμένα σε πραγματικό χρόνο και ιστορικό που διατηρείται αναλλοίωτο για ελέγχους (βλ. Κεφ. 4).

2.7 Ο εσωτερικός έλεγχος GIA του 2023

Αν η λειτουργική ανεπάρκεια της χειρωνακτικής διαδικασίας αποτελούσε τον σταθερό, μακροπρόθεσμο λόγο για ανάπτυξη νέου συστήματος, ο **εσωτερικός έλεγχος GIA** (*Group Internal Audit*) της Maersk το 2023 υπήρξε ο κατεπείγων καταλύτης που επιτάχυνε δραματικά την ανάπτυξη. Ο έλεγχος αυτός εντόπισε τα εξής συγκεκριμένα ζητήματα:

- **Παρακολούθηση δεδομένων (data tracking):** Δεν υπήρχε ενιαίο σύστημα παρακολούθησης της ροής δεδομένων εκπομπών από την πηγή έως την τελική αναφορά. Αδύνατος ο προσδιορισμός πότε άλλαξαν τα δεδομένα ή γιατί εμφανίζεται ασυνέπεια μεταξύ δύο αναφορών.

- **Ίχνος ελέγχου** (*audit trail*): Η απουσία αυτόματης καταγραφής κάθε βήματος επεξεργασίας σήμαινε ότι ο έλεγχος δεν μπορούσε να επαληθεύσει ανεξάρτητα τους υπολογισμούς. Αυτό αποτελούσε κρίσιμο εύρημα υπό το φως των ερχόμενων υποχρεώσεων CSRD και EU ETS.
- **Κλιμακωσιμότητα** (*scalability*): Ο αριθμός αιτημάτων αυξανόταν ταχύτατα λόγω της ανάπτυξης των ECO προϊόντων, χωρίς αντίστοιχη κλιμάκωση της ανθρώπινης δυναμικότητας. Το σύστημα ήταν ευάλωτο σε καθυστερήσεις ή αποτυχία κατά τις περιόδους αιχμής.
- **Ποσοστό σφαλμάτων** (*error rates*): Χειρωνακτικές διαδικασίες εγγενώς ενέχουν υψηλότερο ποσοστό σφαλμάτων σε σχέση με αυτοματοποιημένες. Ο έλεγχος εντόπισε περιπτώσεις λανθασμένης εφαρμογής μεθοδολογίας ή ελλιπούς κανονικοποίησης δεδομένων.

Το αποτέλεσμα του ελέγχου GIA ήταν ένα επίσημο αρχείο ευρημάτων και συστάσεων προς τη διοίκηση, με σαφή αναφορά στην αναγκαιότητα αυτοματοποίησης και αναβάθμισης της διαδικασίας διαχείρισης δεδομένων εκπομπών. Αυτό επιτάχυνε σημαντικά την έγκριση πόρων και προτεραιοτήτων για την ανάπτυξη του Emissions Workbench.

Σημαντικό είναι ότι το ET Platform δεν αντιμετώπισε τον έλεγχο GIA ως εξωτερική πίεση προς συμμόρφωση, αλλά ως ευκαιρία να τεκμηριώσει επίσημα ζητήματα που ήταν ήδη γνωστά στην ομάδα. Το επίσημο εύρημα του ελέγχου έδωσε το βάρος που απαιτούνταν για να αιτιολογηθεί επενδυτικά η ανάπτυξη εξ ολοκλήρου νέου συστήματος, αντί επιδιορθωτικών λύσεων στην υπάρχουσα ροή εργασίας βασισμένη σε Excel (*Excel-based workflow*).

Ως αποτέλεσμα, ο Emissions Workbench αναπτύχθηκε από τον Μάρτιο 2023 και απέκτησε τους πρώτους χρήστες παραγωγής τον Σεπτέμβριο 2023, σε περίπου έξι μήνες. Το κύριο έναυσμα ήταν η αντιμετώπιση των ευρημάτων του ελέγχου GIA, ο οποίος λειτούργησε ως μοχλός εταιρικής αλλαγής.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύσαμε το πλαίσιο μέσα στο οποίο γεννήθηκε η ανάγκη για τον Πάγκο Εργασίας Εκπομπών: από την κλίμακα και τη στρατηγική της Maersk, στο παγκόσμιο αποτύπωμα της ναυτιλίας, στα νέα ρυθμιστικά βάρη, στη δυσλειτουργία της χειρωνακτικής διαδικασίας, και στον επίσημο εσωτερικό έλεγχο που λειτούργησε ως τελικός καταλύτης. Το επόμενο κεφάλαιο (Κεφ. 3) θα θεμελιώσει τη θεωρητική βάση: τη μεθοδολογία λογιστικής αερίων θερμοκηπίου που διέπει τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα υπολογίζει τις εκπομπές.

Κεφάλαιο 3 — Θεωρητικό υπόβαθρο: Λογιστική αερίων θερμοκηπίου

Η μέτρηση, η καταγραφή και η αναφορά των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (greenhouse gas emissions) αποτελεί σήμερα θεμελιώδη προϋπόθεση για κάθε οργανισμό που επιδιώκει τεκμηριωμένη απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Για να κατανοηθεί πλήρως ο σχεδιασμός και η λειτουργία του Πάγκου Εργασίας Εκπομπών (Emissions Workbench) που αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια, είναι απαραίτητη η εξοικείωση με το θεωρητικό πλαίσιο της λογιστικής άνθρακα (carbon accounting). Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα διεθνή πρότυπα, τις μεθοδολογίες υπολογισμού και τις βασικές έννοιες που διέπουν αυτό το πεδίο: από το GHG Protocol ως τις κατηγορίες εκπομπών (scopes), από τη διαφορά *Tank-to-Wake* και *Well-to-Wake* ως τις έννοιες του ισοζυγίου μάζας (mass balance) και του book-and-claim.

3.1 Το Πρωτόκολλο Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου

Ιστορικό και θεσμικό πλαίσιο

Η συστηματική λογιστική των αερίων θερμοκηπίου (αέρια ΘΚ) σε εταιρικό επίπεδο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στο Πρωτόκολλο Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου (*Greenhouse Gas Protocol*, εφεξής GHGP). Το πρωτόκολλο αναπτύχθηκε από κοινού από το Παγκόσμιο Επιχειρηματικό Συμβούλιο για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη (*World Business Council for Sustainable Development*, WBCSD) και το Ινστιτούτο Παγκόσμιων Πόρων (*World Resources Institute*, WRI). Ο *Corporate Accounting and Reporting Standard* δημοσιεύθηκε αρχικά το 2001 και αναθεωρήθηκε το 2004 σε αυτή που αποτελεί σήμερα την καθιερωμένη αναφορά για εταιρικές απογραφές αερίων ΘΚ [GHG Protocol Corporate Standard, 2004]. Το 2011 δημοσιεύθηκε το *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard* [GHG Protocol Scope 3 Standard, 2011], το οποίο εισήγαγε λεπτομερή κατηγοριοποίηση των έμμεσων εκπομπών στην αλυσίδα αξίας.

Η θεσμική βάση των αερίων που υπόκεινται σε καταγραφή έχει τις ρίζες της στο Πρωτόκολλο του Κιότο (1997), το οποίο όρισε έξι ομάδες αερίων με δυνητική επίδραση στο κλίμα:

διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μεθάνιο (CH_4), υποξείδιο του αζώτου (N_2O), υδροφθοράνθρακες (HFCs), υπερφθοράνθρακες (PFCs) και εξαφθοριούχο θείο (SF_6). Το 2012, μέσω της τροποποίησης Doha, προστέθηκε και το τριφθοριούχο άζωτο (NF_3) [UNFCCC, 2012].

Η έννοια του CO_2e και του Δυναμικού Υπερθέρμανσης του Πλανήτη

Προκειμένου να συγκριθούν και να συγκεντρωθούν εκπομπές διαφορετικών αερίων σε ένα ενιαίο μέτρο, χρησιμοποιείται η έννοια του ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO_2 equivalent, CO_2e). Η μετατροπή βασίζεται στο *Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη* (Global Warming Potential — GWP) κάθε αερίου, δηλαδή στη θερμική ενέργεια που δεσμεύει στην ατμόσφαιρα σε ορίζοντα 100 ετών σε σχέση με ισόποση ποσότητα CO_2 . Για παράδειγμα, το CH_4 έχει $\text{GWP} \approx 28$ και το $\text{N}_2\text{O} \approx 265$ (δηλαδή 28 και 265 φορές πιο ισχυρό από το CO_2 αντίστοιχα), σύμφωνα με τις τιμές της 5ης Έκθεσης Αξιολόγησης του IPCC [IPCC AR5, 2013]. Η χρήση ενιαίου μετρικού CO_2e επιτρέπει τόσο την εσωτερική σύγκριση πηγών εκπομπών, όσο και τη διαμόρφωση ανταλλάξιμων μονάδων ανθρακικής αγοράς.

Σχέση με άλλα πρότυπα

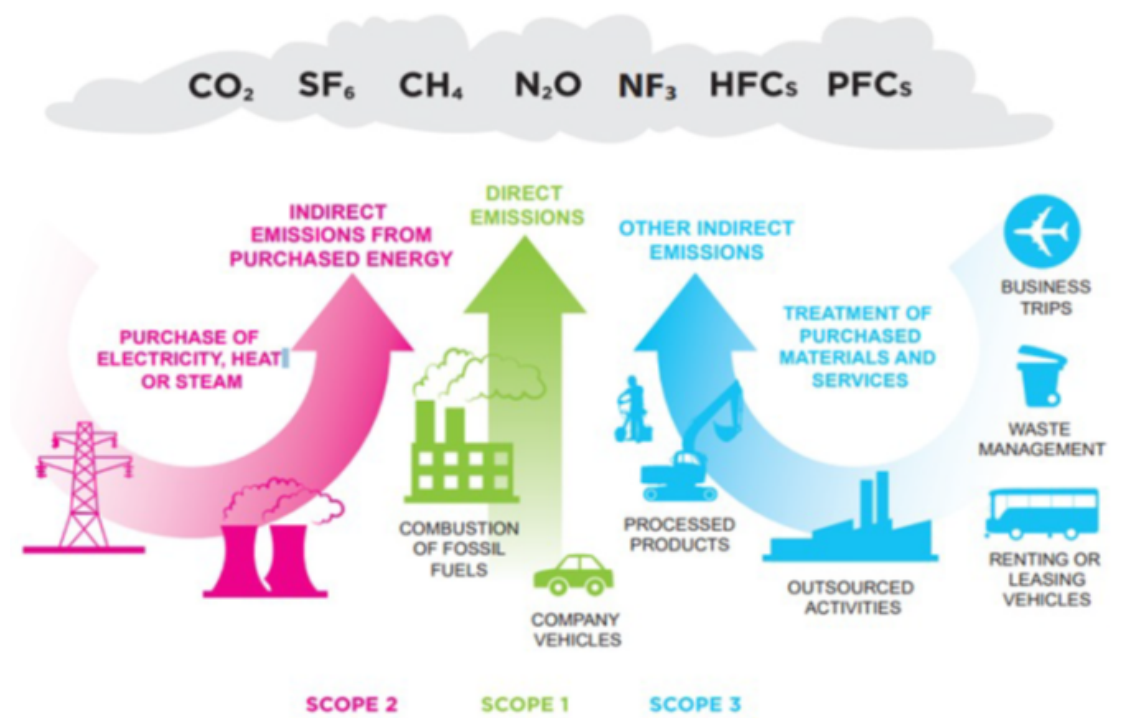
Το GHGP λειτουργεί ως οριζόντιο πλαίσιο αρχών, συμβατό με σειρά εξειδικευμένων προτύπων. Το πρότυπο **ISO 14064** (έκδοση 2006, αναθεωρημένο 2018) εισάγει απαιτήσεις επαλήθευσης και πιστοποίησης: το ISO 14064-1 αφορά τις οργανωτικές απογραφές, το ISO 14064-2 τα έργα μείωσης εκπομπών, και το ISO 14064-3 τον έλεγχο και την επικύρωση. Στον τομέα των μεταφορών, το ευρωπαϊκό πρότυπο **EN 16258:2012** ορίζει μεθοδολογία για τον υπολογισμό εκπομπών στη μεταφορά εμπορευμάτων και επιβατών, και αποτελεί βάση για το GLEC Framework που αναλύεται στην ενότητα 3.6 [CEN EN 16258, 2012]. Η συνοχή μεταξύ αυτών των πλαισίων επιτρέπει σε οργανισμούς όπως η Maersk να διατηρούν ενιαία μεθοδολογία που ικανοποιεί ταυτόχρονα εσωτερικές επιχειρηματικές ανάγκες, εξωτερικές κανονιστικές απαιτήσεις (CSRD, EU ETS) και εθελοντικές πιστοποιήσεις.

3.2 Κατηγορίες Εκπομπών (Scopes)

Το κεντρικό εννοιολογικό εργαλείο του GHGP είναι η κατηγοριοποίηση των εκπομπών σε τρεις *scopes* (κατηγορίες/πεδία), ανάλογα με τη θέση τους στην αλυσίδα αξίας και τη σχέση τους με τις δραστηριότητες του οργανισμού.

Κατηγορία 1 (Scope 1): Άμεσες εκπομπές

Οι εκπομπές Scope 1 προέρχονται από πηγές που ανήκουν ή ελέγχονται άμεσα από τον οργανισμό. Για μια ναυτιλιακή εταιρεία όπως η Maersk, αυτές περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο την καύση καυσίμων στα ιδιόκτητα πλοία, τις σταθερές εγκαταστάσεις (γραφεία, αποθήκες,



Σχήμα 1: Κατηγορίες Εκπομπών

τερματικοί σταθμοί που λειτουργεί η ίδια η εταιρεία), καθώς και τα οχήματα που ανήκουν στον οργανισμό [GHG Protocol Corporate Standard, 2004].

Κατηγορία 2 (Scope 2): Έμμεσες εκπομπές από ενέργεια

Οι εκπομπές Scope 2 αφορούν τις έμμεσες εκπομπές που συνδέονται με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας, ατμού ή ψύξης από τρίτους παρόχους. Οι εκπομπές παράγονται φυσικά εκτός του οργανισμού — στο σταθμό παραγωγής ενέργειας ή στο σύστημα τηλεθέρμανσης — αλλά αποδίδονται λογιστικά στον καταναλωτή. Στη Maersk, τυπικές πηγές Scope 2 είναι η κατανάλωση ηλεκτρισμού στα κεντρικά γραφεία και στους λιμενικούς τερματικούς σταθμούς. Σύμφωνα με το GHGP Scope 2 Guidance (2015), διακρίνονται δύο μέθοδοι υπολογισμού: η *location-based* (βάσει μέσου συντελεστή εκπομπών ηλεκτρισμού της αγοράς) και η *market-based* (βάσει συμβολαίων αγοράς ανανεώσιμης ενέργειας ή εγγυήσεων προέλευσης) [GHG Protocol Scope 2 Guidance, 2015].

Κατηγορία 3 (Scope 3): Εκπομπές αλυσίδας αξίας

Το Scope 3 καλύπτει το σύνολο των έμμεσων εκπομπών που προκύπτουν στην αλυσίδα αξίας (στα προηγούμενα και τα επόμενα στάδια — *upstream* και *downstream*) και δεν εντάσσονται στο Scope 2. Σύμφωνα με το *Scope 3 Standard* [GHG Protocol Scope 3 Standard, 2011], ορίζονται 15 κατηγορίες, εκ των οποίων οι πλέον σχετικές για τη ναυτιλία είναι:

- **Κατηγορία 1** (Αγορασθέντα αγαθά και υπηρεσίες): π.χ. αγορά καυσίμων, εξοπλι-

σμού.

- **Κατηγορία 4** (Μεταφορά και διανομή σε προηγούμενα στάδια — *upstream*): μεταφορές που αναθέτει η εταιρεία σε τρίτους.
- **Κατηγορία 7** (Μεταφορά εργαζομένων): μετακινήσεις πληρωμάτων.
- **Κατηγορία 11** (Χρήση πωληθέντων προϊόντων): εκπομπές στις μεταφορές που παρέχει ως υπηρεσία.

Ένα ειδικά σημαντικό ζήτημα για τη Maersk αφορά τα **ναυλωμένα πλοία** (chartered vessels). Όταν η εταιρεία ναυλώνει πλοία από τρίτους, η καύση καυσίμου στα πλοία αυτά δεν εμπίπτει στο Scope 1 (δεν υπάρχει ιδιοκτησία ή λειτουργικός έλεγχος ανάλογα με τον επιλεγμένο ορισμό ορίου), αλλά συνήθως στο Scope 3 κατηγορία 4 ή 7, ανάλογα με τον τύπο ναύλωσης και τη μέθοδο οριοθέτησης (προσέγγιση οικονομικού ελέγχου [*financial control*] έναντι λειτουργικού ελέγχου [*operational control*]). Αυτή η διάκριση έχει σημαντικές επιπτώσεις στον σχεδιασμό συστημάτων καταγραφής, καθώς για τα ιδιόκτητα πλοία είναι διαθέσιμα αναλυτικά δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου, ενώ για τα ναυλωμένα συχνά απαιτείται εκτίμηση βάσει μέσης κατανάλωσης κλάσης πλοίου ή τύπου διαδρομής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών, στην παρούσα φάση του (2025), καλύπτει εκπομπές Scope 1 και Scope 3, ενώ η ενσωμάτωση του Scope 2 βρίσκεται σε εξέλιξη (βλ. Κεφ. 5).

3.3 Μεθοδολογίες Μέτρησης

Ανεξαρτήτως κατηγορίας (scope), για τον ποσοτικό υπολογισμό εκπομπών υπάρχουν τρεις βασικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις, οι οποίες διαφέρουν ως προς τον τύπο δεδομένων εισόδου, την ακρίβεια που παρέχουν και το κόστος εφαρμογής τους. Το GHGP Scope 3 Standard αναγνωρίζει ρητά και τις τρεις [GHG Protocol Scope 3 Standard, 2011].

3.3.1 Μεθοδολογία βάσει κόστους (Cost-based)

Στη μεθοδολογία βάσει κόστους, οι εκπομπές υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την οικονομική αξία (δαπάνη) μιας αγοράς ή δραστηριότητας επί έναν οικονομικό συντελεστή εκπομπών (*Environmentally Extended Input-Output*, EEIO factor), εκπεφρασμένο σε kgCO₂e ανά νομισματική μονάδα δαπάνης.

Οι συντελεστές EEIO προέρχονται από εθνικούς ή κλαδικούς πίνακες εισόδου-εξόδου και αντικατοπτρίζουν τον μέσο εκπομπόμενο άνθρακα ανά μονάδα οικονομικής αξίας για τον εκάστοτε κλάδο. Η προσέγγιση αυτή έχει το πλεονέκτημα της απλότητας: χρειάζεται μόνο τα τιμολόγια αγορών, χωρίς ανάγκη φυσικών μετρήσεων.

Ωστόσο, τα μειονεκτήματά της είναι σημαντικά. Πρώτον, οι EEIO συντελεστές αντικατοπτρίζουν μέσους όρους ολόκληρων κλάδων, με αποτέλεσμα αναχρίβειες όταν ο συγκεκριμένος προμηθευτής ή δραστηριότητα αποκλίνει από τον μέσο. Δεύτερον, τα αποτελέσματα είναι ευαίσθητα στις διακυμάνσεις τιμών αγοράς: αύξηση τιμής καυσίμου οδηγεί τεχνηέντως σε αύξηση

εκτιμώμενων εκπομπών, ακόμα και αν η πραγματική κατανάλωση παρέμεινε σταθερή. Για λόγους αυτούς, η μεθοδολογία βάσει κόστους συνιστάται μόνο ως εφεδρική λύση (*fallback*) σε περιπτώσεις απουσίας πρωτογενών δεδομένων [GHG Protocol Scope 3 Standard, 2011].

3.3.2 Μεθοδολογία βάσει δραστηριότητας (Activity-based)

Στη μεθοδολογία βάσει δραστηριότητας, οι εκπομπές υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας ένα μέτρο φυσικής δραστηριότητας (*activity data*) επί έναν εξειδικευμένο συντελεστή εκπομπών:

$$\text{Εκπομπές} = \text{Δεδομένα Δραστηριότητας} \times \text{Συντελεστής Εκπομπών}$$

Στη ναυτιλία, τυπικά παραδείγματα είναι:

- **Κατανάλωση καυσίμου** (τόνοι καυσίμου) $\times$ **συντελεστής εκπομπών καυσίμου** (kgCO₂e/τόνο) — η πλέον ακριβής μέθοδος για εκπομπές Scope 1.
- **Τονοχιλιόμετρα** (tonne-km) $\times$ **εκπομπές ανά tonne-km** (gCO₂e/tonne-km) — χρήσιμο για κατανομή εκπομπών ανά φορτίο.
- **Ναυτικά μίλια** $\times$ **κατανάλωση καυσίμου ανά μίλι** για συγκεκριμένο τύπο πλοίου.

Οι συντελεστές εκπομπών για διαφορετικά καύσιμα (HFO, VLSFO, MGO, LNG, βιοκαύσιμα κ.λπ.) δημοσιεύονται από διεθνείς οργανισμούς όπως ο IMO, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (για τους σκοπούς EU ETS) και διάφοροι φορείς πιστοποίησης. Η μεθοδολογία αυτή παρέχει σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια και επαληθευσσιμότητα σε σύγκριση με τη μεθοδολογία βάσει κόστους, αλλά απαιτεί αναλυτική καταγραφή φυσικών δεδομένων δραστηριότητας — κάτι που αποτελεί το πλέον απαιτητικό κομμάτι από πλευράς συλλογής και ποιοτικού ελέγχου δεδομένων. Στην περίπτωση της Maersk, αυτό σημαίνει άντληση δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου από ποικίλα πληροφοριακά συστήματα πλοίων, τα οποία χρησιμοποιούν διαφορετικές μορφές και σχήματα δεδομένων (βλ. Κεφ. 5).

3.3.3 Υβριδική μεθοδολογία (Hybrid)

Η υβριδική μεθοδολογία συνδυάζει τις δύο προηγούμενες: χρησιμοποιεί δεδομένα βάσει δραστηριότητας όπου είναι διαθέσιμα, και συμπληρώνει τα κενά με εκτιμήσεις βάσει κόστους. Αυτή η προσέγγιση συνιστάται ρητά από το GHGP ως η προτιμώμενη μέθοδος για τον υπολογισμό Scope 3 εκπομπών, καθώς μεγιστοποιεί την ακρίβεια στους τομείς όπου υπάρχουν δεδομένα, ενώ διατηρεί πλήρη κάλυψη όλων των κατηγοριών [GHG Protocol Scope 3 Standard, 2011].

Η υβριδική μεθοδολογία είναι αυτή που επιλέχθηκε να υλοποιηθεί στον Πάγκο Εργασίας Εκπομπών της Maersk. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι για κάθε αποστολή (shipment) το σύστημα προσπαθεί πρώτα να χρησιμοποιήσει πραγματικά δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου (βάσει δραστηριότητας), και όταν αυτά δεν είναι διαθέσιμα — π.χ. για ναυλωμένα πλοία ή για παλαιότερα δεδομένα πριν την ενεργοποίηση τροφοδοσιών δεδομένων — χρησιμοποιεί

εκτιμήσεις βάσει τύπου πλοίου, χωρητικότητας και αποστάσεων. Η λεπτομερής υλοποίηση αυτής της λογικής περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.5.

3.4 TTW έναντι WTW: Όρια του συστήματος εκπομπών

Ένα κρίσιμο θεωρητικό ζήτημα στη λογιστική εκπομπών καυσίμων αφορά τον ορισμό των ορίων του συστήματος: πού «ξεκινά» και πού «τελειώνει» η αλυσίδα που μετράμε;

Tank-to-Wake (TTW)

Η προσέγγιση **Tank-to-Wake** (TTW), μετρά αποκλειστικά τις εκπομπές που προκύπτουν κατά την καύση του καυσίμου στη μηχανή του οχήματος ή πλοίου. Είναι το παραδοσιακό μέτρο που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών Scope 1, και εκφράζεται συνήθως σε gCO_2/kWh ή $\text{gCO}_2/\text{tonne-nm}$.

Το TTW αποτυπώνει εκπομπές που είναι άμεσα μετρήσιμες και επαληθεύσιμες. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει σημαντικό μειονέκτημα όταν συγκρίνονται διαφορετικά καύσιμα: ένα πλοίο που χρησιμοποιεί πράσινο υδρογόνο ή βιοκαύσιμα έχει TTW εκπομπές πολύ χαμηλότερες (ή μηδενικές, για καύσιμα με βιογενές CO_2), αλλά η παραγωγή τους μπορεί να ήταν ενεργειακά εντατική.

Well-to-Wake (WTW)

Η προσέγγιση **Well-to-Wake** (WTW) επεκτείνει τα όρια του συστήματος ώστε να συμπεριλαμβάνει επίσης τις εκπομπές που συνδέονται με την εξόρυξη, επεξεργασία, μεταφορά και διανομή του καυσίμου (*Well-to-Tank*, WTT). Δηλαδή:

$$\text{WTW} = \text{WTT (Well-to-Tank)} + \text{TTW (Tank-to-Wake)}$$

Η WTW προσέγγιση είναι απαραίτητη για μια ολοκληρωμένη σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων. Για παράδειγμα:

- Το **LNG** (*liquefied natural gas* — υγροποιημένο φυσικό αέριο) έχει χαμηλότερες εκπομπές CO_2 TTW σε σχέση με το HFO, αλλά η παραγωγή και υγροποίησή του συνεπάγεται σημαντικές WTT εκπομπές, και η διαφυγή μεθανίου (CH_4) κατά τη φόρτωση/εκφόρτωση (*methane slip*) έχει υψηλό GWP.
- Τα **βιώσιμα βιοκαύσιμα** (π.χ. FAME από απόβλητα λίπη) έχουν σχεδόν μηδενικό TTW CO_2 (βιογενής άνθρακας), αλλά το πλήρες WTW αποτύπωμά τους εξαρτάται κρίσιμα από τη διαδρομή παραγωγής.
- Το **πράσινο υδρογόνο** από ηλεκτρόλυση με ανανεώσιμη ενέργεια έχει μηδενικές TTW εκπομπές, αλλά η παραγωγή του απαιτεί σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία κινείται ρητά προς τη WTW προσέγγιση: ο Κανονισμός **FuelEU Maritime** (Κανονισμός (ΕΕ) 2023/1805), που τέθηκε σε ισχύ από 1 Ιανουαρίου 2025,

χρησιμοποιεί ένταση εκπομπών ΘΚ σε WTW βάση για τον ορισμό στόχων μείωσης, σε αντίθεση με τον Κανονισμό EU ETS Maritime που βασίζεται σε TTW μετρήσεις [Κανονισμός (ΕΕ) 2023/1805, FuelEU Maritime].

Στον Πάγκο Εργασίας Εκπομπών, η διάκριση TTW/WTW αποτελεί βασική παράμετρο του μοντέλου δεδομένων: κάθε αποτέλεσμα εκπομπών μπορεί να παρουσιαστεί και στις δύο βάσεις, ώστε να ανταποκρίνεται στις διαφορετικές κανονιστικές και εμπορικές απαιτήσεις (βλ. Κεφ. 5.3 και 6.3).

3.5 Ισοζύγιο μάζας (Mass Balance) και Book-and-Claim

Καθώς τα εναλλακτικά καύσιμα χαμηλού άνθρακα επεκτείνονται στον κλάδο της ναυτιλίας, προκύπτει ένα θεμελιώδες λογιστικό ζήτημα: πώς αποδίδονται οι περιβαλλοντικές ιδιότητες ενός καυσίμου όταν η φυσική ροή του καυσίμου δεν ακολουθεί πάντα τη λογιστική αναφορά;

Φυσική ροή έναντι λογιστικής ροής

Σε ένα ιδανικό σύστημα, κάθε τόνος βιοκαυσίμου που αγοράζεται από έναν πελάτη θα χρησιμοποιείτο στο συγκεκριμένο πλοίο που μεταφέρει το φορτίο του. Στην πράξη, αυτό είναι συχνά αδύνατο λόγω περιορισμών εφοδιαστικής αλυσίδας (εναλλακτικά καύσιμα δεν είναι διαθέσιμα σε όλα τα λιμάνια), τεχνικών περιορισμών (συμβατότητα μηχανών) και οικονομικής σκοπιμότητας. Δύο θεωρητικά πλαίσια αντιμετωπίζουν αυτή την πρακτική πρόκληση: το ισοζύγιο μάζας (*mass balance*) και το book-and-claim.

Ισοζύγιο μάζας (Mass Balance)

Το **ισοζύγιο μάζας** (*mass balance*) είναι μια μέθοδος αλυσίδας επιμέλειας (*chain-of-custody*) που επιτρέπει τον εικονικό διαχωρισμό των βιώσιμων ιδιοτήτων ενός καυσίμου εντός ενός φυσικά ανάμεικτου συστήματος, υπό την προϋπόθεση ότι οι εισροές και εκροές ιχνηλατούνται αυστηρά ανά καθορισμένο χρονικό παράθυρο και γεωγραφικό πεδίο [ISCC System Document ISCC-203, 2023].

Στην πράξη: μια εταιρεία μπορεί να αναμείξει βιώσιμο καύσιμο με συμβατικό σε κοινή υποδομή (π.χ. αγωγό, αποθήκη λιμανιού), αρκεί να διατηρεί ακριβή καταγραφή της ποσότητας βιώσιμου καυσίμου που εισέρχεται στο σύστημα. Στη συνέχεια, οι «βιώσιμες μονάδες» μπορούν να παραδοθούν λογιστικά σε πελάτες που αγόρασαν βιώσιμο καύσιμο, ακόμα και αν στο πλοίο τους φορτώθηκε φυσικά μίγμα.

Το ισοζύγιο μάζας αποτελεί την επίσημη μέθοδο που αναγνωρίζεται από τα πλέον διαδεδομένα πιστοποιητικά βιωσιμότητας καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων του **ISCC EU** και **ISCC Plus**, στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας II (RED II, Οδηγία 2018/2001/ΕΕ) [Ευρωπαϊκή Επιτροπή, RED II, 2018].

Αναφορά αποσυνδεδεμένη από φυσική ροή (Book-and-Claim)

Το **book-and-claim** (λογιστική και απαίτηση) αντιπροσωπεύει ένα πλαίσιο στο οποίο οι περιβαλλοντικές ιδιότητες ενός καυσίμου αποσυνδέονται πλήρως από τη φυσική παράδοσή του. Ο πελάτης «αγοράζει» ένα πιστωτικό περιβαλλοντικής αξίας (*claim*) που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ποσότητα βιώσιμου καυσίμου που έχει χρησιμοποιηθεί κάπου στο σύστημα, χωρίς αυτό να έχει φορτωθεί στο συγκεκριμένο πλοίο του πελάτη.

Αναλογικά παραδείγματα από άλλους κλάδους:

- **Πιστοποιητικά Ανανεώσιμης Ενέργειας** (*Renewable Energy Certificates, RECs / Guarantees of Origin*): ο αγοραστής κατανάλωσε ηλεκτρισμό από το δίκτυο αλλά έχει αγοράσει ισόποσες ανανεώσιμες μονάδες.
- **Βιώσιμα Αεροπορικά Καύσιμα** (*Sustainable Aviation Fuel, SAF*): το book-and-claim χρησιμοποιείται ευρέως στην αεροπορία για επιτρεπόμενη αναφορά SAF χρήσης χωρίς φυσική ιχνηλάτηση ανά πτήση.

Στη ναυτιλία, το book-and-claim εισάγεται σταδιακά, ιδίως για προϊόντα ECO (*Eco-delivery*). Η Maersk χρησιμοποιεί book-and-claim για το ECO Delivery Ocean (ECOv1/ECOv2): ένας πελάτης αγοράζει μειωμένες εκπομπές για τη διαδρομή του, και αυτές αντισταθμίζονται από πραγματική χρήση βιώσιμου καυσίμου σε κάποιο άλλο φορτίο στο σύστημα [βλ. Κεφ. 6.4 για πλήρη ανάλυση της υλοποίησης μέσω Energy Bank].

Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν αυστηρή διαφάνεια και ελεγκσιμότητα. Το ισοζύγιο μάζας διατηρεί ισχυρότερη φυσική σύνδεση και είναι η μέθοδος που αναγνωρίζεται για κανονιστικούς σκοπούς (RED II, EU ETS). Το book-and-claim προσφέρει μεγαλύτερη εμπορική ευελιξία αλλά εγείρει ερωτήματα αξιοπιστίας αν δεν υποστηρίζεται από επαρκή τεκμηρίωση. Κρίσιμη προϋπόθεση και για τα δύο πλαίσια είναι η εφαρμογή ενός συστήματος πληροφορικής ικανού να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο τόσο την κατανάλωση πραγματικών καυσίμων ανά πλοίο, όσο και τα διαθέσιμα πιστωτικά εναλλακτικού καυσίμου — ακριβώς ο ρόλος του Energy Bank στον Πάγκο Εργασίας Εκπομπών (βλ. Κεφ. 6.3).

3.6 Πρότυπα και Πιστοποιήσεις

Πέραν του GHGP και του ISO 14064 που αναλύθηκαν στην ενότητα 3.1, ο τομέας της ναυτιλίας και της εφοδιαστικής αλυσίδας διαθέτει σειρά εξειδικευμένων προτύπων και πλαισίων πιστοποίησης που είναι άμεσα σχετικά με τον Πάγκο Εργασίας Εκπομπών.

Διεθνής Πιστοποίηση Βιωσιμότητας και Άνθρακα — ISCC

Η **Διεθνής Πιστοποίηση Βιωσιμότητας και Άνθρακα** (International Sustainability and Carbon Certification — ISCC) είναι ένα σύστημα πιστοποίησης

ανθρακικής ουδετερότητας για βιομάζα, βιοκαύσιμα, βιογενή υγρά, ανακυκλωμένα καύσιμα αεροσκαφών και ανανεώσιμα καύσιμα μη βιολογικής προέλευσης. Η έκδοση **ISCC EU** αναγνωρίζεται επίσημα από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στο πλαίσιο της Οδηγίας RED II (2018/2001/EE) για τη θεσμική αναγνώριση βιώσιμων καυσίμων [ISCC System Document ISCC-203, 2023].

Η πιστοποίηση ISCC βασίζεται σε αλυσίδα επιμέλειας με τη μέθοδο του ισοζυγίου μάζας: κάθε φορέας στην αλυσίδα εφοδιασμού (παραγωγός, επεξεργαστής, διανομέας) πρέπει να πιστοποιηθεί ανεξάρτητα από διαπιστευμένο φορέα ελέγχου. Για τη Maersk, η πιστοποίηση ISCC των προμηθευτών βιοκαυσίμων αποτελεί προαπαιτούμενο για τη διάθεση ECO προϊόντων, καθώς επιτρέπει την τεκμηριωμένη αναγνώριση μειωμένου ανθρακικού αποτυπώματος (βλ. Κεφ. 6.4).

Πρωτοβουλία Στόχων με Επιστημονική Βάση — SBTi Maritime

Η Πρωτοβουλία Στόχων με Επιστημονική Βάση (Science Based Targets initiative — SBTi) είναι πρωτοβουλία κοινής διαχείρισης από τον CDP, το UN Global Compact, το WRI και το WWF, που επιτρέπει σε εταιρείες να θέτουν επιστημονικά βασισμένους στόχους μείωσης εκπομπών (*science-based targets*) συμβατούς με την ανάγκη περιορισμού της θερμοκρασιακής αύξησης στον 1,5°C σύμφωνα με τη Συμφωνία του Παρισιού [SBTi Corporate Manual, 2023].

Η SBTi διαθέτει εξειδικευμένο εταιρικό εγχειρίδιο που ορίζει τους κανόνες για όλους τους τομείς, ενώ εκπονεί τομεακές κατευθυντήριες γραμμές. Για τη ναυτιλία, το *SBTi Maritime Guidance* (σε φάση πιλοτικής εφαρμογής) ορίζει μεθοδολογία για τον καθορισμό αποθεμάτων άνθρακα (*carbon budget*) ανά εταιρεία βάσει μεριδίου στόλου και μεριδίου αγοράς. Η Maersk έχει δεσμευτεί σε στόχους μείωσης ευθυγραμμισμένους με την SBTi (*SBTi-aligned*), γεγονός που αυξάνει την ανάγκη για ακριβή και επαληθεύσιμη καταγραφή εκπομπών σε κεντρικό σύστημα.

Πλαίσιο Παγκοσμίου Συμβουλίου Εκπομπών Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Το Πλαίσιο Παγκοσμίου Συμβουλίου Εκπομπών Εφοδιαστικής Αλυσίδας (Global Logistics Emissions Council — GLEC Framework) είναι η κλαδική μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την αναφορά εκπομπών σε διαφορετικές μορφές εφοδιαστικής αλυσίδας. Βασίζεται στις αρχές του GHGP και του EN 16258, εισάγοντας ωστόσο εξειδικευμένες μεθοδολογίες για κάθε κατηγορία μεταφοράς (οδική, σιδηροδρομική, θαλάσσια, εναέρια).

Ειδικότερα για τη θαλάσσια μεταφορά, το GLEC v3 παρέχει:

- Προκαθορισμένους συντελεστές εκπομπών ανά τύπο πλοίου και τύπο φορτίου (*default emission factors*).
- Μεθοδολογία κατανομής εκπομπών σε επίπεδο container (φορτίου), διακρίνοντας μεταξύ 20' (TEU) και 40' (FFE) εμπορευματοκιβωτίου.

- Κανόνες για τον χειρισμό μικτών φορτίων και συνδυαστικών διαδρομών.

Η Maersk ευθυγραμμίζεται με το GLEC Framework για την παροχή εκπομπών ανά αποστολή στους πελάτες, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα που παρέχει ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών είναι συγκρίσιμα με εκείνα άλλων μεταφορέων που ακολουθούν το ίδιο πλαίσιο.

Πρόγραμμα Αναφορών Άνθρακα και ISO 14001

Το **Πρόγραμμα Αναφορών Άνθρακα** (Carbon Disclosure Project — CDP) είναι εθελοντικό πλαίσιο γνωστοποίησης κλιματικού αποτυπώματος, χρηματοοικονομικών κινδύνων και στρατηγικών διαχείρισης, στο οποίο εκατοντάδες εταιρείες αναφέρουν εκπομπές, στόχους και πρακτικές. Η Maersk συμμετέχει ετήσια στην αξιολόγηση CDP Climate.

Το **ISO 14001** είναι διεθνές πρότυπο για συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης (*Environmental Management System* — EMS), το οποίο ορίζει πλαίσιο για τον εντοπισμό, την παρακολούθηση και τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός οργανισμού. Αν και δεν είναι εξειδικευμένο για εκπομπές ΘΚ, αποτελεί συνήθη οργανωτική βάση που υποστηρίζει τις διαδικασίες GHGP/ISO 14064.

Σύνοψη κανονιστικού και προτυπικού πλαισίου

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικά πρότυπα και πλαίσια που επηρεάζουν τον σχεδιασμό του Πάγκου Εργασίας Εκπομπών:

Πρότυπο / Πλαίσιο	Τύπος	Κύρια σχέση με το σύστημα
GHG Protocol Corporate Standard (2004)	Μεθοδολογικό	Ορισμός Scopes 1/2/3, μεθοδολογίες
GHG Protocol Scope 3 Standard (2011)	Μεθοδολογικό	Scope 3 κατηγορίες, υβριδική μέθοδος
ISO 14064-1 (2018)	Πιστοποίηση	Επαλήθευση οργανωτικής απογραφής
EN 16258 (2012)	Κανονιστικό	Εκπομπές μεταφοράς εμπορευμάτων
ISCC EU	Πιστοποίηση	Τεκμηρίωση βιώσιμων καυσίμων, ECO products
GLEC Framework v3 (2023)	Κλαδικό	Κατανομή εκπομπών ανά container
SBTi Maritime Guidance	Στρατηγικό	Ευθυγράμμιση εταιρικών στόχων
FuelEU Maritime (2023/1805)	Νομοθετικό	WTW εντάσεις εκπομπών από 2025
EU ETS Maritime	Νομοθετικό	TTW CO ₂ αναφορά, αγορά δικαιωμάτων

Το σύνολο αυτό των προτύπων και κανονισμών καθορίζει πολύπλοκες, συχνά αλληλεπικαλυπτόμενες απαιτήσεις, οι οποίες πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα από ένα ενιαίο σύστημα πληροφορικής. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών οργανώθηκε για να ανταποκρίνεται σε αυτές τις ετερογενείς απαιτήσεις ως ενιαία πλατφόρμα (βλ. Κεφ. 4).

Κεφάλαιο 4 — Ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών: Επισκόπηση

4.1 Στόχοι και αποστολή της ομάδας Πλατφόρμας Μετάβασης Ενέργειας

Η ομάδα Πλατφόρμας Μετάβασης Ενέργειας (ET Platform εφεξής) της Maersk δημιουργήθηκε με την εξής αποστολή:

«Να διασφαλίσει ότι η Maersk επιτυγχάνει τους στόχους Net Zero 2040, παρέχοντας αξιόπιστα δεδομένα εκπομπών και τεχνολογικές υπηρεσίες που υποστηρίζουν τις φιλοδοξίες αποκαρβονοποίησης των πελατών και προωθούν την υιοθέτηση των προϊόντων ECO.»

Η διατύπωση αυτή αποκαλύπτει τρεις αλληλοσυνδεδεμένους στόχους που διαμορφώνουν κάθε τεχνολογική απόφαση της ομάδας. Πρώτον, η παροχή αξιόπιστων δεδομένων εκπομπών — δεδομένων δηλαδή που δεν αμφισβητούνται από πελάτες, ελεγκτές ή ρυθμιστικές αρχές. Η μετάβαση από χειρωνακτικές διαδικασίες παρήγαγαν αποτελέσματα που δεν μπορούσαν να επαληθευτούν ή να ανιχνευτούν (βλ. Κεφ. 2.5) σε πλήρη αυτοματοποίηση διασφαλίζει την εγκυρότητα των δεδομένων. Δεύτερον, η υποστήριξη των αποκαρβονοποιητικών φιλοδοξιών των πελατών: η μέτρηση εκπομπών είναι ζήτημα κανονιστικής συμμόρφωσης, ωστόσο μπορούν να προσφέρουν και εμπορική αξία στην αλυσίδα εφοδιασμού των πελατών της. Τρίτον, η προώθηση των μεταφορών με εναλλακτικά καύσιμα, ονομαζόμενα *ECO products*: υπηρεσίες που επιτρέπουν στους πελάτες να μειώσουν το ανθρακικό αποτύπωμα της εφοδιαστικής αλυσίδας τους.

Η έναρξη της κωδικοποίησης τοποθετείται τον Μάρτιο 2023, με την πρώτη παραγωγική κυκλοφορία να επιτυγχάνεται τον Σεπτέμβριο 2023 — ένας κύκλος ανάπτυξης έξι μηνών που κατέστη εφικτός μέσω της υιοθέτησης πρακτικών *Extreme Programming* (βλ. Κεφ. 10). Ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών (*Emissions Workbench*) αποτελεί το κεντρικό προϊόν αυτής της ομάδας: μια διαδικτυακή εφαρμογή (web) προσβάσιμη στη διεύθυνση emissions-workbench.maersk.com, σχεδιασμένη να εξυπηρετεί ετερογενείς ομάδες χρηστών μέσα στον οργανισμό, από εσωτερικούς αναλυτές αειφορίας έως εμπορικούς αντιπροσώπους.

Ο τεχνολογικός πυρήνας της εφαρμογής σε μορφή μονοτερο (μονο-αποθετήριο) φιλοξενεί πολλαπλά συστατικά (*components*) που υλοποιούν τους τέσσερις πυλώνες λειτουργικότητας. Η επιλογή ενός ενιαίου αποθετηρίου αντί της αρχιτεκτονικής πολλαπλών ανεξάρτητων αποθετηρίων αντανακλά την ανάγκη για ατομικές (*atomic*) αναπτύξεις και ισχυρή ανακατασκευή (*refactoring*) εγκάρσια στα συστατικά — επιλογές που αναλύονται λεπτομερώς στο Κεφ. 9.

4.2 Οι τέσσερις πυλώνες της Πλατφόρμας

Το *Emissions Workbench* δεν είναι ένα ενιαίο μονολιθικό προϊόν αλλά μια συνεκτική πλατφόρμα που οργανώνεται γύρω από τέσσερις διακριτούς πυλώνες λειτουργικότητας, ο καθένας με σαφή εμπορική αποστολή και τεχνολογική υλοποίηση. Οι πυλώνες παρουσιάζονται εδώ σε επίπεδο αποστολής· κάθε ένας αναλύεται εκτενώς στα Κεφ. 5, 6 και 7.

Πυλώνας	Αποστολή
Ocean Emissions	Υποστήριξη πελατών στη συμμόρφωση με κανονισμούς εκπομπών και επίτευξη ιδίων στόχων αποκαρβονοποίησης
Προϊόντα ECO Παράδοσης	Ολοκληρωμένες τεχνολογικές υπηρεσίες για ταχεία και εμπορικά βιώσιμη κλιμάκωση των ECO προϊόντων
Optimising Net Zero 2040	Αξιόπιστες πληροφορίες εκπομπών για τη χάραξη οδικών χαρτών αποκαρβονοποίησης εντός της επιχείρησης
Energy Markets (Bunker)	Βελτιστοποίηση προγραμμάτων εφοδιασμού πλοίων για τη χαμηλότερη δυνατή δαπάνη καυσίμων

Πυλώνας Α — Ocean Emissions (Κεφ. 5): Ο πυλώνας αυτός καλύπτει την ανάγκη αξιόπιστης μέτρησης και αναφοράς εκπομπών για τα δρομολόγια της Maersk:

«Υποστήριξη των πελατών της Maersk —ως προς τα φορτία που μεταφέρονται, εκπληρώνονται και διαχειρίζονται— στη συμμόρφωση με τους κανονισμούς εκπομπών και, μέσω της Maersk, στην επίτευξη των δικών τους στόχων αποκαρβονοποίησης.»

Πρακτικά, ο πυλώνας αυτός τροφοδοτεί τη βάση δεδομένων εκπομπών ανά αποστολή (*shipment*), ανά δρομολόγιο και ανά πελάτη, χρησιμοποιώντας τηλεμετρία πλοίων από το σύστημα *STAR Connect* και δεδομένα από τη λίμνη δεδομένων (*data lake*) *Dremio* (λεπτομέρειες στο Κεφ. 5).

Πυλώνας Β — Προϊόντα ECO Παράδοσης (Κεφ. 6): Ο πυλώνας αυτός υλοποιεί την εμπορική διάσταση της πλατφόρμας. Η αποστολή του ορίζεται ως:

«Παροχή ολοκληρωμένων τεχνολογικών υπηρεσιών που επιτρέπουν την ταχεία και εμπορικά βιώσιμη κλιμάκωση των προϊόντων ECO, ώστε να επιτευχθεί 30% χρήση βιώσιμης ενέργειας έως το 2030.»

Ο στόχος του 30% βιώσιμης ενέργειας έως το 2030 συνδέεται άμεσα με τον ευρύτερο στόχο Net Zero 2040 της Maersk και διατρέχει ολόκληρη την αρχιτεκτονική του πυλώνα. Το κεντρικό στοιχείο είναι η λογιστική παρακολούθηση (energy tracking) βιώσιμων καυσίμων μέσω μεθοδολογίας ισοζυγίου μάζας (*mass balance*) και η αυτοματοποιημένη έκδοση πιστοποιητικών (certificates) για τους πελάτες ECO Delivery (λεπτομέρειες στο Κεφ. 6).

Πυλώνας Γ — Optimising Net Zero 2040 (Κεφ. 7, εσωτερικά ονομάζεται και *Energy Bank*): Αφορά τις εσωτερικές ανάγκες της Maersk για χάραξη οδικών χαρτών αποκαρβονοποίησης. Η αποστολή του είναι:

«Να διασφαλίσει ότι η Maersk και οι προμηθευτές της επιτυγχάνουν τους στόχους Net Zero 2040, παρέχοντας τις αξιόπιστες πληροφορίες και αναλύσεις εκπομπών που απαιτούνται για την οικονομικά αποδοτική υλοποίηση οδικών χαρτών αποκαρβονοποίησης σε όλη την επιχείρηση.»

Ο πυλώνας αυτός συνδέει τα ακατέργαστα δεδομένα εκπομπών με στρατηγικές αποφάσεις εντός της επιχείρησης, παρέχοντας επισκόπηση στόλου, κατανομή βιώσιμων καυσίμων και ανάλυση προόδου για δεσμεύσεις SBTi.

Πυλώνας Δ — Energy Markets / Bunker Optimization (Κεφ. 7): Ο πυλώνας αυτός εξυπηρετεί τη βελτιστοποίηση του εφοδιασμού καυσίμων:

«Βελτιστοποίηση των πλάνων ανεφοδιασμού των πλοίων ώστε να επιτυγχάνεται η χαμηλότερη δυνατή δαπάνη καυσίμου για την εκτέλεση των προγραμματισμένων δρομολογίων, θέτοντας τις βάσεις για τη βελτιστοποίηση της προμήθειας πράσινου καυσίμου σε περιβάλλον συστήματος εμπορίας εκπομπών (ETS).»

Η σύνδεση με το σύστημα εμπορίας ρύπων (ETS) είναι κρίσιμη: από την 1η Ιανουαρίου 2024, η ναυτιλία εντάχθηκε στο ευρωπαϊκό σύστημα EU ETS (βλ. Κεφ. 2.4), καθιστώντας τη βελτιστοποίηση καυσίμων ταυτόχρονα λειτουργική και οικονομική αναγκαιότητα.

Οι τέσσερις πυλώνες δεν λειτουργούν ανεξάρτητα. Υπάρχουν σαφείς ροές δεδομένων μεταξύ τους: τα δεδομένα εκπομπών του Ocean Emissions τροφοδοτούν τον υπολογισμό κατανομής ECO Delivery· ο εφοδιασμός καυσίμων του Bunker Optimization ορίζει τη διαθεσιμότητα βιώσιμων καυσίμων που παρακολουθεί η Energy Bank· και η Energy Bank εκκαθαρίζει τις αξιώσεις (claims) που ενεργοποιούν την έκδοση πιστοποιητικών. Αυτή η εσωτερική συνάφεια αντανακλάται και στην τεχνολογική αρχιτεκτονική, όπου τα συστατικά επικοινωνούν μέσω Kafka και εσωτερικών διεπαφών Elixir (Κεφ. 9).

4.3 Επιτεύγματα και αντίκτυπος

Ο αντίκτυπος του *Emissions Workbench* στη λειτουργία της Maersk είναι σημαντικός και μετρήσιμος, τόσο από άποψη εμπορικής αξίας όσο και την οργανωτική εμπιστοσύνη που

κέρδισε η πλατφόρμα εντός δύο χρόνων λειτουργίας.

Κλίμακα χρήσης. Κατά τη δημιουργία του εργαλείου, είχαν ήδη αναγνωριστεί 1.000+ δυνητικοί χρήστες πριν καν από την πρώτη παραγωγική κυκλοφορία (pre-launch). Η βάση αυτή επεκτάθηκε και σήμερα η πλατφόρμα μετράει **1.300+ ενεργούς χρήστες**, οι οποίοι κατανέμονται σε έξι διαφορετικές ομάδες χρηστών εντός του οργανισμού: από ομάδες ECO Delivery Ocean Products και Regional Product Management έως Commercial Sustainability, Regional Sales, Contract Management και Account Managers. Η ετερογένεια αυτή αποδεικνύει ότι το εργαλείο εξυπηρετεί τόσο αναλυτικές-στρατηγικές ανάγκες όσο και καθημερινές εμπορικές λειτουργίες.

Εμπορικά αποτελέσματα. Το σημαντικότερο μετρήσιμο αποτέλεσμα αφορά τις πωλήσεις ECO Delivery Ocean: κατά το 2024, η πλατφόρμα επέτρεψε την επεξεργασία **98.000 FFE** (*Forty-Foot Equivalent* μονάδων εμπορευματοκιβωτίου), με αντίστοιχη εμπορική αξία **\$31 εκατομμυρίων USD**. Η συσχέτιση αυτή — μεταξύ διαθεσιμότητας πλατφόρμας και κλιμάκωσης εμπορικού προϊόντος — καταδεικνύει ότι η τεχνολογία αντιμετωπίστηκε ως επιτρεπτικός παράγοντας (enabler) και όχι ως κόστος υποδομής.

Λειτουργική αξιοπιστία. Ο ρυθμός αναπτύξεων (deployments) ανέρχεται σε **~32 αναπτύξεις ημερησίως** — μέγεθος που αντιστοιχεί σε μία ανάπτυξη κάθε 15 λεπτά κατά τη διάρκεια εργάσιμης ημέρας. Αυτός ο ρυθμός δεν είναι τυχαίος: αντανακλά τη δέσμευση της ομάδας σε συνεχή παράδοση (*Continuous Delivery*) και ανάπτυξη βασισμένη στον κορμό (*trunk-based development*) (βλ. Κεφ. 10). Η συνεχής παράδοση αξίας χωρίς μακρά κύκλα ανάπτυξης αποτέλεσε οργανωτική εντολή από την αρχή.

Κανονιστική συμμόρφωση. Κατά το 2023, η Maersk διενήργησε εσωτερικό έλεγχο μέσω της *Group Internal Audit (GIA)*, ο οποίος εντόπισε ανησυχίες γύρω από την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων εκπομπών, την αδυναμία ελέγχου (audit trail), και την έλλειψη επεκτασιμότητας στη διαχείριση αιτημάτων. Το *Emissions Workbench* αντιμετώπισε ρητά αυτές τις ανησυχίες: η πλατφόρμα παρέχει πλήρη ιχνηλασιμότητα υπολογισμών, αρχείο ελέγχου για κάθε αλλαγή δεδομένων, και αυτόματη δημιουργία πιστοποιητικών για τους πελάτες ECOv1 και ECOv2. Το γεγονός ότι ο έλεγχος GIA 2023 αποτέλεσε κίνητρο επιτάχυνσης ανάπτυξης υπογραμμίζει ότι η ποιότητα δεδομένων δεν είναι μόνο τεχνικό αλλά και θεσμικό ζήτημα.

Αυτοματοποίηση πιστοποιητικών. Πριν από την πλατφόρμα, η έκδοση πιστοποιητικών για ECO Delivery πελάτες απαιτούσε χειρωνακτική εργασία: συλλογή δεδομένων, εφαρμογή συντελεστών εκπομπών, σύνταξη αναφοράς, αποστολή μέσω email. Το εργαλείο αυτοματοποιεί πλήρως αυτή τη ροή για τους πελάτες ECOv1 (βιώσιμα καύσιμα επαληθευμένα μέσω *book-and-claim*) και ECOv2 (βιώσιμα καύσιμα μέσω φυσικής κατανομής), μειώνοντας τον χρόνο ανταπόκρισης από εβδομάδες σε λεπτά.

Συνολικά, οι μετρίκες αυτές τεκμηριώνουν ότι το *Emissions Workbench* πέρασε από απόδειξη αρχής (*proof-of-concept*) σε πλατφόρμα παραγωγής με εμπορικά μετρήσιμη αξία σε διάρκεια μόνο μερικών μηνών — ένα επίτευγμα που αποδίδεται εξίσου στις αρχιτεκτονικές επιλογές (Κεφ. 9) και στις πρακτικές ανάπτυξης λογισμικού (Κεφ. 10).

4.4 Επισκόπηση χαρακτηριστικών διεπαφής χρήστη

Η διεπαφή χρήστη γίνεται μέσω της ιστοσελίδας <https://emissions-workbench.maersk.com/>. Η πρόσβαση επιτρέπεται μόνο σε χρήστες με λογαριασμό στην εταιρεία και συγκεκριμένα δικαιώματα χρήσης.

Η διεπαφή χρήστη (*User Interface, UI*) του *Emissions Workbench* σχεδιάστηκε με γνώμονα την αυτοεξυπηρέτηση (*self-service*): κάθε χρήστης να μπορεί να αναζητήσει, επαληθεύσει και εξάγει δεδομένα εκπομπών χωρίς να απαιτείται η μεσολάβηση εξειδικευμένης ομάδας αναφορών. Η λειτουργικότητα αυτή παρουσιάστηκε στην εσωτερική τεχνολογική συνάντηση ET Platform 2025 με πέντε βασικά χαρακτηριστικά επίδειξης, τα οποία αντανακλούν τον κύκλο ζωής ενός τυπικού αιτήματος πελάτη.

Χαρακτηριστικό 1 — Αναζήτηση και εύρεση δεδομένων εκπομπών. Ο χρήστης εισάγει τον κωδικό πελάτη (*customer code*) και ορίζει ένα χρονικό εύρος. Η εφαρμογή ανακτά αμέσως τα δεδομένα εκπομπών για τον συγκεκριμένο πελάτη, αντικαθιστώντας τη χειρωνακτική διαδικασία email-και-αναμονής που περιγράφεται στο Κεφ. 2.5. Η ανάκτηση γίνεται με περιοδική άντληση (*polling*) από τη λίμνη δεδομένων *Dremio*, ενώ επιμερίζεται μέσω εργασιών *Oban* εξασφαλίζοντας χρονική εγγύτητα δεδομένων (*data freshness*) σε επίπεδο ωρών αντί εβδομάδων.

Χαρακτηριστικό 2 — Επισκόπηση δεδομένων αποστολής σε επίπεδο δρομολογίου. Αφού εντοπιστεί ο πελάτης, ο χρήστης μπορεί να αναλύσει τα δεδομένα εκπομπών σε επίπεδο αποστολής (*shipment level*), κατανεμημένα ανά δρομολόγιο (*route*). Αυτή η λεπτομερής μέτρηση είναι κρίσιμη για πελάτες που επιθυμούν να κατανοήσουν ποιά δρομολόγια συνεισφέρουν περισσότερο στο ανθρακικό τους αποτύπωμα και να εξετάσουν υπηρεσίες ECO Delivery. Τεχνικά, η λειτουργία αυτή αξιοποιεί τον υπολογισμό εκπομπών ανά κίνηση εμπορευματοκιβωτίου (*container move*) που τροφοδοτείται από τα δεδομένα τηλεμετρίας πλοίων (Κεφ. 5).

Χαρακτηριστικό 3 — Λήψη δεδομένων πελάτη. Η εφαρμογή παρέχει εξαγωγή (*export*) δεδομένων σε μορφή Excel, καλύπτοντας δύο διαστάσεις: πρώτον, τα πλήρη δεδομένα αποστολών με λεπτομέρειες εκπομπών, και δεύτερον, τα δεδομένα εξοικονόμησης εκπομπών (*emissions saving data*) για πελάτες ECO. Η επιλογή του Excel ως μορφή εξαγωγής έγινε μιας και οι περισσότεροι τελικοί χρήστες (λ.χ. Contract Management ή Account Managers) χρησιμοποιούν το Excel ως εργαλείο ροής εργασίας για παρουσιάσεις σε πελάτες ή εσωτερικές αναφορές.

Χαρακτηριστικό 4 — Δημιουργία πιστοποιητικών για πελάτη. Το εργαλείο *Certificates* επιτρέπει στον χρήστη να εκκινήσει τη δημιουργία επίσημων πιστοποιητικών για έναν πελάτη ECO Delivery. Η διαδικασία ενεργοποιεί αυτοματοποιημένες εργασίες (*Oban workers*) που αντλούν από το λογιστικό ισοζύγιο βιώσιμης ενέργειας (*Energy Bank*), επαληθεύουν τα διαθέσιμα υπόλοιπα καυσίμων, και παράγουν αποτυπωμένα έγγραφα συμμόρφωσης με τα πρότυπα ISCC ή RSB για ισοζύγιο μάζας (*mass balance*) (Κεφ. 6). Ολόκληρη η ροή πιστοποίησης, που προηγουμένως απαιτούσε χειρωνακτική επαλήθευση από εξειδικευμένη ομάδα, εκτελείται πλέον αυτόματα εντός της πλατφόρμας.

Χαρακτηριστικό 5 — Λήψη πιστοποιητικών και αναφορών. Μόλις ολοκληρωθεί η δημιουργία, τα πιστοποιητικά καθίστανται διαθέσιμα για λήψη σε μορφή PDF, συνοδευόμενα από αναλυτική αναφορά (*accompanying report*) που τεκμηριώνει τη μεθοδολογία υπολογισμού. Η συνοδευτική αναφορά είναι ουσιώδης για τη διαφάνεια: επιτρέπει στον πελάτη να κατανοήσει πώς υπολογίστηκαν οι εκπομπές και να χρησιμοποιήσει τα στοιχεία σε δικές του κανονιστικές αναφορές (πχ CSRD, CDP).

Τα πέντε αυτά χαρακτηριστικά σχηματίζουν έναν συνεκτικό κύκλο αξίας: από την αναζήτηση δεδομένων, μέσω της επαλήθευσης σε επίπεδο δρομολογίου, έως την τυπική πιστοποίηση και τελικά την παράδοση εγγράφων στον πελάτη. Η υλοποίησή τους μέσω της τεχνολογίας *Phoenix LiveView* — η οποία επιτρέπει πραγματικό χρόνο ενημέρωση της διεπαφής χωρίς πλήρη φόρτωση σελίδας — αποτελεί αρχιτεκτονική επιλογή που αναλύεται εκτενώς στο Κεφ. 8. Η τεκμηρίωση της διεπαφής και οι οργανωτικές πρακτικές που διέπουν την ανάπτυξη της συζητούνται στο Κεφ. 10.

Κεφάλαιο 5 — Πυλώνας A: Ocean Emissions και STAR Connect

Ο πρώτος πυλώνας του ET Platform αφορά τη συλλογή, επεξεργασία και αποθήκευση εκπομπών για το σύνολο των θαλάσσιων μεταφορών της Maersk. Είναι ο θεμέλιος λίθος του συστήματος: χωρίς αξιόπιστα δεδομένα κινήσεων εμπορευματοκιβωτίων και πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου, κανένας από τους υπόλοιπους πυλώνες — Προϊόντα ECO Παράδοσης (Κεφ. 6), βελτιστοποίηση ανεφοδιασμού (Κεφ. 7) — δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζουμε την πολυπλοκότητα του προβλήματος (5.1), τις πηγές δεδομένων (5.2), το σύστημα κύριων δεδομένων πλοίων (*vessel master data*) (5.3), τη ροή πραγματικού χρόνου μέσω STAR Connect (5.4), τον αλγόριθμο υπολογισμού εκπομπών (5.5), την ενσωμάτωση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών (5.6) και τη λειτουργία Customer Baseline Emissions (5.7).

5.1 Πρόκληση: Ακριβής καταγραφή εκπομπών στόλου

Η Maersk διαχειρίζεται έναν στόλο άνω των 700 πλοίων και εκτελεί δεκάδες χιλιάδες δρομολόγια ετησίως, μεταφέροντας εμπορευματοκιβώτια σε διαφορετικά μεγέθη, τύπους και προϊόντα από εκατοντάδες λιμάνια σε 130+ χώρες. Η ακριβής καταγραφή εκπομπών σε αυτή την κλίμακα αντιμετωπίζει πλήθος προκλήσεων.

Ετερογένεια εμπορευματοκιβωτίου. Κάθε κίνηση εμπορευματοκιβωτίου (*container move*) χαρακτηρίζεται από το μέγεθός του — 20", 40", 45", 53" — και τον τύπο του — ξηρό φορτίο (*dry*) ή ψυγείο (*reefer*). Η μονάδα μέτρησης *FFE* (Forty-Foot Equivalent) αποτελεί τον κοινό κανονιστή: ένα 20" εμπορευματοκιβώτιο αντιστοιχεί σε 0,5 FFE, ενώ ένα 40" ή 45" αντιστοιχεί σε 1 FFE. Τα ψυγεία καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια λόγω ψύξης και απαιτούν διαφορετικούς συντελεστές εκπομπών.

Πολυπλοκότητα προϊόντων. Η Maersk προσφέρει εύρος ECO προϊόντων — EC2, EC3, EC4, EC5, ECM — που αντιστοιχούν σε διαφορετικές αναλογίες χρήσης πράσινου καυσίμου και διαφορετικές μεθοδολογίες υπολογισμού (ECO_{v1}, ECO_{v2}). Ένα συμβατικό *FOSSIL* προϊόν έχει πλήρεις εκπομπές γκρίζων καυσίμων, ενώ τα ECO προϊόντα φέρουν μερική ή πλήρη μείωση εκπομπών. Κάθε προϊόν εφαρμόζει διαφορετικό συντελεστή εκπομπών

κατά τον υπολογισμό.

Δυσκολία απόδοσης εκπομπών. Σε ένα δρομολόγιο, ένα πλοίο μεταφέρει χιλιάδες εμπορευματοκιβώτια ταυτόχρονα. Οι εκπομπές πρέπει να κατανεμηθούν σε κάθε κίνηση εμπορευματοκιβωτίου με βάση εμπορικά αποδεκτούς συντελεστές — τους συντελεστές εμπορικής διαδρομής (*trade factors*) — που έχουν προκαθοριστεί ανά εμπορική διαδρομή, κατεύθυνση και έτος. Αυτή η μέθοδος, αντί για ακριβές μέτρηση κατανάλωσης ανά εμπορευματοκιβώτιο, αποτελεί πρακτική αναγκαιότητα δεδομένης της αδυναμίας φυσικής απόδοσης καυσίμου σε μεμονωμένες αποστολές.

Ιδιοκτησιακό καθεστώς πλοίων. Ο στόλος περιλαμβάνει πλοία υπό πλήρη ιδιοκτησία (Scope 1 εκπομπές), υπό ναύλωση (*chartered vessels*, Scope 3 κατηγορία 7) και υπό ναυλοσύμφωνο χρόνου. Κάθε κατηγορία αντιμετωπίζεται διαφορετικά στο GHG Protocol (βλ. Κεφ. 2.4 και 3.2), γεγονός που απαιτεί ευέλικτη λογική ταξινόμησης στο σύστημα.

5.2 Πηγές δεδομένων

Ο πυλώνας Ocean Emissions τροφοδοτείται από τρεις κύριες πηγές δεδομένων, καθεμία με διαφορετικά χαρακτηριστικά διαθεσιμότητας, εγκαιρότητας και δομής.

5.2.1 Dremio Data Lake

Το Dremio αποτελεί την κεντρική εταιρική πλατφόρμα ανάλυσης δεδομένων της Maersk και λειτουργεί ως κύρια πηγή ομαδικών δεδομένων (batch) για κινήσεις εμπορευματοκιβωτίων. Μέσω του Dremio, το σύστημα έχει πρόσβαση σε πολλαπλές βάσεις δεδομένων:

- `Infrastructure_GDA.Energy_Transition.*` — δεδομένα ενεργειακής μετάβασης, συντελεστές εκπομπών
- `EcoDelivery.ShipmentDetails` — λεπτομέρειες αποστολών ECO προϊόντων
- `Common_Datasets.*` — κοινές αναφορές (λιμάνια, διαδρομές, πελάτες)
- `Infrastructure_GDA.Energy_Transition.NetZero.EU_ETS.*` — δεδομένα EU ETS (βλ. 5.6)

Τα ερωτήματα εκτελούνται μέσω ενός αφαιρετικού στρώματος `Dremio.encode_sql/1` και `Dremio.stream/1`, που επιτρέπει ροή (*streaming*) αποτελεσμάτων χωρίς φόρτωση ολόκληρου του συνόλου αποτελεσμάτων (resultset) στη μνήμη — κρίσιμο για πίνακες εκατομμυρίων εγγραφών.

5.2.2 Shiptech

Το Shiptech είναι το παλαιού τύπου (legacy) σύστημα διαχείρισης ναυτιλιακών εντολών και ταξιδιών της Maersk. Προσπελάσσεται μέσω ODBC και περιέχει ιστορικά δεδομένα δρομολογίων που δεν έχουν ακόμη μεταναστεύσει στο Dremio. Η πρόσβαση μέσω ODBC επιβάλλει ιδιαίτερη προσοχή στη διαχείριση συνδέσεων και τη διαχείριση σφαλμάτων (error handling).

5.2.3 Δομή κίνησης εμπορευματοκιβωτίου (ContainerMove)

Κάθε κίνηση εμπορευματοκιβωτίου μοντελοποιείται ως Ecto schema που αντικατοπτρίζει τον πίνακα `ocean_container_moves` στη βάση δεδομένων. Η δομή περιλαμβάνει τόσο τεχνικά χαρακτηριστικά του εμπορευματοκιβωτίου όσο και επιχειρησιακά στοιχεία αποστολής:

```
schema "ocean_container_moves" do
  field(:container_size, Ecto.Enum, values: Nrg.Ocean.Container.sizes())
  field(:container_type, Ecto.Enum, values: Nrg.Ocean.Container.types())
  field(:equipment_id, :string)
  field(:loaded_ffe, :decimal)
  field(:missing_in_dremio, :boolean)

  # these fields come from shipment data
  field(:first_loaded_at, :utc_datetime)
  field(:arrived_on, :date)
  field(:lane_id, :string)
  field(:test_id, :string)
  field(:deleted_at, :utc_datetime)

  timestamps()

  belongs_to(:customer, Customer)
  belongs_to(:shipment, Shipment)

  field(:port_of_receipt_location, :map, virtual: true)
  field(:port_of_discharge_location, :map, virtual: true)
end
```

Αξίζει να σημειωθούν μερικές σχεδιαστικές επιλογές. Τα πεδία `container_size` και `container_type` ορίζονται ως `Ecto.Enum`, εξασφαλίζοντας ότι μόνο επιτρεπτές τιμές μπορούν να αποθηκευτούν — οι επιτρεπτές τιμές ορίζονται δυναμικά από τα `Nrg.Ocean.Container.sizes()` και `Nrg.Ocean.Container.types()`. Το πεδίο `missing_in_dremio` αποτελεί σήμα ποιότητας δεδομένων: αν μια κίνηση δεν βρεθεί στο Dremio, σημαίνεται ώστε να μη συμπεριληφθεί σε υπολογισμούς εκπομπών χωρίς χειροκίνητη αναθεώρηση. Τα πεδία `port_of_receipt_location` και `port_of_discharge_location` ορίζονται ως `virtual: true`, δηλαδή δεν αποθηκεύονται στη βάση αλλά εμπλουτίζονται κατά τη φόρτωση για χρήση στο UI ή σε υπολογισμούς. Τέλος, οι συσχετίσεις `belongs_to(:customer)` και `belongs_to(:shipment)` εξασφαλίζουν ακεραιότητα αναφοράς σε επίπεδο βάσης.

5.3 Κύρια δεδομένα πλοίων (Vessel Master Data) — `ocean_api`

Η γνώση ποια πλοία ανήκουν στον στόλο, ποιο IMO number φέρουν και αν είναι ενεργά σε δεδομένη χρονική στιγμή, αποτελεί προαπαιτούμενο τόσο για τον υπολογισμό εκπομπών

όσο και για τη σωστή αντιστοίχιση δεδομένων STAR Connect. Το συστατικό `ocean_api` παρέχει ακριβώς αυτή τη λειτουργικότητα.

Αρχιτεκτονική GenServer με :pg. Το `OceanApi.VesselApi` υλοποιείται ως `GenServer` που εκκινεί με `start_link/1` και εγγράφεται σε process group μέσω `:pg.join(@name, self())`. Αυτή η επιλογή επιτρέπει σε πολλαπλές επαναλήψεις του διακομιστή να τρέχουν ταυτόχρονα σε ένα κατανεμημένο σύμπλεγμα BEAM (*distributed cluster*): η `find_server/0` εντοπίζει μια διαθέσιμη διεργασία, διανέμοντας φυσικά τη φόρτωση χωρίς ρητό εξισορροπητή φορτίου (*explicit load balancer*) (βλ. Κεφ. 9 για την κατανεμημένη αρχιτεκτονική).

Δημόσιο API. Οι τρεις κύριες συναρτήσεις που εκτίθενται είναι:

- `get_all_vessels/0` — επιστρέφει όλα τα γνωστά πλοία
- `all_active/0` — φιλτράρει μόνο ενεργά πλοία (χωρίς `deleted_at`)
- `find_by_imo/1` — αναζήτηση βάσει IMO number

Κάθε `Vessel` φέρει τουλάχιστον: αριθμό IMO, ονομασία πλοίου, καθεστώς ιδιοκτησίας (*ownership*), *flag state* (σημαία) και κατάσταση. Η αντιστοίχιση με το `Bops.ExternalDataFeeds.RemainingFuelOnBoard` γίνεται μέσω `imo_number`, πεδίου κοινού και στις δύο δομές.

Σχέση με STAR Connect. Κάθε μέτρηση STAR Connect φθάνει με ένα `imo_number`. Το `ocean_api` παρέχει την αρχή αλήθειας για τη σχέση IMO → εγγραφή πλοίου (*vessel record*), επιτρέποντας τον εμπλουτισμό των δεδομένων RoB με τα κύρια δεδομένα (*master data*) του πλοίου πριν αποθηκευτούν.

5.4 STAR Connect: Τηλεμετρία καυσίμων πραγματικού χρόνου

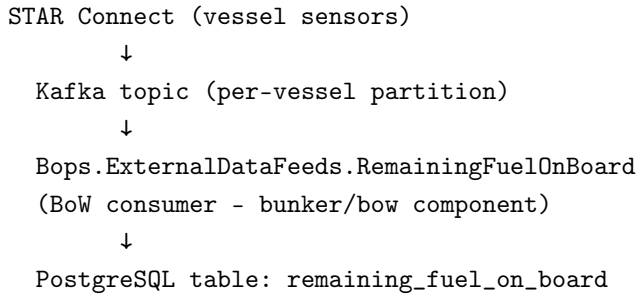
5.4.1 Τι είναι το STAR Connect

Το *STAR Connect* είναι η εσωτερική πλατφόρμα τηλεμετρίας πλοίων της Maersk. Ενσωματώνει αισθητήρες και συστήματα αυτοματισμού από τη μηχανοστάσιο κάθε πλοίου, αποστέλλοντας σε τακτά διαστήματα μετρήσεις πραγματικού χρόνου — μεταξύ άλλων, το *Remaining Fuel On Board* (RoB), δηλαδή τη ποσότητα καυσίμου που απομένει στις δεξαμενές του πλοίου, ανά τύπο καυσίμου.

Αυτά τα δεδομένα είναι πολύτιμα για δύο λόγους: αφενός επιτρέπουν υπολογισμό της κατανάλωσης ανά πλου (*voyage*) ($\Delta\text{RoB} = \text{RoB}_{\text{αρχή}} - \text{RoB}_{\text{τέλος}}$), αφετέρου τροφοδοτούν τα πλάνα ανεφοδιασμού (*bunker plans*) με πληροφορίες για τη διαθέσιμη ποσότητα καυσίμου πριν από τον επόμενο ανεφοδιασμό (βλ. Κεφ. 7 για τον πυλώνα Bunker Optimization).

5.4.2 Ποή δεδομένων: STAR Connect → Kafka → BoW

Η αρχιτεκτονική ενσωμάτωσης ακολουθεί ένα μοντέλο καθοδηγούμενο από συμβάντα (*event-driven*) με Kafka ως μεσίτη μηνυμάτων (*message broker*):



Η επιλογή του Kafka δικαιολογείται από πολλαπλές απαιτήσεις. Πρώτον, η ασύγχρονη ροή (*backpressure*) εξασφαλίζει ότι παροδικές καθυστερήσεις στην επεξεργασία δεν οδηγούν σε απώλεια μηνυμάτων — το Kafka αποθηκεύει τα συμβάντα μέχρι να τα επεξεργαστεί ο καταναλωτής (*consumer*). Δεύτερον, η διάταξη ανά διαμέρισμα (*partition*) εξασφαλίζει ότι τα μηνύματα ενός πλοίου επεξεργάζονται με σωστή χρονολογική σειρά, κρίσιμο για σωστό υπολογισμό ΔRoB. Τρίτον, το Kafka επιτρέπει πολλαπλούς καταναλωτές (*consumers*) στο ίδιο θέμα (*topic*) χωρίς αλληλεπικάλυψη — αυτή η ιδιότητα επιτρέπει τόσο στο BoW (bunker) όσο και σε μελλοντικά συστατικά να καταναλώνουν τα ίδια δεδομένα ανεξάρτητα (βλ. Κεφ. 8.4 για τη γενικότερη χρήση Kafka στην πλατφόρμα).

5.4.3 Δομή δεδομένων *RemainingFuelOnBoard*

Το Ecto schema `Bops.ExternalDataFeeds.RemainingFuelOnBoard` αποτυπώνει τη δομή κάθε μέτρησης RoB:

```

schema "remaining_fuel_on_board" do
  field :imo_number, :integer
  field :period_end, :naive_datetime
  field :hsdis, Measurement.Ecto.Type, unit: :tonnes
  field :hsfo, Measurement.Ecto.Type, unit: :tonnes
  field :lsdis, Measurement.Ecto.Type, unit: :tonnes
  field :ulsfo, Measurement.Ecto.Type, unit: :tonnes
  field :vlsfo, Measurement.Ecto.Type, unit: :tonnes
  field :methanol, Measurement.Ecto.Type, unit: :tonnes
  field :other, Measurement.Ecto.Type, unit: :tonnes
  has_many :bunker_plans, Bops.BunkerPlans.BunkerPlan
  belongs_to :vessel, Bops.Vessels.Vessel
  timestamps()
end

```

Κάθε εγγραφή αντιστοιχεί σε μία χρονική στιγμή (*period_end*) για ένα συγκεκριμένο πλοίο (*imo_number*). Τα πεδία καυσίμων χρησιμοποιούν τον τύπο `Measurement.Ecto.Type` με μονάδα `:tonnes`, εξασφαλίζοντας μετατροπές μονάδων με ασφάλεια τύπων (*type-safe*). Το εύρος καυσίμων καλύπτει όλους τους τύπους που χρησιμοποιεί ο στόλος: *hsdis* (High Sulfur Distillate), *hsfo* (High Sulfur Fuel Oil), *lsdis* (Low Sulfur Distillate), *ulsfo* (Ultra Low Sulfur Fuel Oil), *vlsfo* (Very Low Sulfur Fuel Oil) και *methanol*.

5.4.4 API πρόσβασης

Το άρθρωμα εκθέτει τρεις δημόσιες συναρτήσεις: `all/0` για ανάκτηση όλων των μετρήσεων, `store!/1` για εισαγωγή νέας μέτρησης από τον καταναλωτή (consumer) Kafka και `for_vessel/1` που επιστρέφει την πιο πρόσφατη μέτρηση για δεδομένο IMO number — αυτή χρησιμοποιείται στη σελίδα *current bunker plan* για εμφάνιση του τρέχοντος RoB.

Η ίδια αυτή ροή τροφοδοτεί και τον πυλώνα Bunker Optimization (Κεφ. 7), καθώς το RoB αποτελεί κρίσιμη είσοδο (*input*) για τον σχεδιασμό του επόμενου ανεφοδιασμού.

5.5 Υπολογισμός Εκπομπών

5.5.1 Συντελεστές εμπορικής διαδρομής (Trade Factors): ο πυρήνας της μεθοδολογίας

Ο υπολογισμός εκπομπών για κάθε κίνηση εμπορευματοκιβωτίου βασίζεται στους συντελεστές εμπορικής διαδρομής (*trade factors*) — προκαθορισμένους συντελεστές που αντιστοιχούν σε ένα πλέγμα παραμέτρων:

συντελεστής = $f(\text{route_code}, \text{direction}, \text{container_size}, \text{container_type}, \text{product}, \rightarrow \text{year})$

Οι συντελεστές αποθηκεύονται σε πίνακες `ocean_trade_factors_*` στη βάση δεδομένων και εισάγονται μέσω της `Nrg.Ocean.Ingest.OceanTradeFactors`. Κάθε συντελεστής φέρει τόσο TTW (*Tank-to-Wake*) — εκπομπές μόνο από καύση — όσο και WTW (*Well-to-Wake*) τιμή, που συμπεριλαμβάνει και τις εκπομπές παραγωγής και μεταφοράς καυσίμου (βλ. Κεφ. 3.4). Ο λόγος WTW/TTW κυμαίνεται από 1.0 έως ~1.4 ανάλογα με τον τύπο καυσίμου, με τα εναλλακτικά βιοκαύσιμα να εμφανίζουν μικρότερες διαφορές λόγω χαμηλότερων WTT εκπομπών.

5.5.2 Υπολογιστής Εκπομπών — EmissionsCalculator

Το άρθρωμα `Nrg.Ocean.EmissionsCalculator` αποτελεί το κύριο πλαίσιο (*context*) για τον υπολογισμό εκπομπών. Η κύρια συνάρτηση `get_ocean_emissions_for_route/N` δέχεται:

```
get_ocean_emissions_for_route(
  route_code_and_direction,
  container_size,
  container_type,
  container_count,
  year,
  eco_product,
  ocean_factors_filter_options \\ Nrg.Ocean.Factors.list_filter_options()
)
```

Το αποτέλεσμα είναι ένα `EcoOceanLaneEmissionsModel` που περιέχει τόσο TTW όσο και WTW τιμές για τη δεδομένη διαδρομή και προϊόν, ήδη πολλαπλασιασμένες με τον αριθμό FFE. Η φόρμουλα υπολογισμού σε ψευδοκώδικα:

```
emissions_kg_ttw = loaded_ffe * ttw_factor(route, size, type, product, year)
emissions_kg_wtw = loaded_ffe * wtw_factor(route, size, type, product, year)
```

Δηλαδή το γινόμενο του πλήθους εμπορευματοκιβωτίων με τους αντίστοιχους συντελεστές εκπομπών ανά διαδρομή/χρονιά.

Ο `Nrg.Ocean.Container.equivalent_container_size_for_co2e/1` κανονικοποιεί ορισμένα μεγέθη πριν την αναζήτηση — για παράδειγμα, τα μεγέθη `:size45` και `:size53` αντιστοιχίζονται σε `:size40` για τους υπολογισμούς CO₂e, καθώς οι συντελεστές εμπορικής διαδρομής δεν διαθέτουν ξεχωριστό συντελεστή για αυτά τα μεγέθη.

5.5.3 Διοχέτευση (Pipeline) μετασχηματισμού εισαγωγής

Κατά την εισαγωγή δεδομένων, κάθε ακατέργαστη (raw) εγγραφή από το Dremio μετασχηματίζεται σε αντικείμενα πεδίου (*domain objects*) μέσω του `Nrg.Ocean.Ingest.Converters`. Η διοχέτευση χρησιμοποιεί την έκφραση `with` της Elixir για σαφή διαχείριση σφαλμάτων:

```
def from_raw(%Ingest.RawOceanContainerMove{record: record}, to: :shipment_attrs)
  → do
  with operator when not is_nil(operator) <- record["shipment_operator"],
       product when product != :unrecognized_product <-
         dremio_product_to_product(record["shipment_product"]) do
    {:ok,
     %{
       external_id: record["shipment_no"],
       operator: operator |> String.downcase(),
       status: shipment_status(record["shipment_status"]),
       product: product
     }}
  else
    nil ->
      {:error, :missing_shipment_operator}

    :unrecognized_product ->
      {:error, :unrecognized_product}
  end
end
```

Αυτή η δομή επιτυγχάνει αρκετά πράγματα ταυτόχρονα. Το `with` εκφράζει σειρά ελέγχων που πρέπει όλοι να επιτύχουν· αν οποιοσδήποτε αποτύχει, εκτελείται ο κλάδος `else` με ακριβή αιτιολογία σφάλματος. Η κανονικοποίηση `String.downcase()` στον `operator`

εξασφαλίζει συνέπεια σε αναζητήσεις ανεξάρτητες πεζών-κεφαλαίων (case-insensitive) αργότερα. Η μετατροπή `dremio_product_to_product/1` μεταφράζει τους κωδικούς προϊόντων του Dremio σε εσωτερικές τιμές `atom` — αν ο κωδικός δεν αναγνωρίζεται, επιστρέφει `:unrecognized_product` που ο `with` αντιμετωπίζει ως σφάλμα. Αυτό αποτρέπει την εισαγωγή εγγραφών με άγνωστα προϊόντα, που θα οδηγούσαν αργότερα σε λανθασμένους υπολογισμούς εκπομπών.

Μια παρόμοια λογική εφαρμόζεται στους μετατροπείς (converters) για `customer_attrs` και `consignee_attrs`, δομώντας τη φάση εισαγωγής δεδομένων ως σειρά ανεξάρτητων μετασχηματισμών με αυστηρή διαχείριση σφαλμάτων (error handling). Η υβριδική μεθοδολογία (βλ. Κεφ. 3.3.3) εφαρμόζεται εδώ στην πράξη: δεδομένα από Dremio και Shiptech χρησιμοποιούνται όπου είναι διαθέσιμα, ενώ οι συντελεστές εμπορικής διαδρομής καλύπτουν τα κενά.

5.6 Επιβαρύνσεις EU ETS (Surcharges)

5.6.1 Ρυθμιστικό πλαίσιο

Από 1 Ιανουαρίου 2024, το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (*EU ETS — Emissions Trading System*) επεκτάθηκε στη ναυτιλία. Σύμφωνα με αυτό, τα ναυτιλιακά γραφεία διαχείρισης πλοίων υποχρεούνται να αγοράζουν *ευρωπαϊκά δικαιώματα εκπομπών* (*EUAs — European Union Allowances*) για ένα ποσοστό των εκπομπών CO₂ των πλοίων τους σε ευρωπαϊκά ύδατα. Το ποσοστό κλιμακώνεται: 40% το 2024, 70% το 2025 και 100% από το 2026 (βλ. Κεφ. 2.4).

Αυτό συνεπάγεται για τη Maersk ένα επιπλέον κόστος ανά πλου που πρέπει να μεταφράζεται σε επιβάρυνση (surcharge) για τους πελάτες. Η πρόκληση δεν είναι μόνο τεχνική — η τιμή αγοράς του EUA διαμορφώνεται δυναμικά και απαιτεί τριμηνιαία ενημέρωση των υπολογισμών.

5.6.2 Υλοποίηση

Το συστατικό `nrg/components/ocean/eu_ets/` υλοποιεί ολόκληρη τη λογική επιβάρυνσης EU ETS. Τα δεδομένα αντλούνται από το Dremio μέσω τεσσάρων πινάκων:

- `EUETSEmissionsTradeFactor` — συντελεστές εκπομπών ανά διαδρομή/κατεύθυνση/τύπο εμπορευματοκιβωτίου
- `EUETSEmissionsSurcharge` — η υπολογισμένη επιβάρυνση ανά εμπορική διαδρομή (trade lane)
- `EUETSPriceHistory` — ιστορικό τιμών EUA για κάθε τριμηνιαία περίοδο
- `EUETSMetadata` — μεταδεδομένα εγχυρότητας και αναγνωριστικά εκτέλεσης (*run IDs*) για ίχνος ελέγχου

Η φόρμουλα υπολογισμού εφαρμόζεται ως:

$\text{ets_charge} = \text{emissions_kg} \times \text{ETS_trade_factor} \times \text{EUA_price_used}$

Ο βαθμός εισαγωγής στο ETS (40%/70%/100%) ενσωματώνεται στον EUETSEmissionsTradeFactor, ώστε η φόρμουλα να παραμένει απλή και ο πελάτης να βλέπει την τελική χρέωση χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζει το κλιμακούμενο ποσοστό.

5.6.3 Τριμηνιαία εγκυρότητα και ίχνος ελέγχου (audit trail)

Κάθε εκτέλεση υπολογισμού λαμβάνει μοναδικό αναγνωριστικό εκτέλεσης (*run ID*), αποθηκευμένο στο EUETSMetadata. Η λογική *determine_valid_quarters/1* αναλύει τα πεδία ValidFrom/ValidTo και παράγει μια εγγραφή ανά τρίμηνο εντός της περιόδου εγκυρότητας. Αυτό εξασφαλίζει ότι κάθε επιβάρυνση που χρεώθηκε σε πελάτη μπορεί να αντιστοιχιστεί σε συγκεκριμένο αναγνωριστικό εκτέλεσης, τιμή EUA και τρίμηνο — ακριβώς η διαφάνεια που απαιτεί ο έλεγχος GIA (βλ. Κεφ. 2.7).

Η φιλτράρισμαμένη ροή (*Stream.filter(&valid?/2)*) απορρίπτει εγγραφές με άκυρη κατάσταση *isPromoted*, καταγράφοντας παράλληλα μετρικά τηλεμετρίας μέσω *:telemetry.execute/3*. Αυτές οι μετρικές επιτρέπουν παρακολούθηση της αναλογίας έγκυρων/άκυρων (*valid/invalid*) εγγραφών κατά την εισαγωγή δεδομένων — πρακτική που ευθυγραμμίζεται με τις αρχές παρατηρησιμότητας (*observability*) που αναλύονται στο Κεφ. 9.

Η επιβάρυνση EU ETS αποτελεί επίσης τη βάση για τα σχετιζόμενα με το ETS κόστη στα ECO προϊόντα — ένα ECO προϊόν μπορεί να μειώνει τις χρεώσεις ETS επειδή χρησιμοποιεί καύσιμα με χαμηλότερες εκπομπές. Η σύνδεση με τον πυλώνα ECO Delivery αναλύεται στο Κεφ. 6.

5.7 Βασική γραμμή εκπομπών πελάτη (Customer Baseline Emissions)

5.7.1 Σκοπός και λειτουργικότητα

Η λειτουργία *Customer Baseline Emissions* αποτελεί το κύριο σημείο επαφής μεταξύ του παρασκηνιακού (backend) υπολογισμού εκπομπών και των χρηστών του συστήματος. Επιτρέπει σε διαχειριστές λογαριασμών (*account managers*), στελέχη πωλήσεων και υπεύθυνους ECO προϊόντων να αναζητήσουν τις εκπομπές ενός συγκεκριμένου πελάτη για δεδομένη χρονική περίοδο.

Η λειτουργία υλοποιείται ως Phoenix LiveView, συνδυάζοντας διαδραστικό προσκήνιο (frontend) με ενημερώσεις πραγματικού χρόνου χωρίς ανανέωση σελίδας. Ο χρήστης εισάγει τον κωδικό πελάτη (*concern code* ή *fact code*) και εύρος ημερομηνιών. Το σύστημα εκτελεί συγκεντρωτικά ερωτήματα (*aggregated queries*) πάνω στον πίνακα *ocean_container_moves* σε σύνδεση (*join*) με *customers* και *shipments*, υπολογίζει και παρουσιάζει:

- Συνολικές εκπομπές WTW και TTW ανά τύπο προϊόντος
- Σύγκριση βάσης ορυκτών καυσίμων (*fossil baseline*) έναντι πραγματικών ECO (*ECO actual*) εκπομπών

- Ποσοστό εξοικονόμησης εκπομπών (%)
- Κατανομή ανά διαδρομή (lane), μέγεθος εμπορευματοκιβωτίου και χρονική περίοδο

5.7.2 Παρασκήνιο (Backend): BaselineEmissionsReport

Το άρθρωμα `Nrg.Ocean.BaselineEmissionsReport` εκτελεί τα συγκεντρωτικά ερωτήματα (aggregated queries) και κατασκευάζει το μοντέλο αναφοράς (report model). Κεντρική λειτουργία είναι η επεξεργασία των εγγραφών `ContainerMoveEmissionsSummary` — ένα ενδιάμεσο αντικείμενο μεταφοράς δεδομένων (data transfer object) που ομαδοποιεί τις εκπομπές ανά διαδρομή και προϊόν.

Η αρχιτεκτονική ακολουθεί το μοτίβο (pattern) που ορίζεται στους εσωτερικούς οδηγούς (*clean architecture*): η `LiveView` αναλαμβάνει αποκλειστικά τη λογική παρουσίασης (presentation logic), ενώ το `BaselineEmissionsReport` διαχειρίζεται τη λογική πεδίου (domain logic) και τα ερωτήματα. Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει ανεξάρτητες δοκιμές μονάδας (*unit testing*) του υπολογισμού εκπομπών χωρίς εξάρτηση από το επίπεδο ιστού (web layer).

5.7.3 Ίχνος ελέγχου (Audit trail) ανά αναζήτηση

Κάθε εκτέλεση αναζήτησης βασικής γραμμής εκπομπών καταγράφεται ως συμβάν (event). Αυτό εξυπηρετεί δύο σκοπούς: αφενός, παρέχει ιχνηλασιμότητα (*traceability*) — αν ένας πελάτης παραλάβει αναφορά εκπομπών, υπάρχει αρχείο για ποιον εκτέλεσε την αναζήτηση, πότε και με ποιά παραμέτρους. Αφετέρου, επιτρέπει την παρακολούθηση μέσω Loki/Grafana για ανίχνευση ανώμαλης χρήσης (βλ. Κεφ. 9).

5.7.4 Σύνδεση με μετέπειτα (downstream) χρήσεις

Τα αποτελέσματα του *Customer Baseline Emissions* τροφοδοτούν δύο κρίσιμες μετέπειτα (downstream) λειτουργίες. Πρώτον, αποτελούν τη βάση για την έκδοση πιστοποιητικών εκπομπών (Κεφ. 6.5) — το πιστοποιητικό αντλεί ακριβώς τα ίδια συγκεντρωτικά δεδομένα που βλέπει ο χρήστης στο UI, εξασφαλίζοντας συνέπεια μεταξύ αναφοράς και πιστοποιητικού. Δεύτερον, η σύγκριση βάσης ορυκτών καυσίμων έναντι πραγματικών ECO επιτρέπει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των ECO προϊόντων — δεδομένα που χρησιμοποιούνται για αναφορές βιωσιμότητας και αποτελέσματα της Maersk τόσο εσωτερικά όσο και στις αναφορές CSRD/CDP (Κεφ. 6, βλ. επίσης Κεφ. 2.4 για το ρυθμιστικό πλαίσιο).

Ο πυλώνας Ocean Emissions αποτελεί το θεμέλιο του συνολικού συστήματος. Η αξιοπιστία των δεδομένων κίνησης εμπορευματοκιβωτίου, η τηλεμετρία πραγματικού χρόνου μέσω STAR Connect, ο αλγόριθμος υπολογισμού βασισμένος σε συντελεστές εμπορικής διαδρομής και η ενσωμάτωση EU ETS απαντούν στις απαιτήσεις ακρίβειας, διαφάνειας και ίχνους ελέγχου που εντοπίστηκαν ως βασικές ελλείψεις της παλιάς χειροκίνητης διαδικασίας. Τα

επόμενα κεφάλαια εξετάζουν πώς αυτή η αξιόπιστη βάση εκπομπών χρησιμοποιείται για την Προϊόντα ECO Παράδοσης (Κεφ. 6) και τον βέλτιστο ανεφοδιασμό καυσίμου (Κεφ. 7).

Κεφάλαιο 6 — Πυλώνας Β:

Προϊόντα ECO Παράδοσης και πιστοποιητικά

6.1 Τι είναι τα ECO Προϊόντα

Ένα από τα σημαντικότερα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα της Maersk στη σύγχρονη αγορά εμπορευματικών μεταφορών είναι η δυνατότητα που προσφέρει στους πελάτες της να επιλέξουν αποστολή των εμπορευμάτων τους με σημαντικά μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα. Αυτή η δυνατότητα υλοποιείται μέσω της οικογένειας προϊόντων που αποκαλείται *ECO Delivery Ocean*.

Τα ECO Προϊόντα είναι εμπορικά προϊόντα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, στα οποία ο πελάτης καταβάλλει πρόσθετο κόστος προκειμένου η Maersk να εξασφαλίσει ότι αντίστοιχη ποσότητα εναλλακτικού καυσίμου — συνήθως βιοκαυσίμου ή καυσίμου μειωμένων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) — χρησιμοποιήθηκε κάπου στον εμπορικό στόλο κατά τη διάρκεια της παρτίδας. Η αξία για τον πελάτη είναι απτή και αποδείξιμη: δύναται να μειώσει τις εκπομπές *Κατηγορίας 3* του GHG Protocol που αναλογούν στις ναυτιλιακές μεταφορές του, με ελεγχόμενο και τεκμηριωμένο τρόπο (βλ. Κεφ. 3.5 για τη μεθοδολογία ισοζυγίου μάζας).

Η ποσοτικοποίηση της μείωσης γίνεται σε τόνους CO₂ ισοδύναμου (CO₂e) ανά Forty-Foot Equivalent (FFE) εμπορευματοκιβωτίου ανά δρομολόγιο. Η πλατφόρμα υποστηρίζει διάφορα ECO προϊόντα, που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τύπους εναλλακτικού καυσίμου και διαφορετικές μεθοδολογίες υπολογισμού:

- **ECO1 / ECO (eco1)**: βιοκαύσιμο 100% αντικατάστασης, υπολογισμός βάσει απόλυτης διαφοράς εκπομπών CO₂.
- **ECO2 (eco2)**: υπολογισμός βάσει ποσοστιαίας εξοικονόμησης CO₂e, πιο ευέλικτος για πολλαπλούς τύπους πράσινου καυσίμου.
- **B50 (b50)**: βιοκαύσιμο 50% ανάμειξης (blend).
- **ECO4 / ECO5 (eco4, eco5)**: προηγμένα βιοκαύσιμα ή καύσιμα συγκεκριμένης τεχνολογικής προέλευσης.
- **ECM (ecm)**: μεθανόλη (methanol) ως εναλλακτικό καύσιμο.
- **ECX (ecx)**: ειδικό προϊόν για επιλεγμένα δρομολόγια.

Ο μηχανισμός πώλησης βασίζεται στην αρχή του ισοζυγίου μάζας (*mass balance*): δεν απαιτείται το συγκεκριμένο φορτίο του πελάτη να μεταφερθεί με πράσινο καύσιμο στον κινητήρα του πλοίου. Αντ' αυτού, η Maersk εγγυάται ότι η ισοδύναμη ποσότητα πράσινου καυσίμου σε ενεργειακή αξία (*gigajoules*) χρησιμοποιήθηκε κάπου στον στόλο κατά την αντίστοιχη περίοδο. Αυτή η απόδειξη παρέχεται μέσω αδιάσπαστης αλυσίδας ιχνηλασιμότητας: από τον προμηθευτή καυσίμου, μέσω των εγγράφων *Proof of Sustainability* (POS) και πιστοποίησης ISCC, έως το πιστοποιητικό που εκδίδεται για τον τελικό πελάτη (βλ. Κεφ. 3.6 για το ρυθμιστικό πλαίσιο ISCC).

Το επιχειρησιακό μέγεθος αυτής της λειτουργίας είναι σημαντικό: κατά το 2024 η πλατφόρμα διαχειρίστηκε πωλήσεις ECO Delivery Ocean ύψους 98.000 FFE και αξίας 31 εκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ, με αυτοματοποιημένη έκδοση πιστοποιητικών τόσο για ECOv1 όσο και για ECOv2.

6.2 ECOv1 vs ECOv2: Δύο μεθοδολογίες υπολογισμού

Η ύπαρξη δύο παραλλαγών των ECO προϊόντων — ECOv1 και ECOv2 — αντανακλά την εξέλιξη της μεθοδολογίας υπολογισμού εκπομπών που ακολούθησε η Maersk καθώς η αγορά ωριμάζε και περισσότεροι τύποι εναλλακτικών καυσίμων ενσωματώθηκαν στο χαρτοφυλάκιο προμήθειας.

ECOv1: Υπολογισμός βάσει απόλυτης διαφοράς CO₂

Η πρώτη έκδοση, ECOv1, υπολογίζει την εξοικονόμηση εκπομπών ως την απόλυτη διαφορά μεταξύ του σεναρίου 100% συμβατικού καυσίμου (*grey fuel*) και του σεναρίου με 100% αντικατάστασή του από πράσινο καύσιμο. Η λογική υλοποιείται στο άρθρωμα *Nrg.Products.Eco* και ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. **Ενέργεια πράσινου καυσίμου:** η ποσότητα γκρι καυσίμου μετατρέπεται σε ενέργεια (GJ) μέσω του *θερμογόνου δύναμης* (*calorific value*) του γκρι καυσίμου.
2. **Ποσότητα πράσινου καυσίμου:** η ενέργεια αυτή διαιρείται με τον *θερμογόνο δύναμη* του πράσινου καυσίμου, ώστε να ληφθεί η ισοδύναμη ποσότητα σε τόνους.
3. **Εκπομπές γκρι καυσίμου:** πολλαπλασιασμός τόνων γκρι καυσίμου με τον συντελεστή εκπομπών TTW (*Tank-to-Wake*) και WTW (*Well-to-Wake*).
4. **Εκπομπές πράσινου καυσίμου:** αντίστοιχος υπολογισμός για το πράσινο καύσιμο.
5. **Εξοικονόμηση:** η διαφορά είναι η εξοικονόμηση ECO (*ECO savings*), εκφρασμένη σε kg CO₂e.

Σχηματικά, η βασική φόρμουλα για την ποσότητα πράσινου καυσίμου είναι:

```
green_fuel_needed = (calorific_grey * grey_fuel_used) / calorific_green
savings_ttw = (grey_fuel_used * grey_to_ttw) - (green_fuel_needed * green_to_ttw)
savings_wtw = (grey_fuel_used * grey_to_wtw) - (green_fuel_needed * green_to_wtw)
```

Σημαντική τεχνική λεπτομέρεια είναι ότι οι υπολογισμοί αυτοί δεν αποδίδουν άμεσα αριθμητικά αποτελέσματα αλλά κατασκευάζουν *δέντρα εκφράσεων* (expression trees) μέσω των δομών (structs) `Nrg.Equation.Expression` και `Nrg.Equation.Variable`. Αυτό επιτρέπει στο σύστημα να αποθηκεύει και να παρουσιάζει πλήρη αιτιολόγηση της μεθοδολογίας υπολογισμού για κάθε αποτέλεσμα — απαίτηση που πηγάζει από την ανάγκη ελεγχιμότητας (Κεφ. 5.5).

ECOn2: Υπολογισμός βάσει ποσοστιαίας εξοικονόμησης CO₂e

Η δεύτερη έκδοση, ECOn2, υλοποιείται στο άρθρωμα `Nrg.Products.Eco2` και διαφέρει ουσιαστικά από την ECOn1: αντί να υπολογίζει την απόλυτη διαφορά εκπομπών, χρησιμοποιεί ένα *ποσοστό εξοικονόμησης εκπομπών* (`ttw_emissions_savings_percentage`, `wtw_emissions_savings_percentage`) που παρέχεται ως παράμετρος των συντελεστών εκπομπών (*emissions factors*) του συγκεκριμένου προϊόντος.

Η φόρμουλα ECOn2 για TTW εξοικονόμηση είναι:

$$\text{ttw_savings} = \text{ttw_on_full_grey_fuel} \times \text{ttw_emissions_savings_percentage} \times \rightarrow \text{green_fuel_percentage}$$

όπου `green_fuel_percentage` ισούται με 100% για πλήρη αντικατάσταση. Αντίστοιχα για WTW:

$$\text{wtw_savings} = \text{wtw_on_full_grey_fuel} \times \text{wtw_emissions_savings_percentage} \times \rightarrow \text{green_fuel_percentage}$$

Αυτή η προσέγγιση είναι πιο ευέλικτη γιατί το ποσοστό εξοικονόμησης μπορεί να τεκμηριωθεί ανεξάρτητα για κάθε τύπο πράσινου καυσίμου από εξωτερικούς φορείς πιστοποίησης, χωρίς να εξαρτάται κάθε φορά από ακριβή γνώση του συγκεκριμένου θερμογόνου δύναμης. Αυτό καθιστά το ECOn2 κατάλληλο για εναλλακτικά καύσιμα με μεγαλύτερη ποικιλομορφία ιδιοτήτων, όπως η μεθανόλη ή τα προηγμένα βιοκαύσιμα.

6.3 Energy Bank: λογιστική πράσινου καυσίμου

6.3.1 Το πρόβλημα του ισοζυγίου μάζας

Ο μηχανισμός του ισοζυγίου μάζας που περιγράφηκε στο Κεφ. 6.1 δημιουργεί μια θεμελιώδη επιχειρησιακή απαίτηση: η Maersk δεν πρέπει ποτέ να πουλήσει περισσότερο πράσινο καύσιμο από αυτό που έχει φυσικά προμηθευτεί και παραλάβει. Παράλληλα, κάθε πώληση ECO προϊόντος πρέπει να αντιστοιχίζεται ιχνηλάσιμα σε συγκεκριμένες παρτίδες καυσίμου, με εγγυημένη αλυσίδα πιστοποίησης.

Αυτό το πρόβλημα είναι ουσιαστικά ένα λογιστικό πρόβλημα: κάθε παρτίδα πράσινου καυσίμου που παραδίδεται σε ένα πλοίο είναι μια *κατάθεση* (deposit) στη λογιστική βιβλίο, κάθε πώληση ECO προϊόντος είναι μια *ανάληψη* (withdrawal), και η αρχή της συντήρησης απαιτεί να ισχύει ανά πάσα στιγμή:

Σωρευτικές καταθέσεις $\geq$ Σωρευτικές αναλήψεις (ανά λογαριασμό και περίοδο)

Για να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με αυτή την αρχή, αλλά και να παρέχεται πλήρης ελεγχιμότητα (audit trail) σε ενδεχόμενο εσωτερικό ή εξωτερικό έλεγχο, η ομάδα σχεδίασε έναν εξειδικευμένο υποσυστήματικό λογαριασμό που ονομάστηκε **Energy Bank**.

6.3.2 Event Sourcing και CQRS στην Energy Bank

Για την υλοποίηση του Energy Bank επιλέχθηκε η αρχιτεκτονική της προέλευσης από συμβάντα (*Event Sourcing*) σε συνδυασμό με το πρότυπο *CQRS* (*Command Query Responsibility Segregation* — Διαχωρισμός Ευθυνών Εντολής-Ερωτήματος). Η επιλογή αυτή δεν ήταν τυχαία: η φύση του προβλήματος — αμετάβλητο ιστορικό συναλλαγών, ανάγκη επανεκτέλεσης παρελθοντικών υπολογισμών, αδιαμφισβήτητη ελεγχιμότητα — ταυτίζεται φυσικά με τα δυνατά σημεία της προέλευσης από συμβάντα.

Στην προέλευση από συμβάντα, η κατάσταση ενός αντικειμένου (aggregate) δεν αποθηκεύεται άμεσα αλλά ανακατασκευάζεται κάθε φορά από την αλληλουχία αμετάβλητων συμβάντων (events) που έχουν εγγραφεί στην ιστορία του. Τα συμβάντα είναι αμετάβλητα (immutable) και αποτελούν την αποκλειστική αλήθεια του συστήματος. Οποιαδήποτε ερώτηση για τρέχουσα κατάσταση εξυπηρετείται από *projections* — μοντέλα ανάγνωσης (read models) που κατασκευάζονται ασύγχρονα ακούγοντας τη ροή συμβάντων (βλ. Κεφ. 9.9 για αναλυτικότερη παρουσίαση της αρχιτεκτονικής CQRS).

Η υλοποίηση στηρίζεται στη βιβλιοθήκη *Commanded* που παρέχει πλαίσιο για τη ροή $\text{Command} \rightarrow \text{Aggregate} \rightarrow \text{Event} \rightarrow \text{Projection}$, και στο *EventStore* ως σύστημα αποθήκευσης (backend) συμβάντων (βλ. Κεφ. 8.16). Κάθε εντολή εκφράζεται ως δομή (struct) που εξακριβώνεται πριν εκτελεστεί, και κάθε χειριστής (handler) ορίζει ρητά τη συμπεριφορά (behaviour) `Commanded.Commands.Handler`.

Λήμμα 6.3.1 — `Command` και `CommandHandler` για ανάληψη ενέργειας από την Energy Bank:

```
defmodule EnergyBank.Application.Transactions.WithdrawEnergy do
  defmodule Command do
    use Ecto.Schema
    import Ecto.Changeset

    @fields [
      :transaction_id,
      :account_id,
      :amount,
      :withdrawn_at,
      :recorded_at
    ]

    @primary_key false
    embedded_schema do
```

```

    field :transaction_id, :string
    field :account_id, :string
    field :amount, :decimal
    field :withdrawn_at, :naive_datetime
    field :recorded_at, :naive_datetime
  end

  def new!(attrs) do
    %__MODULE__{}
    |> cast(attrs, @fields)
    |> validate_required(@fields)
    |> apply_action!(:new)
  end
end

defmodule CommandHandler do
  alias EnergyBank.Domain.Transactions.Withdrawal

  @behaviour Commanded.Commands.Handler

  @impl Commanded.Commands.Handler
  def handle(state, %Command{} = command) do
    Withdrawal.withdraw(state, command |> Map.from_struct())
  end
end
end

```

Στον κώδικα αυτό φαίνεται καθαρά το διπλό μοτίβο (pattern) που ακολουθεί η Energy Bank: το άρθρωμα `Command` ορίζει το σχήμα της εντολής ως ενσωματωμένο (embedded) Ecto schema, εξακριβώνει τα πεδία (`validate_required`) και εφαρμόζει τις αλλαγές μέσω διοχέτευσης `changeset`. Αυτό εξασφαλίζει ότι καμία ανάληψη δεν μπορεί να εκτελεστεί με ελλιπή ή άκυρα δεδομένα. Το `CommandHandler` από την άλλη, εφαρμόζει τη συμπεριφορά (behaviour) `Commanded.Commands.Handler` και αναθέτει στη λογική πεδίου (domain logic) (`Withdrawal.withdraw/2`) την ευθύνη να αποφασίσει αν η ανάληψη είναι έγκυρη με βάση την τρέχουσα κατάσταση του aggregate. Αν η ανάληψη ξεπερνά τη διαθέσιμη ενέργεια, η συνάρτηση πεδίου (domain function) επιστρέφει σφάλμα και κανένα συμβάν δεν εγγράφεται στο `EventStore`.

6.3.3 Καταθέσεις, Αναλήψεις και Λογαριασμοί Εκκαθάρισης

Η Energy Bank οργανώνει τη ροή πράσινης ενέργειας σε τρεις τύπους λειτουργιών:

Καταθέσεις (Deposits): κάθε φορά που ένα πλοίο παραλαμβάνει πράσινο καύσιμο ανεφοδιασμού (*bunkered green fuel*), η αντίστοιχη ποσότητα σε gigajoules εγγράφεται ως κατάθεση. Τα δεδομένα αντλούνται από το συστατικό `FuelOrderTracking`, το οποίο παρακολουθεί τις φυσικές παραγγελίες καυσίμου και τις παραδόσεις τους ανά πλοίο και

λιμάνι ανεφοδιασμού (*Port of Supply* — POS). Η προβολή (projection) `EnergyBank.Projections.FuelOrdersProjector` ακούει συμβάντα από τον `FuelOrderTracking.Dispatcher` και δημιουργεί έγγραφές στους πίνακες `energy_bank_projections.fuel_orders_2` και `fuel_order_deliveries_2`.

Αναλήψεις (Withdrawals): κάθε φορά που μια αποστολή κλείνει ως ECO προϊόν, η αντίστοιχη ποσότητα πράσινης ενέργειας αναλαμβάνεται από τον λογαριασμό. Η εντολή `WithdrawEnergy.Command` περιέχει τα πεδία `account_id`, `amount`, `withdrawn_at` και `recorded_at`, επιτρέποντας διαχωρισμό του χρονικού στιγμιότυπου της φυσικής χρήσης από αυτό της λογιστικής καταγραφής.

Λογαριασμοί Εκκαθάρισης (Clearing Accounts): για λόγους λογικού διαχωρισμού, η Energy Bank υποστηρίζει πολλαπλούς λογαριασμούς εκκαθάρισης, οργανωμένους ανά προμηθευτή, ανά POS (λιμάνι ανεφοδιασμού) και ανά χρονική περίοδο. Αυτό επιτρέπει, για παράδειγμα, να εξασφαλιστεί ότι βιοκαύσιμο αγορασμένο από έναν συγκεκριμένο προμηθευτή με ISCC πιστοποίηση χρησιμοποιείται μόνο για ECO προϊόντα που φέρουν τη συγκεκριμένη πιστοποίηση.

6.3.4 Η αρχή του ισοζυγίου μάζας ως περιορισμός συστήματος

Η αρχή της μη αρνητικής διαθέσιμης ενέργειας εφαρμόζεται ρητά στους χειριστές εντολών (command handlers). Πριν εγγραφεί οποιοδήποτε συμβάν ανάληψης στο `EventStore`, η συνάρτηση πεδίου (domain) `Withdrawal.withdraw/2` επαληθεύει ότι το τρέχον ισοζύγιο του λογαριασμού επαρκεί. Αν όχι, επιστρέφεται σφάλμα και το σύστημα ενημερώνει τον χειριστή.

Σε περίπτωση παραβίασης — για παράδειγμα λόγω εκ των υστέρων ακύρωσης μιας παρτίδας καυσίμου — το σύστημα παράγει ειδοποίηση που απαιτεί χειροκίνητη αναθεώρηση. Η ιχνηλασιμότητα παραμένει πλήρης καθώς το `EventStore` διατηρεί αναλλοίωτη ολόκληρη την ακολουθία συμβάντων, επιτρέποντας ανά πάσα στιγμή χρονικό ταξίδι (*time travel*) στην κατάσταση οποιουδήποτε λογαριασμού σε οποιαδήποτε παρελθοντική χρονική στιγμή — η ικανότητα αυτή ήταν καθοριστική για την επίλυση των ζητημάτων που ανέδειξε ο εσωτερικός έλεγχος GIA του 2023.

6.4 Πιστοποιητικό Βιωσιμότητας (POS) και ISCC

Η αλυσίδα πιστοποίησης βιοκαυσίμων ξεκινά πολύ πριν το καύσιμο φτάσει στο πλοίο. Οι βιομηχανικοί παραγωγοί βιοκαυσίμων — διυλιστήρια, παραγωγοί βιοανεφοδιασμού — υποχρεούνται να παρέχουν έγγραφα που αποδεικνύουν τη βιωσιμότητα της πρώτης ύλης και την ενεργειακή απόδοση του τελικού προϊόντος. Αυτά τα έγγραφα ονομάζονται *Πιστοποιητικό Βιωσιμότητας* (Proof of Sustainability — POS) και αποτελούν τη θεμελιακή τεκμηρίωση κάθε πώλησης ECO προϊόντος.

Κάθε POS έγγραφο περιέχει πληροφορίες για:

- **Feedstock** (πρώτη ύλη): π.χ. χρησιμοποιημένο μαγειρικό λάδι (*Used Cooking Oil* —

UCO), φυτικά λίπη, απόβλητα γεωργίας.

- **Αλυσίδα Επιμέλειας** (*Chain of Custody*): ποιοί φορείς ήλεγξαν, επεξεργάστηκαν και διανέμησαν το καύσιμο.
- **Ενεργειακό περιεχόμενο**: η πραγματική ενέργεια (σε GJ) που αντιπροσωπεύει η παρτίδα.
- **Αριθμός POS**: μοναδικός αναγνωριστικός κωδικός που επιτρέπει αντιστοίχιση με φυσικές παραδόσεις.

Η πιστοποίηση αυτή εκδίδεται από τον οργανισμό *ISCC* (*International Sustainability and Carbon Certification*), ο οποίος διαπιστεύει ολόκληρη την αλυσίδα παραγωγής και διανομής βιοκαυσίμων. Χωρίς έγκυρο ISCC πιστοποιητικό για μια παρτίδα καυσίμου, η Maersk δεν μπορεί νόμιμα να πωλήσει ECO προϊόν που να αναφέρεται σε εκείνη την παρτίδα (βλ. Κεφ. 3.6 για το ευρύτερο ρυθμιστικό πλαίσιο ISCC).

Η υλοποίηση αντιστοίχισης POS με φυσικές παραδόσεις καυσίμου γίνεται μέσω του `EnergyBank.Projections.FuelOrdersProjector`. Στο σχήμα προβολής (projection) `FuelOrderDelivery` ορίζεται ένα `embeds_many :matched_pos` που περιέχει τα πεδία `pos_number`, `quantity` (σε τόνους) και `energy` (σε GJ) για κάθε αντίστοιχο POS έγγραφο. Αυτή η αντιστοίχιση εξασφαλίζει ότι κάθε ανάληψη ενέργειας από την Energy Bank μπορεί να αναχθεί σε συγκεκριμένα POS έγγραφα, παρέχοντας πλήρη ιχνηλασιμότητα από το πιστοποιητικό πελάτη έως τη φυσική παρτίδα βιοκαυσίμου.

Η διαχείριση POS εγγράφων στο σύστημα περιλαμβάνει επίσης τη διάκριση μεταξύ *εκτιμώμενης* (`status: "estimated"`) και *επιβεβαιωμένης* (`status: "delivered"`) κατάστασης παράδοσης, καθώς η τελική ποσότητα καυσίμου μπορεί να διαφέρει ελαφρώς από την αρχική παραγγελία. Η πλατφόρμα διαχειρίζεται αυτή την αβεβαιότητα διατηρώντας τις εκτιμήσεις ως προσωρινές εγγραφές που αντικαθίστανται όταν ληφθεί η επίσημη επιβεβαίωση από τον προμηθευτή.

6.5 Έκδοση πιστοποιητικών

6.5.1 Δομή πιστοποιητικού

Το πιστοποιητικό ECO Delivery αποτελεί το τελικό παραδοτέο προς τον πελάτη και φέρει νομική και εμπορική βαρύτητα: δηλώνει επίσημα την ποσότητα CO₂ ή CO_{2e} που εξοικονομήθηκε για λογαριασμό του πελάτη κατά τη διάρκεια ενός έτους, βάσει αποδεκτής μεθοδολογίας και με πλήρη αλυσίδα τεκμηρίωσης.

Το μοντέλο πεδίου (`domain model`) ορίζεται στο `Nrg.Ocean.Certificates.Certificate` και περιλαμβάνει:

- **Κωδικός αντικτήτορα** (`concern_code`): ο μοναδικός αναγνωριστικός κωδικός του νομικού προσώπου-πελάτη στο σύστημα Maersk.
- **Έτος** (`year`): το ημερολογιακό έτος στο οποίο αναφέρεται το πιστοποιητικό.
- **Κινήσεις FFE** (`ffe_moves`): ο συνολικός αριθμός εμπορευματοκιβωτίων ισοδύναμων σαράντα ποδιών (FFE — Forty Foot Equivalent) που εμπλέκονται.

- **Συνολικές εκπομπές WTW** (*total_emissions_wtw*): σε τόνους CO₂e, Well-to-Wake.
- **Εξοικονόμηση** (*savings*): εκφρασμένη ως απόλυτη ποσότητα (ECOv1) ή ποσοστό (ECOv2).
- **Αναφορά ISCC** (*iscc_reference*): σύνδεσμος με τα POS έγγραφα που τεκμηριώνουν τη βιωσιμότητα.
- **Περίοδος ισχύος**: ημερομηνίες έναρξης και λήξης ισχύος του πιστοποιητικού.
- **Πρότυπο** (*template*): :co2 ή :co2e, που καθορίζει την παρουσίαση στο PDF.

Επιπλέον, κάθε πιστοποιητικό ενσωματώνει μια δομή (struct) `EmissionsSummary` με αναλυτική περίληψη εκπομπών: TTW και WTW επί πράσινου και γκρι καυσίμου, χρησιμοποιηθείσα πράσινη ενέργεια σε GJ, τύπος καυσίμου και ποσοστό εξοικονόμησης.

6.5.2 Παραγωγή PDF και αποθήκευση στο Azure Blob Storage

Η δημιουργία του πιστοποιητικού ως PDF αρχείου ακολουθεί ντετερμινιστική διαδικασία που διασφαλίζει ότι το PDF που αποστέλλεται στον πελάτη αντιστοιχεί ακριβώς στα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στο σύστημα. Το άρθρωμα `Nrg.Ocean.Certificates.GenerateCertificateDocument` αναλαμβάνει την παραγωγή:

1. **Συγκέντρωση δεδομένων**: τα δεδομένα εκπομπών και ισοζυγίου φόρτωνται από τη βάση.
2. **Μορφοποίηση**: δημιουργείται η δομή περιεχομένου βάσει του προτύπου (template) (ECO1 ή ECO2).
3. **Απόδοση σε PDF**: η Elixir εφαρμογή αποδίδει το πιστοποιητικό σε μορφή PDF.
4. **Αποθήκευση**: το PDF αποθηκεύεται στο *Azure Blob Storage* με αυστηρή σύμβαση ονομασίας αρχείου που επιτρέπει αναζήτηση και ανάκτηση: `{concern}_{year}_{template}_{certificate_id}.pdf`.

Η ανάκτηση γίνεται μέσω του αρθρώματος `Nrg.Ocean.Certificates.GetCertificateDocument`, το οποίο επιστρέφει τα δεδομένα (bytes) του PDF. Το σημείο πρόσβασης HTTP (endpoint) για λήψη εξυπηρετείται από τον ελεγκτή (controller) `lib/nrg_web/controllers/ocean/certificates_controller.ex` (συνάρτηση `download/2`).

Αξιοσημείωτο είναι το μοτίβο (pattern) `fetch_or_create_pdf/1`: όταν ζητηθεί ένα PDF, το σύστημα πρώτα ψάχνει αν υπάρχει ήδη αποθηκευμένο. Αν υπάρχει, το επιστρέφει άμεσα. Αν δεν υπάρχει (π.χ. πρόκειται για νέο πιστοποιητικό ή ακυρωμένο παλαιότερο), το δημιουργεί εκ νέου. Αυτό το μοτίβο οκνηρής δημιουργίας (lazy generation) εξοικονομεί χώρο αποθήκευσης και εξασφαλίζει ότι το PDF πάντα αντιστοιχεί στην πιο πρόσφατη έκδοση των δεδομένων.

6.5.3 Επανεκδοση, ακύρωση και ιστορικό

Τα δεδομένα εκπομπών ενδέχεται να αλλάξουν μετά την αρχική έκδοση ενός πιστοποιητικού. Νέα πλοηγικά δεδομένα μπορεί να ενσωματωθούν εκ των υστέρων, διορθώσεις σε παραγγελίες καυσίμου μπορεί να μεταβάλλουν το ισοζύγιο, ή οι συντελεστές εμπορικής διαδρομής μπορεί να αναθεωρηθούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η πλατφόρμα υποστηρίζει αυτόματη επανεκδοση (*reissue*) πιστοποιητικών.

Η επανεκδοση εκτελείται ασύγχρονα μέσω εργάτη Oban (*worker*). Το άρθρωμα `Nrg.Ocean.Certificates` παρέχει τη συνάρτηση `enqueue_reissue_certificate/2` που δημιουργεί μια νέα εργασία στην ουρά Oban, παραδίδοντας το `certificate_id` και τα στοιχεία του χρήστη (για λόγους ελέγχου). Η ουρά επεξεργάζεται την εργασία ασύγχρονα: αναυπολογίζει τις εκπομπές, δημιουργεί νέο PDF και αντικαθιστά το παλαιό στο Azure Blob Storage.

Ομοίως, η συνάρτηση `bulk_issue_certificates/2` επιτρέπει μαζική έκδοση για ένα ολόκληρο έτος — χρήσιμο κατά την αρχική ενεργοποίηση νέου έτους ή μετά από μαζική επανεπεξεργασία δεδομένων.

Λήμμα 6.5.1 — εργάτης Oban (*worker*) για εισαγωγή παρτίδας κινήσεων εμπορευματοκιβωτίου:

```
defmodule Nrg.Ocean.Ingest.Jobs.ImportContainerMovesBatch do
  use Oban.Worker, queue: :dremio

  @impl Oban.Worker
  def perform(%{args: %{"day" => date, "offset" => offset, "limit" => limit}}) do
    start_datetime = DateTime.new!(date |> Date.from_iso8601!(), ~T[00:00:00])
    end_datetime = DateTime.new!(date |> Date.from_iso8601!(), ~T[23:59:59])

    result =
      Nrg.Ocean.Ingest.ContainerMoves.ingest_incremental_moves(%{
        limit: limit,
        offset: offset,
        last_updated: ~U[1999-01-01 00:00:00Z],
        first_loaded_at: [start_datetime, end_datetime]
      })

    {:ok, result}
  end

  @impl Oban.Worker
  def perform(%{args: %{"last_updated" => date, "offset" => offset, "limit" =>
    ↳ limit}}) do
    earliest_ingest_date = ~U[2022-01-01 00:00:00Z]

    last_updated = NaiveDateTime.from_iso8601!(date) |>
    ↳ DateTime.from_naive!("Etc/UTC")
```

```

result =
  Nrg.Ocean.Ingest.ContainerMoves.ingest_incremental_moves(%{
    limit: limit,
    offset: offset,
    last_updated: last_updated,
    first_loaded_at: earliest_ingest_date
  })

{:ok, result}
end
end

```

Ο κώδικας αυτός αποτυπώνει χαρακτηριστικά του γενικότερου μοτίβου (pattern) που ακολουθεί η πλατφόρμα για εργάτες Oban (workers): η δήλωση `use Oban.Worker, queue: :dremio` ορίζει σε ποια ουρά εργασιών ανήκει ο εργάτης (εδώ η ουρά `dremio` που αφορά εισαγωγές δεδομένων από τη λίμνη δεδομένων). Η συνάρτηση `perform/1` χρησιμοποιεί αντιστοίχιση προτύπων (pattern matching) στον χάρτη (map) `args` για να χειριστεί δύο διαφορετικά σενάρια εισαγωγής: το πρώτο βάσει ημερομηνίας (*day-based batch*) και το δεύτερο βάσει χρονοσφραγίδας (timestamp) τελευταίας ενημέρωσης (*incremental update*). Αυτό το ίδιο μοτίβο επαναλαμβάνεται στους εργάτες επανέκδοσης πιστοποιητικών, όπου τα `args` μεταφέρουν το `certificate_id` και τα στοιχεία χρήστη.

Για ιστορικό παρακολούθησης, η πλατφόρμα παρέχει τη `GetCertificateHistoryReport` που επιστρέφει χρονολογική λίστα αλλαγών ανά πιστοποιητικό: αρχική έκδοση, επανεκδόσεις με ημερομηνία και αιτιολόγηση, ακυρώσεις και ποσοστιαία μεταβολή εκπομπών σε κάθε αναθεώρηση. Η συνάρτηση `append_latest_changes_variation/1` του `Nrg.Ocean.Certificates` υπολογίζει και ταξινομεί την απόκλιση μεταξύ αρχικής και τρέχουσας έκδοσης, επιτρέποντας στον χειριστή να αξιολογήσει αν η αλλαγή είναι ουσιώδης ή αμελητέα.

6.6 Επιβαρύνσεις ECO Delivery: τιμολόγηση και κόστος αποφυγής

Η τιμολόγηση των ECO προϊόντων αποτελεί την πιο εμπορική όψη του πυλώνα: πρέπει να αντικατοπτρίζει με ακρίβεια το πραγματικό κόστος της Maersk για την προμήθεια πράσινου καυσίμου, ενώ ταυτόχρονα να παρέχει μια κατανοητή μετρική στους πελάτες. Η αρμόδια λογική υλοποιείται στο συστατικό `eco_delivery_surcharges`, με το άρθρωμα `EcoDeliverySurcharges.Domain.Surcharges` ως κεντρική υπηρεσία πεδίου (domain service).

6.6.1 Κόστος αποφυγής (Cost of Abatement)

Η μετρική *Cost of Abatement* (κόστος αποφυγής) εκφράζει το επιπλέον κόστος ανά τόνο εκπομπών CO₂e που αποφεύγεται. Είναι η κανονικοποιημένη μορφή με την οποία η Maersk

συγκρίνει διαφορετικά εναλλακτικά καύσιμα και την οποία επικοινωνεί στους πελάτες:

```
def calculate_maersk_cost_of_abatement(%{
  grey_fuel_to_wtw: grey_fuel_to_wtw,
  wtw_emissions_savings_percentage: wtw_emissions_savings_percentage,
  green_fuel_price_foe: green_fuel_price_foe,
  vlsfo_price: vlsfo_price
}) do
  Decimal.div(
    Decimal.sub(green_fuel_price_foe, vlsfo_price),
    Decimal.mult(grey_fuel_to_wtw, Decimal.div(wtw_emissions_savings_percentage,
  ↪ 100))
  )
end
```

Ο αριθμητής αντιπροσωπεύει το επιπλέον κόστος του πράσινου καυσίμου σε σχέση με τη συμβατική επιλογή (VLSFO, *Very Low Sulphur Fuel Oil*, ως καύσιμο αναφοράς). Ο παρονομαστής εκφράζει την ποσότητα CO₂e που αποφεύγεται ανά μονάδα γκρίζου καυσίμου, υπολογισμένη ως ο συντελεστής εκπομπών WTW του γκρίζου καυσίμου επί το ποσοστιαίο όφελος εκπομπών. Έτσι, το αποτέλεσμα εκφράζεται σε δολάρια ή ευρώ ανά τόνο CO₂e και επιτρέπει σύγκριση επί ίσοις όροις (*apples to apples*) ανάμεσα σε διαφορετικά εναλλακτικά καύσιμα.

6.6.2 Υπολογισμός χρέωσης πελάτη

Η πραγματική χρέωση που εμφανίζεται στον πελάτη υποστηρίζεται από δύο εναλλακτικές φόρμουλες, ανάλογα με τον τύπο του προϊόντος και τον βαθμό λεπτομέρειας των διαθέσιμων δεδομένων:

```
def calculate_surcharge(%{
  grey_fuel_used: grey_fuel_used,
  green_fuel_price_foe: green_fuel_price_foe,
  vlsfo_price: _vlsfo_price
}) do
  Decimal.mult(grey_fuel_used, green_fuel_price_foe)
end

def calculate_surcharge(%{
  wtw_savings: wtw_savings,
  abatement_cost: abatement_cost
}) do
  Decimal.mult(wtw_savings, abatement_cost)
end
```

Η πρώτη φόρμουλα είναι η απλούστερη και χρησιμοποιείται όταν η Maersk έχει συγκριμένο ζευγάρι ποσότητας καυσίμου και τιμής πράσινου καυσίμου: η χρέωση είναι απλώς

το γινόμενο των δύο. Όπως φαίνεται στα σχόλια του κώδικα, αυτή η φόρμουλα προέκυψε από αλγεβρική απλοποίηση μιας αρχικής έκφρασης που περιείχε την τιμή VLSFO ως όρο αναφοράς — οι όροι `+vlsfo_price` και `-vlsfo_price` αλληλοαναιρούνται, αφήνοντας μόνο το γινόμενο `grey_fuel_used × green_fuel_price_foe`. Η δεύτερη φόρμουλα χρησιμοποιείται όταν η σύμβαση με τον πελάτη βασίζεται απευθείας σε τόνους εξοικονόμησης CO₂e που πιστώνονται.

Η ύπαρξη δύο εναλλακτικών μεθόδων αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα ότι διαφορετικοί πελάτες θέλουν να ποσοτικοποιούν την αγορά τους με διαφορετικό τρόπο: άλλοι σε όρους ενέργειας/καυσίμου, άλλοι σε όρους περιβαλλοντικού οφέλους. Η πλατφόρμα παρέχει αμφότερες τις γωνίες θέασης χωρίς να εξαναγκάζει μία καθολική επιλογή.

Το σύνολο των τμημάτων του πυλώνα — προϊόντα ECOv1/v2, λογιστική Energy Bank, αλυσίδα POS/ISCC, αυτοματοποιημένη έκδοση πιστοποιητικών και εμπορική τιμολόγηση μέσω επιβαρύνσεων (surcharges) — συνθέτει μια ενιαία διαδικασία που μετατρέπει τη φυσική αγορά πράσινου καυσίμου σε αποδείξιμο εμπορικό προϊόν. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρίτος πυλώνας του ET Platform, η βελτιστοποίηση ανεφοδιασμού (Bunker Optimization), που λειτουργεί ως οικονομικός μηχανισμός υποστήριξης τόσο της παραδοσιακής όσο και της μελλοντικής ροής πράσινων καυσίμων.

Κεφάλαιο 7 — Πυλώνας Γ: Bunker Optimization (Energy Markets)

7.1 Το πρόβλημα ανεφοδιασμού

Ο ανεφοδιασμός καυσίμου (*bunkering*) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες κόστους στην εμπορική ναυτιλία. Για έναν στόλο της κλίμακας της Maersk, με εκατοντάδες πλοία να εκτελούν περιστροφικά δρομολόγια (*vessel rotations*) σε δεκάδες λιμάνια ανά τον κόσμο, οι αποφάσεις που αφορούν στο ποσό καυσίμου που θα φορτωθεί σε κάθε λιμάνι συνιστούν πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλές μεταβλητές και αυστηρούς περιορισμούς.

Τα βασικά στοιχεία της πολυπλοκότητας είναι τα ακόλουθα. Πρώτον, η τιμή καυσίμου διαφέρει σημαντικά μεταξύ λιμανιών και κυμαίνεται στον χρόνο: ένας χειριστής (*operator*) μπορεί να επιλέξει να φορτώσει περισσότερο καύσιμο σε ένα φθηνό λιμάνι και λιγότερο σε ένα ακριβό, εφόσον το πλοίο έχει επαρκή αποθηκευτική ικανότητα. Δεύτερον, κάθε λιμάνι έχει περιορισμένο διαθέσιμο χρόνο παραμονής (*port call duration*) και ενδέχεται να μην διαθέτει πάντα το ζητούμενο είδος καυσίμου. Τρίτον, οι κανονισμοί περί θείου (MARPOL Annex VI, SECA zones) επιβάλλουν τη χρήση χαμηλόθειων καυσίμων σε συγκεκριμένες περιοχές, προσθέτοντας επιπλέον τύπους καυσίμου στο πρόβλημα: HSFO (*High Sulfur Fuel Oil*), VLSFO (*Very Low Sulfur Fuel Oil*), LSDIS (*Low Sulfur Distillate*), ULSFO (*Ultra Low Sulfur Fuel Oil*), μεθανόλη. Τέταρτον, το EU ETS Maritime (βλ. Κεφ. 2.4), που ισχύει από το 2024, προσθέτει ένα επιπλέον κόστος άνθρακα ανά τόνο εκπομπών στο αντικειμενικό άθροισμα κόστους της βελτιστοποίησης.

Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού δαπανώμενου ποσού για καύσιμα κατά τη διάρκεια ενός ορίζοντα σχεδιασμού (*planning horizon*), που συνήθως αντιστοιχεί σε έναν πλήρη κύκλο δρομολογίων (*voyage rotation*). Η επίλυση αυτού του προβλήματος απαιτεί γραμμικό προγραμματισμό (*linear programming*) με δεκάδες μεταβλητές απόφασης, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση εξειδικευμένου επιλυτή (*solver*).

Σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα, η αρχιτεκτονική του Bunker Optimization πυλώνα προβλέπεται να επεκταθεί ώστε να ενσωματώσει στο αντικειμενικό άθροισμα τόσο το κόστος άνθρακα του EU ETS όσο και τη δυνατότητα επιλογής πράσινου καυσίμου σε συγκεκριμένα λιμάνια, σε άμεση σύνδεση με την Energy Bank (βλ. Κεφ. 6.3).

7.2 Σύστημα Βελτιστοποίησης Σχεδίου Ανεφοδιασμού — BOPS

Το σύστημα που υλοποιεί τον πυλώνα ανεφοδιασμού ονομάζεται BOPS (*Bunker Optimization Planning System*). Αποτελεί αναδημιουργία ενός υπάρχοντος συστήματος της Maersk Energy Markets, με στόχο τη σύγχρονη αρχιτεκτονική, τη συντηρησιμότητα και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης με τα υπόλοιπα συστατικά της βάση κώδικα (βλ. Κεφ. 9.3).

Το BOPS οργανώνεται σε τρία διακριτά επίπεδα:

Επίπεδο 1 — API (bunker/api/): Πρόκειται για τον συντονιστή (*coordinator*) της βελτιστοποίησης. Διαχειρίζεται την ουρά εργασιών, επικοινωνεί με τον C++ επιλυτή μέσω Erlang Ports και επιστρέφει τα αποτελέσματα.

Επίπεδο 2 — BoW (Bunker on Water Workbench) (bunker/bow/): Η διαδικτυακή εφαρμογή που χρησιμοποιούν οι χειριστές για να παρακολουθούν και να τροποποιούν τα πλάνα ανεφοδιασμού.

Επίπεδο 3 — MBC (*Multi-Bundle Connector*): Ο C++ γραμμικός επιλυτής που εκτελεί τους πραγματικούς βελτιστοποιητικούς υπολογισμούς. Εκτελείται ως ξεχωριστή διεργασία του λειτουργικού συστήματος και επικοινωνεί με τον BEAM μέσω Port.

Η συνολική ροή δεδομένων ακολουθεί την παρακάτω πορεία:

```
Shiptech → API → BoW UI → Operator edits → API →
MBC Solver → Results → BoW → Shiptech writeback
```

Αρχικά, τα δεδομένα πλοίου και δρομολογίου αντλούνται από το Shiptech (το παλαιού τύπου [legacy] σύστημα σχεδιασμού ναυτιλιακών δρομολογίων). Ο χειριστής εισάγει στο BoW τυχόν αλλαγές (π.χ. διορθώσεις στις τιμές καυσίμου ανά λιμάνι ή τροποποίηση διαθεσιμότητας). Το API συγκεντρώνει τα δεδομένα, δρομολογεί το αίτημα στον επιλυτή MBC, λαμβάνει τα αποτελέσματα και τα επιστρέφει στο Shiptech για εγγραφή (*writeback*), ενώ ταυτόχρονα τα εμφανίζει στο BoW για επισκόπηση.

Η αρχιτεκτονική αυτή διαφέρει σημαντικά από εκείνη του `emissions_workbench`, που έχει κυρίως αναλυτικό χαρακτήρα. Το BOPS είναι κατά βάση συναλλακτικό (*transactional*): κάθε εκτέλεση επιλυτή αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο πλοίο και ένα συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο, και τα αποτελέσματα πρέπει να εγγραφούν αμέσως στο Shiptech.

7.3 Πάγκος Ανεφοδιασμού εν πλω — BoW

Το BoW (*Bunker on Water Workbench*) αποτελεί την πύλη αλληλεπίδρασης των χειριστών με τη λειτουργία ανεφοδιασμού. Είναι μια Phoenix LiveView εφαρμογή που εκτελείται σε ξεχωριστή υπηρεσία Elixir (bunker/bow) και επικοινωνεί με το BOPS API μέσω HTTP

για να εκκινεί εκτελέσεις πλάνου (plan runs), να ανακτά αποτελέσματα και να αποστέλλει διορθωτικές εισόδους χειριστή.

Τα κεντρικά σχήματα δεδομένων (*schemas*) που διαχειρίζεται το BoW περιλαμβάνουν: **vessels** (πλοία με IMO number, κωδικό GSIS, τύπο καυσίμου), **bunker_plans** (σχέδια ανεφοδιασμού ανά πλοίο), **port_calls** (κλήσεις λιμανιών με ETA/ETD), **schedules** (δρομολόγια), και **remaining_fuel_on_board** (τελευταία μέτρηση καυσίμου ανά τύπο).

Η ροή εργασίας ενός χειριστή (*operator workflow*) ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. **Επισκόπηση τρέχοντος πλάνου (plan):** Ο χειριστής βλέπει για κάθε πλοίο τον πλήρη κατάλογο λιμανιών επίσκεψης με τις προτεινόμενες ποσότητες ανεφοδιασμού ανά τύπο καυσίμου (HSFO, VLSFO, LSDIS, ULSFO) και τις αντίστοιχες τιμές αγοράς.
2. **Επεξεργασία εισόδων:** Ο χειριστής μπορεί να τροποποιήσει τιμές καυσίμου ανά λιμάνι, να προσαρμόσει περιορισμούς διαθεσιμότητας ή να επισημάνει ένα λιμάνι ως μη-ανεφοδιαζόμενο (*non-bunkerable*). Αυτές οι τροποποιήσεις αποθηκεύονται στο σχήμα `fpms_bp_operator_port_inputs` και αποστέλλονται στο Shiptech μέσω της αποθηκευμένης διαδικασίας `sp_UpdateBunkerPlanOperatorInputs`.
3. **Εκκίνηση εκτέλεσης πλάνου (plan run):** Ο χειριστής ενεργοποιεί χειροκίνητα ή το σύστημα αυτόματα ενεργοποιεί νέα εκτέλεση του επιλυτή. Η ουρά διαχειρίζεται ασύγχρονα (βλ. Κεφ. 7.6).
4. **Σύγκριση αποτελεσμάτων:** Αφού ολοκληρωθεί η εκτέλεση πλάνου, ο χειριστής βλέπει τα νέα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα προηγούμενα. Το BoW υποστηρίζει πρόσβαση σε ιστορικά πλάνα για ελεγχιμότητα.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του BoW είναι η ενσωμάτωση δεδομένων *Remaining Fuel on Board* (RoB) που λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο από το STAR Connect μέσω Kafka (βλ. Κεφ. 5.4). Αυτά τα δεδομένα εμφανίζονται στη σελίδα τρέχοντος πλάνου ανεφοδιασμού, παρέχοντας στον χειριστή την πλέον πρόσφατη εικόνα των αποθεμάτων καυσίμου του πλοίου και αποτελούν είσοδο για τον υπολογισμό των ποσοτήτων ανεφοδιασμού στην επόμενη εκτέλεση πλάνου (plan run).

7.4 Ο επιλυτής C++ μέσω Erlang Ports

7.4.1 Αρχιτεκτονική σύνδεσης με εξωτερικό επιλυτή

Η επιλογή του MBC (*Multi-Bundle Connector*) ως εξωτερικό C++ εκτελέσιμο για τη βελτιστοποίηση οφείλεται σε δύο συμπληρωματικούς λόγους. Πρώτον, οι αλγόριθμοι γραμμικού προγραμματισμού απαιτούν ώριμες βιβλιοθήκες σε χαμηλού επιπέδου γλώσσα, με C++ να αποτελεί εκ των πραγμάτων (*de facto*) επιλογή σε παραγωγικά περιβάλλοντα επιλυτών.

Δεύτερον, ο MBC προϋπήρχε ήδη ως αποδεδειγμένο σύστημα στη Maersk και η επαναχρησιμοποίησή του μέσω του BOPS API εξοικονόμησε σημαντικό αναπτυξιακό κόστος.

Η ενσωμάτωση του C++ εκτελεσίμου στον BEAM γίνεται μέσω **Erlang Ports**, και όχι μέσω NIFs (*Native Implemented Functions*). Η διαφορά είναι κρίσιμης σημασίας από αρχιτεκτονικής άποψης: τα NIFs εκτελούνται μέσα στον χώρο διευθύνσεων (*address space*) της BEAM VM, οπότε ένα σφάλμα κατάτμησης (*segmentation fault*) ή ένας ατέρμων βρόχος σε εγγενή (native) κώδικα καταρρίπτει ολόκληρο τον κόμβο (node). Αντίθετα, τα Ports εκκινούν τον C++ κώδικα ως ξεχωριστή διεργασία του λειτουργικού συστήματος· εάν αυτή αποτύχει ή εξέλθει με σφάλμα, η BEAM VM παραμένει άθικτη και το δέντρο επιτήρησης (*supervision tree*) μπορεί να ανταποκριθεί κανονικά (βλ. Κεφ. 8.1 για αναλυτικότερη επεξήγηση των Erlang Ports).

Η επικοινωνία γίνεται μέσω stdio σε δυαδική μορφή (*binary protocol*): το Port στέλνει τα δεδομένα εισόδου στο `stdin` του MBC και λαμβάνει τα αποτελέσματα από το `stdout` γραμμή προς γραμμή. Αυτή η σχεδίαση επιτρέπει στον BEAM GenServer να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο τα μηνύματα καταγραφής (*log*) του επιλυτή κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης.

7.4.2 Υλοποίηση: BopsApi.Server

Ο `BopsApi.Server` είναι ο GenServer που επιτηρεί μία εκτέλεση του επιλυτή MBC. Εκκινείται από τον `BopsApi.ServerSupervisor` με στρατηγική `:one_for_all`, που σημαίνει ότι εάν ο Server ή ο Jobs Scheduler αποτύχει, και οι δύο επανεκκινούνται μαζί — διατηρώντας έτσι τη συνοχή κατάστασης.

```
defmodule BopsApi.Server do
  use GenServer

  alias BopsApi.Response
  alias OpenTelemetry.Tracer

  require Tracer

  defmodule State do
    defstruct [
      :cmd,
      :current_mbc_trace_ctx,
      :log_batch_size,
      :request,
      :traceparent,
      logs: []
    ]
  end

  def new(opts) do
    struct!(__MODULE__, opts)
  end
end
```

```

end

def start_link(opts) do
  GenServer.start_link(__MODULE__, opts, Keyword.take(opts, [:name]))
end

@impl GenServer
def init(opts) do
  state =
    State.new(
      cmd: Keyword.fetch!(opts, :cmd),
      log_batch_size: Keyword.get(opts, :log_batch_size, 50)
    )

  {:ok, state}
end

@impl GenServer
def handle_cast(:find_work, state) do
  {:noreply, find_work(state)}
end

@impl GenServer
def handle_continue(:find_work, state) do
  {:noreply, find_work(state)}
end

```

Λήμμα 7.4.1: BopsApi.Server — δομή κατάστασης και αρχικοποίηση GenServer

Στη δομή *State* αποθηκεύεται η εντολή εκτέλεσης του MBC (*cmd*), η αίτηση που επεξεργάζεται (*request*), το *traceparent* για κατανεμημένη ιχνηλάτηση (*distributed tracing*) με *OpenTelemetry*, και μια προσωρινή μνήμη (*buffer*) (*logs*) για τα μηνύματα εξόδου του επιλυτή.

Μόλις ο *Server* λάβει μια εργασία (*job*) από την ουρά, εκκινεί τον επιλυτή ως *Port*:

```

port = Port.open({:spawn_executable, path}, [
  :binary,
  :exit_status,
  args: [request.plan_id]
])

```

Εν συνεχεία, τα μηνύματα εξόδου του επιλυτή φτάνουν ως *handle_info* (*{_port, {data, output}}*, *state*) και αποθηκεύονται προσωρινά στο *state.logs*. Όταν η διεργασία ολοκληρωθεί επιτυχώς (*{:exit_status, 0}*), ο *Server* ανακτά τα αποτελέσματα από τη βάση δεδομένων του MBC μέσω του *BopsApi.Mbc.result/1* και τα αποστέλλει στο *BoW* μέσω *Response.done/1*. Σε περίπτωση σφάλματος (*{:exit_status, N}* με $N \neq$

0), καταγράφεται το `mbc_crash` και το σφάλμα γνωστοποιείται στο BoW μέσω `Response.error/1`.

Αξίας σημείωσης είναι επίσης ο ενσωματωμένος μηχανισμός κατανεμημένης ιχνηλάτησης (*distributed tracing*): ο Server αναλύει τις γραμμές εξόδου του επιλυτή αναζητώντας ειδικά προθέματα (prefixes) (`Trace start:`, `Trace attribute:`, `Trace end:`), τα οποία μετατρέπει σε διαστήματα (spans) OpenTelemetry. Έτσι το ίχνος (trace) της από άκρο σε άκρο (end-to-end) εκτέλεσης πλάνου εκτείνεται από τον BEAM ως μέσα στα εσωτερικά (internals) του C++ επιλυτή, παρέχοντας πλήρη ορατότητα στο σύστημα παρακολούθησης.

7.5 Ενσωμάτωση με το Shiptech

7.5.1 Αρχιτεκτονική ανταλλαγής δεδομένων

Το Shiptech είναι το παλαιού τύπου (legacy) σύστημα σχεδιασμού ναυτιλιακών δρομολογίων και ανεφοδιασμού της Maersk, χτισμένο πάνω σε SQL Server. Περιέχει τα ιστορικά δεδομένα πλοίων, δρομολογίων και πλάνων ανεφοδιασμού και αποτελεί το σύστημα αρχείου (*system of record*) για την πλευρά των χειριστών. Το BOPS λειτουργεί ως επικάλυψη (overlay): διαβάζει από το Shiptech, επεξεργάζεται δεδομένα μέσω του επιλυτή MBC και εγγράφει πίσω τα αποτελέσματα.

Η ανάγνωση δεδομένων από το Shiptech γίνεται μέσω ODBC (*Open Database Connectivity*) με χρήση του προσαρμογέα (adapter) ODBC της Erlang. Ο Shiptech.Repo διαχειρίζεται τη σύνδεση και εκτελεί ερωτήματα σε πίνακες του Shiptech, ανακτώντας στοιχεία όπως: `VesselVoyagedetailId` (μοναδικό αναγνωριστικό ταξιδιού), `VesselId`, χρονοδιαγράμματα λιμανιών (ETA/ETD), ποσότητες καυσίμου και τιμές αγοράς.

Η εγγραφή αποτελεσμάτων επιστρέφει επίσης στο Shiptech μέσω αποθηκευμένων διαδικασιών (*stored procedures*). Η βασικότερη είναι η `sp_CreateModelRunDataWithString`, η οποία δέχεται ολόκληρο το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης σε μορφή JSON και το αποθηκεύει σε πολλαπλούς πίνακες ατομικά (*atomically*), εντός μίας συναλλαγής (transaction) του SQL Server. Ομοίως, η `sp_UpdateBunkerPlanOperatorInputs` αντιγράφει στο Shiptech τυχόν διορθώσεις που εισήγαγε ο χειριστής μέσω του BoW.

Η χρήση αποθηκευμένων διαδικασιών αντί για άμεσα INSERT/UPDATE ερωτήματα είναι σκόπιμη: το Shiptech διαθέτει σύνθετη σχεσιακή δομή με επιχειρησιακούς κανόνες (*business rules*) ενσωματωμένους στη βάση, και οι stored procedures ενθυλακώνουν αυτή την πολυπλοκότητα εξασφαλίζοντας συνέπεια δεδομένων ανεξαρτήτως του καλούντος (caller).

7.5.2 Ορισμός υποδομής με Terraform

Το BOPS API χρησιμοποιεί ξεχωριστή PostgreSQL βάση δεδομένων για τον MBC επιλυτή (η οποία διαφέρει από τη βάση του BoW). Η βάση αυτή αποθηκεύει προσωρινά τα δεδομένα εισόδου πριν την εκτέλεση του επιλυτή και τα αποτελέσματα αμέσως μετά, μέχρι

να γραφούν στο Shiptech. Ο ορισμός της υποδομής γίνεται ως κώδικας με Terraform (βλ. Κεφ. 8.7 για Azure):

```
resource "azurerm_postgresql_flexible_server" "bops-blue" {
  name                        = "bops-staging-blue"
  resource_group_name        = data.azure_resource_group.nrg.name
  version                    = var.postgres_version

  administrator_login        = var.postgres_admin_username
  administrator_password     = var.postgres_admin_password
  public_network_access_enabled = false
  auto_grow_enabled          = true

  tags = {
    "app"      = "bops"
    "env"      = "staging"
    "k8s_cluster" = "k8s_cluster"
    "mop_ingest" = "true"
  }
}

resource "azurerm_postgresql_flexible_server_database" "bops-blue" {
  name      = "bops"
  server_id = azurerm_postgresql_flexible_server.bops-blue.id
}

resource "azurerm_postgresql_flexible_server_database" "solver-blue" {
  name      = "solver"
  server_id = azurerm_postgresql_flexible_server.bops-blue.id
}

resource "azurerm_postgresql_flexible_server_configuration"
↳ "shared_preload_libraries" {
  name      = "shared_preload_libraries"
  server_id = azurerm_postgresql_flexible_server.bops-blue.id
  value     = "pg_cron,pg_stat_statements"
}
```

Λήμμα 7.5.1: Terraform ορισμός PostgreSQL Flexible Server για το BOPS staging περιβάλλον

Αξιοσημείωτα στοιχεία αυτής της δήλωσης: η δημόσια πρόσβαση είναι απενεργοποιημένη (`public_network_access_enabled = false`), και δημιουργούνται δύο ξεχωριστές βάσεις: `bops` (για τα δεδομένα εισόδου/εξόδου του BoW) και `solver` (αποκλειστικά για τα ενδιάμεσα δεδομένα του MBC). Η επέκταση (extension) `pg_cron` φορτώνεται ως βιβλιοθήκη προφόρτωσης (preload library) για χρονοδρομολογημένες εργασίες, ενώ το `pg_stat_statements` επιτρέπει την παρακολούθηση επιδόσεων ερωτημάτων.

7.6 Χρονοπρογραμματισμός εκτελέσεων πλάνου (Plan Run)

Οι εκτελέσεις του επιλυτή (*plan runs*) δεν εκκινούνται αποκλειστικά χειροκίνητα από τον χειριστή· υπάρχει και αυτόματος χρονοπρογραμματισμός που εξασφαλίζει την περιοδική ανανέωση των πλάνων ανεφοδιασμού, ώστε να αντικατοπτρίζουν πάντα τα πιο πρόσφατα δεδομένα τιμών καυσίμου, διαθεσιμότητας και τηλεμετρίας. Η υλοποίηση γίνεται μέσω του `Bops.Vessels.PlanRunEnqueuer`, ενός `GenServer` που λειτουργεί ως αυτο-χρονοπρογραμματιζόμενος προγραμματιστής εργασιών.

```
@impl GenServer
def init(opts) do
  interval_ms = Keyword.get(opts, :interval_ms, :timer.hours(1))
  schedule_on_boot = Keyword.get(opts, :schedule_on_boot, true)

  if schedule_on_boot do
    send(self(), :schedule)
  end

  {:ok, %{interval_ms: interval_ms}}
end

@impl GenServer
def handle_info(:schedule, %{interval_ms: interval} = state) do
  Bops.Vessels.find_migrated()
  |> Bops.Vessels.schedule_plan_run_for_migrated_vessels()

  :telemetry.execute([:bops, :vessels, :plan_run_enqueuer], %{status:
    ↪ :scheduled}, %{})
  Process.send_after(self(), :schedule, interval)
  {:noreply, state}
end
```

(Πηγή: `bunker/bow/lib/bops/vessels/plan_run_enqueuer.ex`, αποσπάσματα)

Το μοτίβο είναι απλό αλλά αξιόπιστο: κατά την εκκίνηση (`init/1`) ο `GenServer` αυτο-στέλνει ένα μήνυμα `:schedule` αν η παράμετρος `schedule_on_boot` είναι αληθής (η προεπιλογή), εξασφαλίζοντας ότι τουλάχιστον μία εκτέλεση συντελείται χωρίς εξωτερική παρέμβαση. Το `handle_info(:schedule, ...)` εντοπίζει τα μεταναστευμένα πλοία (*find_migrated*) — δηλαδή εκείνα για τα οποία το BOPS είναι ενεργό σύστημα σχεδιασμού — και τα δρομολογεί για εκτέλεση πλάνου. Στη συνέχεια εκπέμπει ένα συμβάν τηλεμετρίας (*telemetry event*) για παρατηρησιμότητα (Κεφ. 8.13) και επανα-προγραμματίζει τον εαυτό του μέσω `Process.send_after/3` με προεπιλεγμένο διάστημα μίας ώρας.

Η ίδια η εκτέλεση ενός plan run — δηλαδή η μετάβαση από «έχω μια λίστα πλοίων» σε «τρέχει ο επιλυτής» — δεν συμβαίνει συγχρονικά μέσα στον enqueuer. Αντίθετα, χρησιμοποιείται ασύγχρονος χρονοπρογραμματισμός εργασιών (asynchronous task scheduling), ώστε ο GenServer να μη μπλοκάρει αν ο επιλυτής καθυστερήσει. Πιθανές αποτυχίες εκτέλεσης δεν επηρεάζουν τον επόμενο γύρο: ο enqueuer θα προσπαθήσει ξανά στο επόμενο διάστημα, και οι μεμονωμένες εκτελέσεις πλάνου έχουν δική τους επανάληψη (retry) και διαχείριση σφαλμάτων στο επίπεδο του API (Κεφ. 7.4).

Για ιστορικό παρακολούθησης, οι εκτελέσεις καταγράφονται στον πίνακα plan_runs με χρονοσφραγίδα (timestamp) inserted_at· η last_run_at/0 δίνει τη χρονική σφραγίδα της τελευταίας εκτέλεσης, χρήσιμη για πίνακες παρατηρησιμότητας (observability dashboards) αλλά και για χειροκίνητη απόφαση εάν χρειάζεται έκτακτη επανεκτέλεση. Ο χειριστής, εφόσον απαιτηθεί (π.χ. μετά από διόρθωση τιμών), μπορεί να εκκινήσει χειροκίνητα εκτέλεση πλάνου μέσω του BoW UI, χωρίς να περιμένει τον επόμενο αυτόματο γύρο.

7.7 Σύνδεση με EU ETS και πράσινα καύσιμα

Η ανάπτυξη του πυλώνα Bunker Optimization δεν περιορίζεται στη μείωση κόστους καυσίμου με τους όρους που είχε νόημα πριν την κανονιστική επέκταση: η εισαγωγή του EU ETS Maritime από την 1η Ιανουαρίου 2024 (Κεφ. 2.4) μετέβαλε ριζικά το οικονομικό υπόβαθρο του προβλήματος, καθώς η εκπομπή κάθε τόνου CO₂ συνεπάγεται πλέον αγορά αντίστοιχων δικαιωμάτων στην ευρωπαϊκή αγορά άνθρακα.

Στην τρέχουσα φάση, το BOPS παρέχει το θεμέλιο πάνω στο οποίο μπορεί να χτιστεί η πλήρης ενσωμάτωση κόστους άνθρακα: γνωρίζει με ακρίβεια ποια καύσιμα φορτώνονται σε ποια λιμάνια, σε ποιες ποσότητες και τιμές. Από αυτά τα δεδομένα, σε συνδυασμό με τους συντελεστές εκπομπών του Ocean Emissions πυλώνα (Κεφ. 5.5) και τα δεδομένα EU ETS surcharges (Κεφ. 5.6), προκύπτουν αξιόπιστες εκτιμήσεις κόστους άνθρακα ανά πλοίο. Στη μεσοπρόθεσμη επέκταση, ο επιλυτής MBC θα ενσωματώσει αυτό το κόστος ως πρόσθετο όρο στη συνάρτηση κόστους που ελαχιστοποιεί, μετατρέποντας τη βελτιστοποίηση από καθαρά οικονομική (κόστος καυσίμου) σε βελτιστοποίηση με επίγνωση άνθρακα (carbon-aware): σε ορισμένες περιπτώσεις θα είναι προτιμότερη η φόρτωση ακριβότερου αλλά λιγότερο ρυπογόνου καυσίμου, αν αυτό μειώνει το συνολικό κόστος συμπεριλαμβανομένου του κόστους άνθρακα.

Ένα δεύτερο κανάλι σύνδεσης αφορά τα πράσινα καύσιμα (Κεφ. 6). Σήμερα, η αγορά πράσινου καυσίμου από την Maersk καταγράφεται ως κατάθεση στην Energy Bank (Κεφ. 6.3), ο δε ανεφοδιασμός των πλοίων προγραμματίζεται ανεξάρτητα από το BOPS. Η μελλοντική σύνδεση αφορά την αυτόματη επιλογή λιμανιών με διαθεσιμότητα πράσινου καυσίμου από τον επιλυτή, ώστε ένα πλοίο να μπορεί να φορτωθεί φυσικά πράσινο καύσιμο όταν αυτό είναι διαθέσιμο και οικονομικά ωφέλιμο. Αυτό θα μειώσει την εξάρτηση από τη λογιστική book-and-claim για συγκεκριμένα δρομολόγια, αν και η μέθοδος του ισοζυγίου μάζας θα παραμείνει απαραίτητη για τη συνολική κάλυψη της ζήτησης ECO προϊόντων.

Σε πιο μακροπρόθεσμο ορίζοντα, η Maersk σχεδιάζει την προ-δέσμευση (*pre-allocation*) ποσοτήτων από την Energy Bank για συγκεκριμένα πλάνα ανεφοδιασμού, συνδέοντας έτσι τη φυσική ροή καυσίμου με τις εμπορικές υποχρεώσεις πελατών ECO. Αυτή η ολοκληρωμένη οπτική μετατρέπει το BOPS από εργαλείο μείωσης κόστους σε στρατηγικό σύστημα που αξιολογεί κάθε απόφαση ανεφοδιασμού στο πλήρες πλαίσιο εκπομπών, κανονιστικού πλαισίου και εμπορικής υπόσχεσης προς τους πελάτες — μετουσιώνοντας έτσι, στην πράξη, την επίσημη αποστολή του πυλώνα: «βελτιστοποίηση εφοδιασμού καυσίμων ως θεμέλιο για την προμήθεια πράσινων καυσίμων σε περιβάλλον εμπορίας ρύπων».

Κεφάλαιο 8 — Τεχνολογίες

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζουμε αναλυτικά την τεχνολογική στοίβα (*technology stack*) που επιλέχθηκε για την υλοποίηση του Πάγκου Εργασίας Εκπομπών. Κάθε τεχνολογία εξετάζεται ως προς τα εξής τέσσερα ερωτήματα: τι είναι, γιατί επιλέχθηκε για τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του συστήματος, πώς χρησιμοποιείται στην πράξη και ποιες εναλλακτικές απορρίφθηκαν όπου αυτό είναι κατατοπιστικό. Η επισκόπηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιμέρους τεχνολογιών, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτές συνθέτουν μια ενιαία αρχιτεκτονική, αναπτύσσεται στο Κεφ. 9.

8.1 BEAM, Erlang και Elixir

Η κεντρική τεχνολογική επιλογή του συστήματος είναι η εικονική μηχανή (*virtual machine*) **BEAM** και η γλώσσα **Elixir** που εκτελείται πάνω σ' αυτήν. Η BEAM αναπτύχθηκε αρχικά από μηχανικούς της Ericsson τη δεκαετία του 1980 για την εκτέλεση της γλώσσας Erlang σε συστήματα τηλεπικοινωνίας που απαιτούσαν υψηλή διαθεσιμότητα και ανοχή σε σφάλματα. Η Elixir, που δημιουργήθηκε το 2011 από τον José Valim, φέρνει σύγχρονο συντακτικό και το οικοσύστημα του Phoenix Framework πάνω στην ίδια VM.

Η BEAM υλοποιεί έναν **προεκχωρητικό χρονοπρογραμματιστή** (*preemptive scheduler*) με τόσα νήματα λειτουργικού συστήματος (*OS threads*) όσοι και οι πυρήνες του επεξεργαστή. Πάνω σε αυτά ο χρονοπρογραμματιστής εκτελεί εκατοντάδες χιλιάδες **BEAM processes** — ελαφριές εικονικές διεργασίες με ιδιωτική μνήμη και ουρά μηνυμάτων. Επικοινωνία μεταξύ τους γίνεται αποκλειστικά μέσω **ασύγχρονων μηνυμάτων** (*message passing*), χωρίς κοινόχρηστη μνήμη (*shared state*). Το αποτέλεσμα είναι ότι η αποτυχία μιας διεργασίας δεν μολύνει τις υπόλοιπες — η φιλοσοφία «*let it crash*» της OTP επιτρέπει σε *supervisor* διεργασίες να επανεκκινούν αυτόματα οποιαδήποτε παιδική διεργασία αποτύχει.

Σε σύγκριση με εναλλακτικές: η **JVM** υποστηρίζει πολλές γλώσσες αλλά με βαριά OS threads ως μονάδα παραλληλίας· η **Go** προσφέρει goroutines αλλά με κοινόχρηστη μνήμη που απαιτεί συγχρονισμό· το **Node.js** είναι μονονηματικό και εξαρτάται από επανακλήσεις (callbacks) για ασύγχρονη εκτέλεση. Η BEAM αντιμετωπίζει φυσιολογικά σενάρια όπου χιλιάδες WebSocket συνδέσεις ή εισερχόμενα συμβάντα Kafka χρειάζονται ταυτόχρονη επεξεργασία — ακριβώς η κατάσταση στον Πάγκο Εργασίας Εκπομπών.

Επιπλέον, η BEAM υποστηρίζει **Erlang Ports**: μηχανισμό επικοινωνίας με εξωτερικές εγγενείς (native) διεργασίες μέσω stdio, χωρίς να μοιράζονται τον ίδιο χώρο διευσθύνσεων.

Αυτό χρησιμοποιείται στον BOPS για την επικοινωνία με τον C++ επιλυτή (βλ. Κεφ. 7.4).

Η Elixir ως **συναρτησιακή** (*functional*) γλώσσα ενθαρρύνει φυσικά διοχετεύσεις (pipelines) μετασχηματισμού δεδομένων με αμετάβλητες δομές (*immutable data structures*). Μόνο στα άκρα της διοχέτευσης — εισαγωγή δεδομένων και αποθήκευση — υπάρχουν παρενέργειες (*side effects*), γεγονός που περιορίζει σημαντικά τα σημεία αστοχίας.

Λήμμα 8.1.1 — Διοχέτευση (Pipeline) μετασχηματισμού αρχείου εισόδου:

```
def from_raw(%Ingest.RawOceanContainerMove{record: record}, to: :shipment_attrs)
  ↪ do
    with operator when not is_nil(operator) <- record["shipment_operator"],
         product when product != :unrecognized_product <-
           dremio_product_to_product(record["shipment_product"]) do
      {:ok,
       %{
         external_id: record["shipment_no"],
         operator: operator |> String.downcase(),
         status: shipment_status(record["shipment_status"]),
         product: product
       }}
    else
      nil ->
        {:error, :missing_shipment_operator}

      :unrecognized_product ->
        {:error, :unrecognized_product}
    end
  end
end
```

Το λήμμα αποτυπώνει χαρακτηριστικά στοιχεία της Elixir: η έκφραση `with` αποσυνθέτει σειριακά τον μετασχηματισμό, κάθε βήμα επιστρέφει είτε την τιμή είτε αιτιολογημένο σφάλμα, και ο κλάδος `else` χειρίζεται κάθε πιθανή αποτυχία ρητά. Το αποτέλεσμα είναι κώδικας ευανάγνωστος, χωρίς εξαιρέσεις (*exceptions*) που «ξεφεύγουν» ανεξέλεγκτα.

8.2 Phoenix Framework και LiveView

Το **Phoenix Framework** είναι το web framework της Elixir, με φιλοσοφία παρόμοια με το Ruby on Rails: επίκεντρο η παραγωγικότητα, σαφής διαχωρισμός ευθυνών (Router → Controller/LiveView → Template) και πλούσια εργαλεία γραμμής εντολών (*generators*). Στηρίζεται στη βιβλιοθήκη **Plug** για σύνθεση ενδιάμεσου λογισμικού (*middleware*), ενώ όλη η διαχείριση αιτημάτων HTTP γίνεται εντός BEAM processes.

Η κύρια καινοτομία που χρησιμοποιείται εκτεταμένα στο σύστημα είναι το **Phoenix LiveView**: αντί να αποστέλλεται στατικό HTML ή να επικοινωνεί το προσκήνιο (frontend) με REST/GraphQL API, η κατάσταση (*state*) της σελίδας διαχειρίζεται σε ένα BEAM process ανά σύνδεση. Οι αλλαγές αποστέλλονται στον φυλλομετρητή (browser) μέσω μόνιμης

σύνδεσης **WebSocket** ως διαφορά (*diff*) του DOM. Το αποτέλεσμα είναι εμπειρία χρήστη αντίστοιχη *Single-Page Application* (SPA) χωρίς ξεχωριστή βάση κώδικα JavaScript — ένα ενιαίο άρθρωμα Elixir ελέγχει τόσο την επιχειρησιακή λογική όσο και την παρουσίαση. Στη βάση κώδικα υπάρχουν 14+ αρθρώματα LiveView καταναμημένα σε τέσσερις χώρους ονομάτων (namespaces): Eco Delivery, Energy Bank, Emissions Data Inventory και Admin.

Η σύγκριση με SPA frameworks (React, Vue): η προσέγγιση με LiveView μειώνει τον κώδικα που συντηρεί η ομάδα και εξαλείφει το «impedance mismatch» μεταξύ τύπων παρασκήνιου (backend) και προσκήνιου (frontend). Το μειονέκτημα είναι η απαίτηση μόνιμης WebSocket σύνδεσης, άρα αυξημένη εξάρτηση από τη διαθεσιμότητα του διακομιστή.

Λήμμα 8.2.1 — `mount/3` και `handle_event/3` από `OceanSimulatorLive`:

```
@impl Phoenix.LiveView
def mount(_params, _session, socket) do
  filter_options = Nrg.Ocean.Factors.list_filter_options()
  latest_year = List.last(filter_options.years)

  assigns = %{
    page_id: "ocean-simulator",
    form: %SimulationInput{date: to_string(latest_year)},
    result: nil,
    filter_options: filter_options,
    selected_year: latest_year,
    products: Nrg.Products.simulatable()
  }

  {:ok, assign(socket, assigns)}
end

@impl Phoenix.LiveView
def handle_event(
  "submit_form",
  %{
    "container_size" => container_size,
    "container_type" => container_type,
    "date" => date,
    "lane_id" => lane_id,
    "number_of_ffe" => number_of_ffe,
    "number_of_moves" => number_of_moves,
    "product_id" => product_id
  },
  socket
) do
  form =
    %SimulationInput{
      container_size: container_size,
```

```

    container_type: container_type,
    date: date,
    lane_id: lane_id,
    number_of_ffe: number_of_ffe,
    number_of_moves: number_of_moves,
    product_id: product_id
  }

  result = calculate_result(form)

  {:noreply, assign(socket, result: result)}
end

```

Το `mount/3` εκτελείται κατά τη δημιουργία της σύνδεσης και αρχικοποιεί την κατάσταση του LiveView process. Το `handle_event/3` ανταποκρίνεται σε γεγονότα από τον φυλλομετρητή — εδώ η υποβολή φόρμας — με αντιστοίχιση προτύπων (pattern matching) στα πεδία της φόρμας και υπολογισμό αποτελέσματος. Ο διακομιστής επιστρέφει `{:noreply, assign(...)}` για να ενημερώσει την κατάσταση και να ενεργοποιήσει επανασχεδίαση (re-render).

8.3 PostgreSQL και Ecto

Η βάση δεδομένων που επιλέχθηκε είναι η **PostgreSQL**, ώριμη ανοιχτού κώδικα σχεσιακή βάση δεδομένων (*relational database*) με πλήρη υποστήριξη **ACID** συναλλαγών (*transactions*), τύπους JSON/JSONB για ημιδομημένα δεδομένα, και πλούσιο οικοσύστημα επεκτάσεων. Η βάση PostgreSQL φιλοξενείται ως διαχειριζόμενη υπηρεσία **Azure Database for PostgreSQL Flexible Server**, που αναλαμβάνει αντίγραφα ασφαλείας (backups), διορθώσεις (patches) και υψηλή διαθεσιμότητα.

Η βιβλιοθήκη **Ecto** είναι το επίπεδο αλληλεπίδρασης με τη βάση στην Elixir. Αποτελείται από τέσσερα στρώματα: *Adapter* (σύνδεση με PostgreSQL driver), *Schema* (αντιστοίχιση Elixir struct σε πίνακα), *Changeset* (επικύρωση και μετασχηματισμός δεδομένων πριν την αποθήκευση) και *Query* (composable DSL για ερωτήματα SQL). Η προσέγγιση αυτή διαχωρίζει σαφώς τον ορισμό δεδομένων από την επικύρωση, επιτρέποντας διαφορετικά changesets για δημιουργία, ενημέρωση και επικύρωση στο ίδιο schema.

Λήμμα 8.3.1 — Ecto schema ContainerMove:

```

schema "ocean_container_moves" do
  field(:container_size, Ecto.Enum, values: Nrg.Ocean.Container.sizes())
  field(:container_type, Ecto.Enum, values: Nrg.Ocean.Container.types())
  field(:equipment_id, :string)
  field(:loaded_ffe, :decimal)
  field(:missing_in_dremio, :boolean)
end

```

```

# these fields come from shipment data
field(:first_loaded_at, :utc_datetime)
field(:arrived_on, :date)
field(:lane_id, :string)
field(:test_id, :string)
field(:deleted_at, :utc_datetime)

timestamps()

belongs_to(:customer, Customer)
belongs_to(:shipment, Shipment)

field(:port_of_receipt_location, :map, virtual: true)
field(:port_of_discharge_location, :map, virtual: true)
end

```

Το schema ορίζει ρητά τύπους ανά πεδίο — ιδιαίτερα `Ecto.Enum` για `container_size` και `container_type` που διασφαλίζουν ότι μόνο έγκυρες τιμές αποθηκεύονται στη βάση. Τα `virtual` πεδία (`port_of_receipt_location`, `port_of_discharge_location`) δεν αντιστοιχούν σε στήλες πίνακα αλλά χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό της δομής κατά το ερώτημα χωρίς ξεχωριστό μοντέλο σύνδεσης (`join`).

8.4 Apache Kafka

Το **Apache Kafka** είναι κατανεμημένο σύστημα καταγραφής μηνυμάτων (*distributed log*) που χρησιμεύει ως **message broker** μεταξύ παραγωγών (*producers*) και καταναλωτών (*consumers*) δεδομένων. Η κεντρική αρχή του είναι ότι τα μηνύματα αποθηκεύονται διατεταγμένα και αμετάβλητα σε *topics* και *partitions*, επιτρέποντας αναπαραγωγή (*replay*), *backpressure* και ανεξάρτητη κλιμάκωση παραγωγών και καταναλωτών.

Το Kafka χρησιμεύει κυρίως για: - **Τηλεμετρία πλοίων (STAR Connect)**: τα δεδομένα καυσίμου από τα πλοία εισρέουν ως συμβάντα Kafka και λαμβάνονται από το BoW για τον υπολογισμό του *Remaining Fuel on Board*. - **Εισαγωγή δεδομένων Ocean emissions**: εισαγωγή δεδομένων κινήσεων εμπορευματοκιβωτίου από εσωτερικά συστήματα της Maersk. - **Ροή συμβάντων (event streaming) μεταξύ συστατικών**: ασύγχρονη επικοινωνία με αποσύνδεση (*decoupling*) παραγωγού-καταναλωτή.

Χρησιμοποιείται τη βιβλιοθήκη `:brod` — τον εγγενή για Erlang πελάτη (*client*) Kafka — που ενσωματώνεται φυσικά στη BEAM χωρίς JNI ή FFI. Τα *topics* διαιρούνται σε *partitions* ανά πλοίο (με κλειδί το IMO number), διασφαλίζοντας διατακτική επεξεργασία (*ordering*) για κάθε πλοίο. Οι καταναλωτές ανήκουν σε *consumer groups*, επιτρέποντας οριζόντια κλιμάκωση και ανάκτηση από τον τελευταίο επεξεργασμένο *offset* σε περίπτωση επανεκκίνησης.

8.5 Dremio

Το **Dremio** είναι πλατφόρμα ομοσπονδιακής αναζήτησης SQL (*federated SQL query engine*) που επιτρέπει ερωτήματα σε διάφορες πηγές δεδομένων (αρχεία Parquet, S3, βάσεις δεδομένων) μέσω ενός ενιαίου SQL interface χωρίς ETL (*Extract-Transform-Load*). Στη Maersk χρησιμοποιείται ως η εταιρική πλατφόρμα λίμνης δεδομένων (data lake).

Η σύνδεση γίνεται μέσω ODBC ή Arrow Flight (για ερωτήματα ροής [streaming] μεγάλου όγκου). Το Dremio ουσιαστικά παρέχει ένα επίπεδο αφαίρεσης (abstraction layer) πάνω από τις φυσικές βάσεις δεδομένων στη λίμνη δεδομένων.

8.6 ODBC ενσωματώσεις

Η πρόσβαση σε εξωτερικά συστήματα μέσω **ODBC** (*Open Database Connectivity*) χρησιμοποιείται σε δύο σημεία: στη σύνδεση με το **Shiptech** (παλαιού τύπου [legacy] σύστημα σχεδιασμού ταξιδιών σε Microsoft SQL Server) και στην πρόσβαση στο **Dremio** μέσω ODBC. Το Erlang/OTP περιλαμβάνει εγγενή προσαρμογέα ODBC (:odbc application) που επιτρέπει χρήση ODBC χωρίς εξωτερικές εξαρτήσεις.

Η ενσωμάτωση με Shiptech ακολουθεί το μοτίβο ξεχωριστού Repo (**Shiptech.Repo**) που αξιοποιεί Ecto ως DSL αλλά οδηγεί SQL Server μέσω ODBC αντί για PostgreSQL driver. Αυτό επιτρέπει στο υπόλοιπο σύστημα να αλληλεπιδρά με το παλαιού τύπου SQL Server με τον ίδιο τρόπο που αλληλεπιδρά με PostgreSQL, μειώνοντας γνωσιακό φορτίο (*cognitive load*).

8.7 Microsoft Azure

Το **Microsoft Azure** είναι η πλατφόρμα νέφους (*cloud platform*) που χρησιμοποιεί η Maersk για τις υποδομές της. Η επιλογή δεν έγινε από την ομάδα ET Platform αλλά κληρονομήθηκε ως εταιρική απαίτηση.

Χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες υπηρεσίες Azure:

- **Azure Database for PostgreSQL Flexible Server**: διαχειριζόμενη βάση δεδομένων για emissions_workbench, bunker/bow και EventStore.
- **Azure Kubernetes Service (AKS)**: εκτέλεση των containerized εφαρμογών (βλ. 8.8).
- **Azure Blob Storage**: αποθήκευση PDF πιστοποιητικών ECO Delivery (βλ. Κεφ. 6.5).
- **Azure Key Vault**: αποθήκευση ευαίσθητων παραμέτρων (*secrets*) — συμπληρωματικά με HashiCorp Vault (βλ. 8.14).
- **Azure Logic Apps**: ορχήστρωση ροών εργασίας στο BOPS (8 Logic Apps: activate_vessel, pre_processing, upload_bunker_plan, upload_user_input κ.ά.).
- **Azure API Management**: πύλη (gateway) για το BOPS API.

- **Azure Active Directory + SAML SSO**: αυθεντικοποίηση χρηστών (βλ. Κεφ. 9.7).

Το σύστημα λειτουργεί σε **δύο περιβάλλοντα** (staging και production), καθένα με ανεξάρτητες υποδομές. Το πλεονέκτημα του Azure ως διαχειριζόμενης υπηρεσίας είναι η μείωση του λειτουργικού φορτίου (*operational overhead*) για patches, backups και υψηλή διαθεσιμότητα. Το μειονέκτημα είναι αυξημένο κόστος σε σχέση με αυτοφιλοξενούμενες (self-hosted) λύσεις, και εξάρτηση από διαθεσιμότητα τρίτου παρόχου.

8.8 Kubernetes

Το **Kubernetes** (*K8s*) είναι πλατφόρμα ορχήστρωσης containers (*container orchestration*) που αναλαμβάνει την εκτέλεση, κλιμάκωση, αυτόματη επανεκκίνηση και κυλιόμενες ενημερώσεις (rolling updates) των υπηρεσιών. Ο διακομιστής ιστού (web server) του emissions_workbench τρέχει σε **3 αντίγραφα (replicas)** πάνω σε AKS.

Η ροή της κυκλοφορίας (*traffic flow*) ακολουθεί τα εξής βήματα: **Akamai** (CDN και WAF) → **Stargate** (εσωτερική πύλη API [gateway] της Maersk) → **nginx ingress controller** (AKS) → **Pods**. Κάθε pod εκτελεί το Elixir release σε Docker container. Το Kubernetes διαμορφώνει *readiness probes* (η εφαρμογή είναι έτοιμη να δεχτεί κυκλοφορία) και *liveness probes* (η εφαρμογή είναι εν λειτουργία), επανεκκινώντας αυτόματα pods που δεν ανταποκρίνονται.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι το προσαρμοσμένο εργαλείο CLI **k8s**: ένα περιτύλιγμα (wrapper) βασισμένο σε Nix πάνω από **kubectl** που τυποποιεί τις εντολές deployment και παρέχει έτοιμα *namespaces*, *contexts* και διαπιστευτήρια. Η ανάπτυξη γίνεται μέσω κυλιόμενων ενημερώσεων — το νέο pod ξεκινά, περνά τα readiness checks, και μόνο τότε τερματίζεται το παλιό — διασφαλίζοντας μηδενικό χρόνο διακοπής (*zero-downtime deployment*) ακόμα και κατά τις ~32 αναπτύξεις ανά ημέρα.

8.9 Terraform

Το **Terraform** της HashiCorp είναι εργαλείο υποδομής ως κώδικα (*Infrastructure as Code* — *IaC*): οι υποδομές ορίζονται σε αρχεία HCL (*HashiCorp Configuration Language*) και δημιουργούνται/ενημερώνονται ντετερμινιστικά με **terraform apply**. Οποιαδήποτε αλλαγή στην υποδομή (νέος πίνακας, νέο σύμπλεγμα AKS, κανόνας τείχους προστασίας [firewall rule]) γίνεται μόνο μέσω αλλαγής κώδικα Terraform, επιτρέποντας επιθεώρηση κώδικα (*code review*), ίχνος ελέγχου (*audit trail*) και εύκολη αναδημιουργία.

Σε σχέση με εναλλακτικές (Pulumi, AWS CDK, Ansible): το Terraform επιλέχθηκε για την ευρεία υιοθέτησή του στη Maersk, τον ώριμο **azurerm** provider και τη σαφή γλώσσα δήλωσης πόρων.

8.10 Nix και nix-darwin

Το **Nix** είναι διαχειριστής πακέτων (*package manager*) και γλώσσα δήλωσης ρυθμίσεων (*configuration language*) με κεντρική αρχή την **αναπαραγωγιμότητα** (*reproducibility*): κάθε πακέτο ορίζεται από το ακριβές *hash* των εξαρτήσεών του, εξαλείφοντας το φαινόμενο «στον υπολογιστή μου λειτουργεί». Τα **Nix Flakes** εισάγουν δηλωτικό lockfile (`flake.lock`) που καρφώνει (*pins*) κάθε εξάρτηση σε ακριβή έκδοση, παρόμοια με `package-lock.json` αλλά για ολόκληρο το περιβάλλον ανάπτυξης.

Ολόκληρο το περιβάλλον ανάπτυξης — Elixir, Erlang, Node.js, εργαλεία CI, k8s binary — ορίζεται στο `flake.nix`. Η ενσωμάτωση **nix-darwin** επιτρέπει τη χρήση Nix σε macOS, καλύπτοντας τον φορητό υπολογιστή ανάπτυξης (development laptop) κάθε μηχανικού. Το **Home Manager** διαχειρίζεται ρυθμίσεις χρήστη (`.zshrc`, git config, packages). Το **direnv** φορτώνει αυτόματα το περιβάλλον `flake.nix` κάθε φορά που ο χρήστης μπαίνει στον κατάλογο του έργου.

Λήμμα 8.10.1 — `flake.nix`:

```
nrg = addK8sToApp {
  app = callPackage ./components/emissions_workbench { };
  containerImage = (callPackage ./components/emissions_workbench/container.nix) {
    paths = [ nrg.app ];
  };
};
```

Ο ορισμός δείχνει τη σύνθεση (*composability*) του Nix: η εφαρμογή `nrg` δημιουργείται ως πακέτο μέσω `callPackage`, ενσωματώνεται σε Docker container image μέσω `container.nix`, και εμπλουτίζεται με Kubernetes εργαλεία μέσω `addK8sToApp`. Ολόκληρη η αλυσίδα από τον πηγαίο κώδικα (source code) έως το container image είναι δηλωτική και αναπαραζίμη.

Το πλεονέκτημα στην ομάδα είναι σημαντικό: νέος μηχανικός ρυθμίζει το περιβάλλον με `nix develop` χωρίς χειροκίνητη εγκατάσταση εξαρτήσεων. Το CI τρέχει το ίδιο Nix flake, διασφαλίζοντας ότι οι κατασκευές (builds) σε φορητό και CI είναι πανομοιότυπες.

8.11 GitHub Actions και Custom Runner

Η ομάδα χρησιμοποιεί το **GitHub Actions** ως σύστημα συνεχούς ολοκλήρωσης (*CI* — *Continuous Integration*) και συνεχούς ανάπτυξης (*CD* — *Continuous Deployment*). Στο σύστημα υπάρχουν ροές εργασίας (workflows) που καλύπτουν: κατασκευή, δοκιμές, σάρωση υποδομής (*IaC scan*), ελέγχους ασφαλείας και εκτέλεση Terraform.

Κρίσιμη βελτίωση αποδοτικότητας είναι ο **Custom NixOS Runner**: εικονική μηχανή Azure που εκτελεί NixOS και χρησιμεύει ως GitHub Actions runner αντί για τους standard GitHub-hosted runners. Το πλεονέκτημα: αφού το περιβάλλον είναι Nix, το runner έχει ήδη προσωρινά αποθηκευμένα (cached) τα πακέτα και ο χρόνος εκκίνησης CI είναι πολύ μικρότερος. Η αυθεντικοποίηση με HashiCorp Vault γίνεται μέσω **AppRole auth** — το

CI λαμβάνει βραχύβιο token από Vault για πρόσβαση σε μυστικά παραγωγής (production secrets).

Μια σημαντική βελτιστοποίηση είναι η **ανίχνευση επηρεαζόμενων χώρων εργασίας (affected workspace detection)**: στο ενιαίο αποθετήριο, κάθε εκτέλεση CI αξιολογεί ποια συστατικά επηρεάζονται από τις αλλαγές και εκτελεί δοκιμές μόνο για αυτά, αποφεύγοντας άσκοπες επαναλήψεις.

8.12 Maersk Design System (MDS)

Το **Maersk Design System (MDS)** είναι η εσωτερική βιβλιοθήκη συστατικών διεπαφής (UI components) της Maersk, υλοποιημένη ως **Web Components** — πρότυπο W3C που επιτρέπει επαναχρησιμοποιήσιμα HTML elements ανεξάρτητα από JavaScript framework. Παρέχει έτοιμα συστατικά (κουμπιά, φόρμες, πίνακες, modals) με εφαρμοσμένο το brand identity της Maersk (χρώματα, typography, spacing). Χρησιμοποιώντας έτοιμο στυλ διεπαφής, οι χρήστες που εργάζονται σε πολλές εφαρμογές της Maersk αναγνωρίζουν οικεία μοτίβα (patterns) ελαχιστοποιώντας τον χρόνο εκμάθησης.

8.13 Observability stack

Η παρακολούθηση (*observability*) ενός καταναμεμένου, καθοδηγούμενου από συμβάντα συστήματος απαιτεί τρεις πυλώνες: αρχεία καταγραφής (logs), μετρικές (metrics) και ίχνη (traces). Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται:

Αρχεία καταγραφής (Logs): Το **Grafana Loki** συγκεντρώνει αρχεία καταγραφής από όλα τα pods. Τα ερωτήματα σε αυτά γίνονται με **LogQL** (γλώσσα παρόμοια με PromQL). Ο πράκτορας (agent) αποστολής καταγραφών (promtail ή Kubernetes-native log shipper) στέλνει μία ροή καταγραφής (log stream) ανά pod.

Μετρικές (Metrics): Η βιβλιοθήκη **PromEx** εξάγει αυτόματα μετρικές Phoenix, Oban και LiveView σε Prometheus exposition format. Ο **Prometheus** συλλέγει (*scrapes*) τις μετρικές ανά διάστημα (interval), και το **Grafana** παρέχει πίνακες (dashboards). Έτοιμοι πίνακες (Phoenix web server latency, Oban queue depth, LiveView connections) δίνουν ορατότητα χωρίς προσαρμοσμένη ενοργάνωση (instrumentation).

Ίχνη (Traces): Το **OpenTelemetry** ενσωματώνεται στο Phoenix και Ecto για αυτόματη ιχνηλάτηση (*distributed tracing*) των αιτημάτων HTTP και των ερωτημάτων βάσης. Τα ίχνη αποστέλλονται στο **OpenObserve** (v0.14.4, self-hosted), αντικαθιστώντας ακριβότερες λύσεις ιχνηλάτησης νέφους (cloud tracing).

Ειδοποιήσεις (Alerts): Κανόνες ειδοποίησης (*alert rules*) ορίζονται ως κώδικας. Ειδοποιήσεις αποστέλλονται μέσω του εσωτερικού συστήματος **Hedwig** σε κανάλια Microsoft Teams ή email.

Λήμμα 8.13.1 — Κανόνας ειδοποίησης για αιτήματα ETW:

```
- alert: Too many concurrent requests to ETW
  expr: sum(nrg_etw_requests_count{app="nrg-workers"}) by(env) > 5
  for: 5m0s
  labels:
    hedwig_scope: nrg-errors-scope
  annotations:
    runbook_url: https://maersk-tools.atlassian.net/wiki/x/1I10iio
    summary: Too many current requests to ETW
    description: We've made too many concurrent requests to ETW in an
    ↪ environment.
```

Κάθε κανόνας ορίζει PromQL έκφραση (*expr*), διάρκεια ενεργοποίησης (*for*), εμβέλεια (*scope*) ειδοποίησης (*hedwig_scope*) και σύνδεσμο runbook για αντιμετώπιση. Η αποθήκευση των κανόνων ειδοποίησης ως κώδικα επιτρέπει επιθεώρηση κώδικα (*code review*), έλεγχο εκδόσεων (*version control*) και ελεγχόμενη εξέλιξη των κανόνων παράλληλα με τον κώδικα εφαρμογής.

8.14 HashiCorp Vault και agenix

Η διαχείριση ευαίσθητων παραμέτρων (*secrets management*) απαιτεί διαφορετικές λύσεις για διαφορετικές φάσεις: διαπιστευτήρια χρόνου εκτέλεσης (*runtime credentials*) (*database passwords*, *API keys*) έναντι μυστικών χρόνου κατασκευής (*build-time secrets*) (κλειδιά πρόσβασης σε *Nix binary cache*).

Για **μυστικά χρόνου εκτέλεσης** (*runtime secrets*), το **HashiCorp Vault** παρέχει κεντρικό αποθετήριο με λεπτομερείς (*fine-grained*) πολιτικές πρόσβασης (*policies*), καταγραφή ελέγχου (*audit logging*) κάθε ανάγνωσης και **dynamic secrets** (το Vault δημιουργεί βραχύβια διαπιστευτήρια που λήγουν αυτόματα). Η αυθεντικοποίηση του CI γίνεται μέσω **AppRole auth**: το GitHub Actions workflow παίρνει βραχύβιο token ανταλλάσσοντας *role ID* + *secret ID*, αποφεύγοντας τη διαχείριση μακρόβιων διαπιστευτηρίων στα GitHub Secrets.

Για **μυστικά χρόνου κατασκευής** (*build-time secrets*) (πχ *netrc* για *private Nix binary cache*), χρησιμοποιείται **agenix**: εργαλείο δηλωτικής κρυπτογράφησης βασισμένο στο πρότυπο *age*. Τα μυστικά αποθηκεύονται κρυπτογραφημένα στο αποθετήριο Git και αποκρυπτογραφούνται κατά το build με το κατάλληλο κλειδί. Η διάκριση μεταξύ Vault (*runtime*) και agenix (*build-time*) αντικατοπτρίζει την αρχή ελάχιστης έκθεσης: κάθε secret εκτίθεται μόνο όταν χρειάζεται.

8.15 Oban

Το **Oban** είναι βιβλιοθήκη επεξεργασίας εργασιών υποβάθρου (*background job processor*) για Elixir, βασισμένη σε **PostgreSQL** ως αποθετήριο ουράς. Κάθε εργασία αποθηκεύεται ως γραμμή στον πίνακα *oban_jobs* με κατάσταση, ουρά (*queue*), αριθμό

επαναπροσπαθειών (*attempts*) και προγραμματισμένο χρόνο εκτέλεσης. Αν ο διακομιστής επανεκκινήθει, οι εκκρεμείς εργασίες ανακτώνται από PostgreSQL — δεν χάνονται.

Η νοητική αναλογία με το Sidekiq του Ruby on Rails είναι εύστοχη, με κεντρική διαφορά ότι το Oban χρησιμοποιεί PostgreSQL αντί Redis — αξιοποιώντας ACID εγγυήσεις για ακριβές *exactly-once semantics* μέσω *advisory locks*. Η χρήση Oban απαλλάσσει τους προγραμματιστές από την υλοποίηση προσαρμοσμένου χρονοπρογραμματισμού και λογικής επανάληψης (*retry*) σε κάθε εργάτη.

8.16 Commanded και EventStore

Το **Commanded** είναι βιβλιοθήκη υλοποίησης **CQRS** (*Command Query Responsibility Segregation*) και **event sourcing** στην Elixir. Παρέχει τα δομικά στοιχεία: **Aggregate** (αντικείμενο πεδίου [domain] με κατάσταση), **Command** (εντολή αλλαγής), **Event** (αμετάβλητο γεγονός που καταγράφει τι συνέβη) και **Projection** (μοντέλο ανάγνωσης [read model] που προκύπτει από επανάληψη συμβάντων).

Το σύστημα αποθήκευσης (backend) συμβάντων είναι το **EventStore** (μέσω του `commanded_eventstore_adapter`), που εδράζεται πάνω σε PostgreSQL. Κάθε συμβάν αποθηκεύεται αμετάβλητα με αύξοντα αριθμό (*sequence number*), δίνοντας πλήρες ίχνος ελέγχου και τη δυνατότητα αναπαραγωγής (*replay*) της ιστορίας.

Το Commanded χρησιμοποιείται αποκλειστικά για το **Energy Bank** (Κεφ. 6.3): οι καταθέσεις (*deposits*) πράσινου καυσίμου και αναλήψεις (*withdrawals*) για ECO προϊόντα υλοποιούνται ως **Commands** που παράγουν **Events**. Αυτό εξασφαλίζει πλήρη ιχνηλασιμότητα για τους ελέγχους GIA και επιτρέπει ανακατασκευή του ισοζυγίου ανά οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

8.17 Λοιπά υποστηρικτικά εργαλεία

Πέραν των κεντρικών τεχνολογιών, αξιοποιείται μια σειρά εργαλείων που υποστηρίζουν ποιότητα κώδικα, παραγωγικότητα και ειδικές ανάγκες:

Credo: στατικός αναλυτής (*linter*) Elixir που εφαρμόζει κανόνες στυλ και αναγνωρίζει κοινά αντιπρότυπα (*antipatterns*). Εκτελείται στο CI για κάθε αίτημα ενσωμάτωσης (*pull request*).

Dialyxir: περιτύλιγμα (*wrapper*) για το Dialyzer, το εργαλείο τυπικής ανάλυσης (*type analysis*) βασισμένο σε *success typings* — εντοπίζει κλήσεις συναρτήσεων που δεν μπορούν να επιστρέψουν *valid* τύπο χωρίς να απαιτεί ρητές *type annotations*.

Telemetry: βιβλιοθήκη ενοργάνωσης (*instrumentation*) χαμηλού επιπέδου που εκπέμπει συμβάντα για κρίσιμα σημεία (HTTP request έναρξη/λήξη, Ecto query εκτέλεση). Το PromEx χτίζει πάνω στο Telemetry για τις μετρικές Phoenix/Oban.

Workspace: εργαλείο διαχείρισης ενιαίου αποθετηρίου Elixir — ορίζει DAG εξαρτήσεων μεταξύ *applications* και επιτρέπει εντολές `mix workspace.run` να εκτελούνται μόνο στα επηρεαζόμενα (*affected*) συστατικά, ενισχύοντας την ταχύτητα CI.

Livebook: περιβάλλον notebook για Elixir (αντίστοιχο Jupyter), χρησιμοποιούμενο για εξερεύνηση ποιότητας δεδομένων (`data-quality.livemd`) και ανάλυση κατά περίπτωση (ad-hoc) χωρίς να χρειάζεται ξεχωριστό Python περιβάλλον.

ChromicPDF: βιβλιοθήκη δημιουργίας PDF μέσω Chromium χωρίς γραφικό περιβάλλον (headless), χρησιμοποιούμενη για τη δημιουργία PDF πιστοποιητικών ECO (Κεφ. 6.5) από πρότυπα (templates) HTML.

Η επιλογή κάθε τεχνολογίας στον παραπάνω κατάλογο δεν είναι τυχαία: αποτελεί συνειδητή απόφαση με αιτιολογημένη σύνδεση στις απαιτήσεις του συστήματος. Η BEAM επελέγη για παραλληλία και ανοχή σε σφάλματα, το Phoenix LiveView για ενοποιημένη ανάπτυξη πλήρους στοίβας (full-stack), το Nix για αναπαραγωγιμότητα περιβάλλοντος, και το Commanded/EventStore για ίχνος ελέγχου στην Energy Bank. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφ. 9) εξετάζεται πώς αυτές οι τεχνολογίες συνδέονται αρχιτεκτονικά σε ένα λειτουργικό σύνολο.

Κεφάλαιο 9 — Αρχιτεκτονική του συστήματος

9.1 Επισκόπηση συστήματος

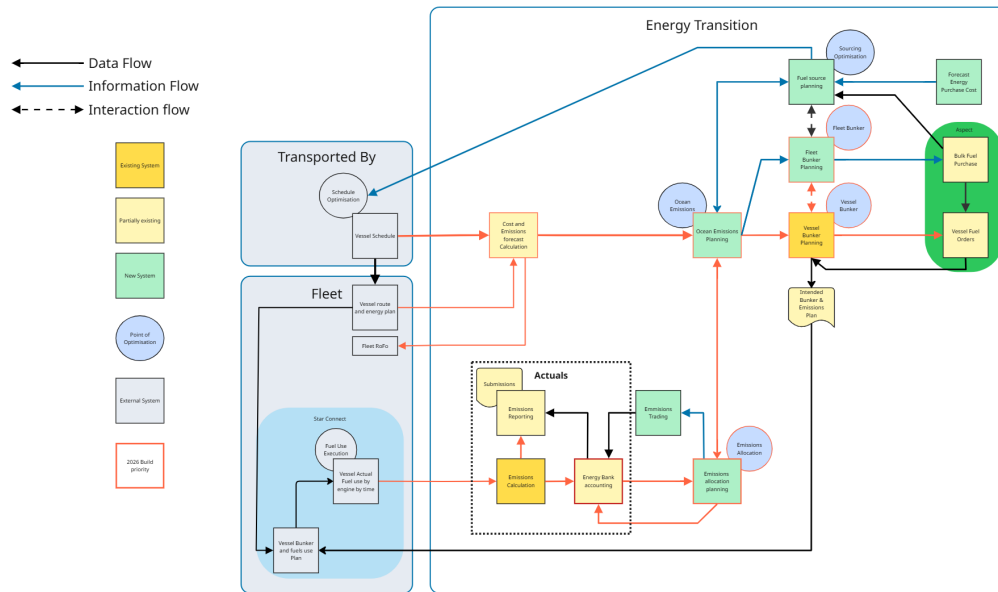
Το Emissions Workbench αποτελεί μια πολύπλοκη, καταναεμημένη πλατφόρμα η οποία ενορχηστρώνει αφενός τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων εκπομπών από ετερογενείς πηγές, αφετέρου την παρουσίαση επεξεργασμένων πληροφοριών σε 1.300 και πλέον χρήστες διαφορετικών επιχειρησιακών ρόλων. Η αρχιτεκτονική ενσωματώνει τρεις κύριους πυλώνες λειτουργικότητας — Ocean Emissions, Προϊόντα ECO Παράδοσης και Bunker Optimization (βλ. Κεφ. 4) — μέσα σε ένα ενιαίο, συνεκτικό σύστημα που εκτείνεται από την πραγματικού χρόνου τηλεμετρία πλοίων ως την έκδοση νομικά δεσμευτικών πιστοποιητικών βιωσιμότητας.

Το παρακάτω διάγραμμα παρέχει μια υψηλού επιπέδου θεώρηση των συστατικών στοιχείων του συστήματος και των αλληλεπιδράσεών τους:

Η λογική άποψη του συστήματος διακρίνει πέντε βασικά συστατικά (*components*): το `emissions_workbench` ως κεντρικό συστατικό πεδίου (*domain*), το `bunker/bow` και το `bunker/api` για τη βελτιστοποίηση ανεφοδιασμού, καθώς και τα `ocean` και `eco_products` ως εξειδικευμένα, αυτόνομα συστατικά. Όλα συνυπάρχουν σε ένα μονο-αποθετήριο (*monorepo*) που διαχειρίζεται την κοινή υποδομή, τη δοκιμή και την ανάπτυξη.

Η φυσική άποψη περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητα περιβάλλοντα ανάπτυξης (*deployment*) (παραγωγή και ενδιάμεσο περιβάλλον δοκιμής — *staging*), με τρία αντίγραφα (*replicas*) `pod` διακομιστή ιστού (*web server*) και ένα αποκλειστικό `pod` για επεξεργασία παρασκηνίου (*background processing*), όλα ενορχηστρωμένα μέσω Azure Kubernetes Service. Η υψηλού επιπέδου ροή δεδομένων ακολουθεί ένα μοτίβο αγωγού (*pipeline*): εξωτερικές πηγές (Dremio, Kafka, Shiptech) → στρώμα ενσωμάτωσης (*ingestion layer*) → λογική πεδίου (*domain logic*) → στρώμα παρουσίασης (LiveView) → αποθήκευση αποτελεσμάτων (PostgreSQL, Azure Blob Storage).

Η ανάπτυξη ξεκίνησε το Μάρτιο του 2023 και το σύστημα μπήκε σε παραγωγή τον Σεπτέμβριο του 2023 — ένας κύκλος ανάπτυξης έξι μηνών από κενή κατάσταση σε πλήρως λειτουργικό σύστημα παραγωγής. Η επιλογή της αρχιτεκτονικής ήταν συνειδητά προσανατολισμένη στην ταχύτητα ανάπτυξης, χωρίς να θυσιάζεται η επιχειρησιακή ορθότητα — δεδομένου ότι τα παραγόμενα δεδομένα χρησιμοποιούνται για κανονιστική συμμόρφωση (EU ETS, CSRD) και εμπορικές συναλλαγές ύψους 31 εκατομμυρίων δολαρίων.



Σχήμα 2: Αρχιτεκτονική Συστήματος

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αρχιτεκτονική δεν σχεδιάστηκε εκ των προτέρων ως ολοκληρωμένο προσχέδιο (blueprint), αλλά εξελίχθηκε σταδιακά υπό τις αρχές του Extreme Programming (βλ. Κεφ. 10): απλούστατη δομή αρχικά, με συνεχή ανακαινισμό (*refactoring*) καθώς αποκαλύπτονταν νέες επιχειρησιακές απαιτήσεις.

9.2 Clean Architecture στην πράξη

Η θεμελιώδης αρχιτεκτονική αρχή που διέπει τη βάση κώδικα είναι η *Clean Architecture* (Καθαρή Αρχιτεκτονική), όπως αυτή τεκμηριώθηκε από τον Robert C. Martin. Η αρχή αυτή οργανώνει τον κώδικα σε ομόκεντρα στρώματα με αυστηρή κατευθυντήρια εξάρτηση: εξωτερικά στρώματα εξαρτώνται από εσωτερικά, ενώ το αντίθετο απαγορεύεται.

Η αρχιτεκτονική αυτή υλοποιείται με τέσσερα επίπεδα:

Entities (Οντότητες): Τα βασικά επιχειρησιακά δεδομένα και οι κανόνες που θα υπήρχαν ακόμη και αν το σύστημα δεν ήταν αυτοματοποιημένο. Αυτά περιλαμβάνουν έννοιες όπως *ContainerMove*, *ClearingAccount*, *FuelOrder*, *Certificate* — δομές δεδομένων χωρίς εξαρτήσεις σε εξωτερικά frameworks.

Use Cases (Περιπτώσεις Χρήσης): Η επιχειρησιακή λογική της εφαρμογής, ανεξάρτητη από web frameworks, βάσεις δεδομένων και λοιπές υποδομές. Παράδειγμα: ο υπολογισμός εκπομπών ανά δρομολόγιο εμπεριέχει την επιχειρησιακή λογική (*EmissionsCalculator*), αλλά δεν γνωρίζει τίποτα για SQL ή HTTP. Τα use cases ορίζουν *behaviours* (συμπεριφορές) για τα δεδομένα που χρειάζονται, χωρίς να γνωρίζουν πώς αυτά αναχτώνται.

Adapters/Gateways (Προσαρμογείς): Αποτελούν τη γέφυρα μεταξύ των use cases

και του εξωτερικού κόσμου. Τα *Gateways* υλοποιούν τις συμπεριφορές που ορίζουν τα use cases και αλληλεπιδρούν με εξωτερικά συστήματα (PostgreSQL, Dremio, Kafka). Τα *Web adapters* (LiveView, HTTP controllers) εκχωρούν όλη την επεξεργασία δεδομένων στα use cases, παρέχοντάς τους τα κατάλληλα Gateways.

Frameworks/Drivers: Το εξωτερικότερο στρώμα — Phoenix, Ecto, Kafka clients, Azure SDKs. Οι επιλογές αυτές μπορούν να αντικατασταθούν χωρίς να επηρεαστεί η επιχειρησιακή λογική.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της Clean Architecture είναι το σύστημα έκδοσης πιστοποιητικών (βλ. Κεφ. 6.5): το use case συγκεντρώνει εκπομπές μέσω ενός gateway, υπολογίζει αποταμιεύσεις ανεξάρτητα από τη βάση δεδομένων, και στη συνέχεια ο web controller μεριμνά για τη μορφοποίηση και αποθήκευση του PDF — κάθε στρώμα ξεχωριστό, με καθαρές διεπαφές. Αυτή η αυστηρή διαστρωμάτωση επέτρεψε στην ομάδα να αλλάξει τον τρόπο παραγωγής PDF χωρίς να αγγίξει τη λογική υπολογισμού εκπομπών.

Ένα ζήτημα που προκύπτει συχνά κατά την εφαρμογή Clean Architecture σε Elixir είναι η σχέση με τις παραδοσιακές Phoenix conventions: το Phoenix framework, από μόνο του, δεν επιβάλλει Clean Architecture — απλοποιεί την ανάπτυξη με controllers που απευθείας αλληλεπιδρούν με Ecto schemas. Η ομάδα επέλεξε να υπερβεί αυτό το προεπιλεγμένο μοτίβο, εισάγοντας ρητό στρώμα Gateway: οι controllers και τα LiveView modules δεν αλληλεπιδρούν ποτέ άμεσα με τους Ecto repos, αλλά μέσω Gateway modules που υλοποιούν behaviours ορισμένα από τα use cases. Αυτή η επιλογή αυξάνει ελαφρά τον επαναλαμβανόμενο κώδικα (boilerplate), αλλά επιτρέπει πλήρεις δοκιμές μονάδας (unit testing) των use cases χωρίς βάση δεδομένων — κρίσιμο για τη διατήρηση του ρυθμού TDD (βλ. Κεφ. 10).

Η Clean Architecture εκτός από τεχνική επιλογή αποτελεί και πολιτισμική αρχή: η ομάδα χρησιμοποιεί τη διαστρωμάτωση ως κοινή γλώσσα στις επιθεωρήσεις κώδικα (code reviews). Ερωτήματα του τύπου “αυτό ανήκει στο use case ή στο gateway;” αποτελούν τακτικές συζητήσεις στο pair programming (βλ. Κεφ. 10), διαμορφώνοντας μια ομαδική κουλτούρα αρχιτεκτονικής συνέπειας ανεξάρτητα από ατομικές προτιμήσεις.

9.3 Monorepo οργάνωση

Ολόκληρη η κωδικοβάση φιλοξενείται σε ένα ενιαίο αποθετήριο (*monorepo*) που συνδυάζει το εργαλείο *Workspace* για ενορχήστρωση Elixir monorepo με Mix umbrella applications. Αυτή η επιλογή αντανακλά μια συνειδητή αρχιτεκτονική απόφαση: η ατομική διαχείριση πολλαπλών αποθετηρίων θα εισήγαγε σημαντική πολυπλοκότητα συντονισμού σε μια κωδικοβάση όπου τα συστατικά μοιράζονται γνώση πεδίου (domain) και τεχνολογική υποδομή.

Τα πέντε κύρια συστατικά οργανώνονται κάτω από τον κατάλογο `components/`:

- `emissions_workbench`: Ο κεντρικός κόμβος — Ocean Emissions, Προϊόντα ECO Παράδοσης, Energy Bank.
- `bunker/bow`: Το web UI του συστήματος βελτιστοποίησης ανεφοδιασμού.

- **bunker/api**: Η υπηρεσία συντονιστή (coordinator) που επικοινωνεί με τον C++ επιλυτή.
- **ocean**: Αυτόνομο συστατικό για κύρια δεδομένα πλοίων (vessel master data) και EU ETS δεδομένα.
- **eco_products** και **net_zero**: Συστατικά-κράτησης θέσης (placeholder) για μελλοντική επέκταση.

Ένα κρίσιμο πλεονέκτημα του ενιαίου αποθετηρίου είναι η ανίχνευση επηρεαζόμενων εφαρμογών (*affected workspace apps*) κατά τη φάση CI/CD: αντί να επανεκτελούνται οι δοκιμές για ολόκληρη την κωδικοβάζση σε κάθε υποβολή (commit), το σύστημα εντοπίζει ποια συστατικά επηρεάστηκαν από τις αλλαγές και εκτελεί μόνο τις σχετικές δοκιμές — αυτό επιτρέπει τη διατήρηση υψηλής συχνότητας αναπτύξεων (~32 ανά ημέρα) χωρίς αδικαιολόγητα μεγάλους χρόνους αναμονής (βλ. Κεφ. 10 για πρακτικές CI/CD).

Ένα εγγενές μειονέκτημα είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα κατασκευής (*build complexity*): η ατομική εκτέλεση ενός συστατικού απαιτεί κατανόηση του γράφου εξαρτήσεων. Αυτό αντιμετωπίζεται μέσω τεκμηρίωσης και εργαλείων ανίχνευσης εξαρτήσεων του Workspace.

Μια ενδιαφέρουσα πτυχή της οργάνωσης σε ενιαίο αποθετήριο είναι ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζεται με το εργαλείο Nix: το `flake.nix` ορίζει ένα ενιαίο, αναπαραγώγιμο περιβάλλον ανάπτυξης για ολόκληρο το αποθετήριο. Αυτό σημαίνει ότι ένας νέος προγραμματιστής που κλωνοποιεί το αποθετήριο εκτελεί μία μόνο εντολή (`nix develop`) και αποκτά ακριβώς την ίδια έκδοση Elixir, Erlang, PostgreSQL, και όλων των βοηθητικών εργαλείων που χρησιμοποιεί ολόκληρη η ομάδα — ανεξάρτητα από το λειτουργικό σύστημα ή τις τοπικές ρυθμίσεις.

9.4 Components και τα όριά τους

Η οργάνωση σε συστατικά δεν είναι απλώς φυσική διαίρεση φακέλων — αντιπροσωπεύει σαφώς οριοθετημένα επιχειρησιακά πλαίσια (contexts) (βλ. *Domain-Driven Design*). Κάθε συστατικό εκθέτει μια δημόσια διεπαφή και κρύβει τις εσωτερικές λεπτομέρειες υλοποίησης.

Συστατικό	Ρόλος	Δημόσια API
<code>emissions_workbench</code>	Κεντρικό πεδίο (domain): εμπομπές, ECO προϊόντα, Energy Bank	<code>Nrg.Ocean.*</code> , <code>EnergyBank.*</code> , <code>NrgWeb.*</code>
<code>bunker/bow</code>	Web UI βελτιστοποίησης ανεφοδιασμού	Phoenix LiveView app, Oban workers

Συστατικό	Ρόλος	Δημόσια API
bunker/api	Συντονιστής (coordinator) για τον C++ επιλυτή	REST API, Port-based IPC
ocean	Κύρια δεδομένα πλοίων + EU ETS	get_all_vessels/0, find_by_imo/1
eco_products	Λογική ECO προϊόντων (placeholder)	Εξαρτάται από emissions_workbench

Η Elixir ως γλώσσα δεν διαθέτει τροποποιητές πρόσβασης (access modifiers) σε επίπεδο module, επομένως τα όρια εφαρμόζονται κατά σύμβαση: δημόσιες συναρτήσεις στα ανώτερα επίπεδα module path (πχ `EnergyBank.deposit/2`) αποτελούν τη σύμβαση δημόσιας διεπαφής, ενώ modules με βαθύτερη ιεραρχία (πχ `EnergyBank.Domain.Transactions.Withdrawal`) θεωρούνται εσωτερικής χρήσης.

Τα όρια μεταξύ συστατικών επιβάλλονται επίσης μέσω της δομής εξαρτήσεων στα Mix project files: ένα συστατικό δεν μπορεί να εισαγάγει κώδικα άλλου συστατικού αν αυτή η εξάρτηση δεν είναι δηλωμένη ρητά. Αυτό δημιουργεί ένα κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφο (DAG) εξαρτήσεων που τεκμηριώνει τη συνολική αρχιτεκτονική δομή.

Εντός του `emissions_workbench`, τα πλαίσια πεδίου (domain contexts) οργανώνονται επίσης ιεραρχικά: το namespace `Nrg.Ocean` ορίζει κύρια δεδομένα πλοίων και υπολογισμό εκπομπών, το namespace `EnergyBank` διαχειρίζεται τη λογιστική καυσίμων, και το namespace `NrgWeb` εκθέτει τη διεπαφή ιστού. Η επικοινωνία μεταξύ αυτών των πλαισίων γίνεται μέσω δημόσιων API συναρτήσεων, αποτρέποντας άμεση εξάρτηση μεταξύ εσωτερικών modules. Αυτή η πρακτική, αν και δεν επιβάλλεται από τον compiler, ελέγχεται στα code reviews ως αρχιτεκτονική αρχή της ομάδας.

Ένα ζήτημα που αντιμετωπίζουν πολλές αρχιτεκτονικές μικροϋπηρεσιών (microservices) είναι η διαχείριση δεδομένων που ανήκουν σε πολλαπλά πλαίσια. Αυτό αντιμετωπίζεται με ρητή αντιγραφή (*copy-on-write*) μόνο των απαραίτητων πεδίων: το `emissions_workbench` αποθηκεύει τα δεδομένα πλοίων που χρειάζεται τοπικά, αντί να καλεί κάθε φορά το συστατικό `ocean`. Αυτή η στρατηγική *data sovereignty per context* (κυριότητα δεδομένων ανά πλαίσιο) αυξάνει την τοπική συνοχή και μειώνει τη σύζευξη χρόνου εκτέλεσης (runtime), με το κόστος πιθανής (διαχειρίσιμης) πλεονασματικής αποθήκευσης.

9.5 Αγωγή ενσωμάτωσης δεδομένων (Data Ingestion Pipeline)

Ένας από τους αρχιτεκτονικά πιο ενδιαφέροντες τομείς του συστήματος είναι ο τρόπος με τον οποίο δεδομένα από ετερογενείς εξωτερικές πηγές εισέρχονται, κανονικοποιούνται και καθίστανται διαθέσιμα για επεξεργασία. Η ενσωμάτωση δεδομένων (*data ingestion*) αντιμετω-

πίζει τρεις διαφορετικές προκλήσεις: πηγές που απαιτούν περιοδική ανάκτηση (*polling*), ροές πραγματικού χρόνου (*streaming*) και σύνθετες εργασίες μετασχηματισμού (*batch processing*).

9.5.1 Πηγές περιοδικής ανάκτησης (Polling)

Η ανάκτηση δεδομένων από τη λίμνη δεδομένων Dremio και το Shiptech πραγματοποιείται μέσω περιοδικής δειγματοληψίας που ενορχηστρώνεται από Oban workers. Κάθε εργάτης υλοποιεί ένα μοτίβο *idempotent polling*: διατηρεί ένα σελιδοδείκτη (*bookmark*) `last_updated` ώστε να ανακτά μόνο τις νέες ή τροποποιημένες εγγραφές, αποφεύγοντας επαναλαμβανόμενη εισαγωγή.

Τα ερωτήματα Dremio εκτελούνται μέσω ODBC, εκμεταλλευόμενα τον προσαρμογέα ODBC του Erlang OTP. Τα αποτελέσματα επιστρέφονται ως *streaming cursor*, κατάλληλος για μεγάλα σύνολα δεδομένων (*datasets*) χωρίς να φορτώνεται ολόκληρο το σύνολο αποτελεσμάτων στη μνήμη. Ο χρονοπρογραμματισμός ακολουθεί ημερήσιο κύκλο για την πλειοψηφία των δεδομένων, με υψηλότερη συχνότητα για ευαίσθητες στον χρόνο ροές (πχ *vessel RoB*).

Το Dremio λειτουργεί ως ενοποιητικό στρώμα δεδομένων (*federated data layer*) για το Maersk enterprise data ecosystem: αντί να αποθηκεύει δεδομένα, δρομολογεί SQL queries σε υποκείμενα συστήματα (*data warehouses, data lakes, external databases*). Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα εκπομπών ανά δρομολόγιο, οι συντελεστές εμπορικής διαδρομής και τα κύρια δεδομένα πλοίων ανακτώνται μέσω ενιαίου SQL interface, ανεξάρτητα από το υποκείμενο σύστημα αποθήκευσης. Η αρχιτεκτονική αντίσταση (*architectural insulation*) που παρέχει το Dremio επιτρέπει στο σύστημά μας να παραμείνει αναλλοίωτο ακόμη και αν αλλάξει η υποκείμενη υποδομή του enterprise data platform.

9.5.2 Ροή δεδομένων (Streaming)

Η πραγματικού χρόνου ροή δεδομένων υλοποιείται μέσω Apache Kafka με την Erlang βιβλιοθήκη `:brod`. Εννέα αρχεία ολοκλήρωσης Kafka διαχειρίζονται θέματα (*topics*) που σχετίζονται με τηλεμετρία πλοίων (STAR Connect feeds) και ενημερώσεις εκπομπών.

Η κατανομή των διαμερισμάτων (*partitions*) ανά αριθμό IMO πλοίου εγγυάται διατήρηση της σειράς μηνυμάτων ανά σκάφος — προϋπόθεση σημαντική για σωστή χρονολογική εφαρμογή των μετρήσεων κατανάλωσης καυσίμου. Η διαχείριση των *offsets* επιτρέπει *idempotent processing*: αν ένας καταναλωτής αποτύχει και επανεκκινηθεί, επεξεργάζεται εκ νέου τα μηνύματα από το τελευταίο επιτυχώς δεσμευμένο *offset*.

Η επιλογή `:brod` (πελάτης Erlang για Kafka) αντί για βιβλιοθήκες αμιγώς σε Elixir (πχ `kafka_ex`) αντικατοπτρίζει την αρχιτεκτονική φιλοσοφία: η χρήση ώριμων, χαμηλού επιπέδου βιβλιοθηκών Erlang παρέχει αξιοπιστία και επιδόσεις που δεν απαιτούν βιβλιοθήκες περιτυλίγματος (*wrapper*). Το `:brod` επιτρέπει λεπτομερή (*fine-grained*) έλεγχο ανά καταναλωτή διαμερίσματος και υποστηρίζει εγγενές μοντέλο διεργασιών της Erlang για τη διαχείριση των καταναλωτών.

Αξίζει να σημειωθεί η αρχιτεκτονική επιλογή για *backpressure* (αντίθλιψη): η BEAM φυσικά περιορίζει τη ρυθμαπόδοση (*throughput*) μέσω *message queue sizing*. Αν ένας κατάντη

καταναλωτής δεν μπορεί να επεξεργαστεί μηνύματα αρκετά γρήγορα, η BEAM mailbox γεμίζει και ο παραγωγός επιβραδύνεται φυσικά — χωρίς πολύπλοκη υποδομή για περιορισμό ρυθμού (rate limiting). Αυτό απλοποιεί σημαντικά την αρχιτεκτονική σε σχέση με συστήματα βασισμένα σε JVM που απαιτούν ρητή διαχείριση αντίθλιψης.

9.5.3 Επεξεργασία εργασιών (Job Processing) και GenServer Director

Αφού τα ακατέργαστα δεδομένα ενσωματωθούν, ακολουθεί ένας αγωγός μετασχηματισμού: πρώτα αποθηκεύονται σε πίνακες σταδιοποίησης (staging) (πχ `RawOceanContainerMove`), εμπλουτίζονται με αναφορικά δεδομένα (δεδομένα πλοίων, συντελεστές εμπορικής διαδρομής, συντελεστές εκπομπών) και τελικά μεταφέρονται στους κύριους πίνακες.

Η διαχείριση των εργατών παρασκηνίου (background workers) υλοποιείται μέσω του `NrgWorker.Director`, ενός `GenServer` που παρακολουθεί αλλαγές διαμόρφωσης και εκκινεί ή τερματίζει εργάτες δυναμικά:

```
defmodule NrgWorker.Director do
  @moduledoc "Listens for worker config changes and starts/stops workers
  ↳ accordingly."

  use GenServer

  @spec start_link(keyword()) :: GenServer.on_start()
  def start_link(init_args \\ []) do
    GenServer.start_link(__MODULE__, init_args, name: __MODULE__)
  end

  @impl GenServer
  def init(_opts) do
    NrgWorker.Settings.subscribe(:worker_config)
    {:ok, [], {:continue, :apply_current_worker_config}}
  end

  @impl GenServer
  def handle_continue(:apply_current_worker_config, state) do
    NrgWorker.Settings.latest_worker_config() |> apply_config()
    {:noreply, state}
  end

  @impl GenServer
  def handle_info({:worker_config, :changed}, state) do
    NrgWorker.Settings.latest_worker_config() |> apply_config()
    {:noreply, state}
  end
end
```

```

# Starts and stops workers based on the contents of `new_config`
@spec apply_config(map()) :: :ok
defp apply_config(new_config) do
  Enum.each(new_config, fn {field, should_be_running?} ->
    if field in NrgWorker.worker_config_fields() do
      worker = NrgWorker.find_by_config_field(field)

      if should_be_running?,
        do: NrgWorker.start(worker, NrgWorker.Supervisor),
        else: NrgWorker.stop(worker)
    end
  end)

  :ok
end
end

```

Λήμμα 9.5.1: *NrgWorker.Director* GenServer — δυναμική διαχείριση εργατών μέσω συνδρομής (subscription) σε αλλαγές διαμόρφωσης.

Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση κάθε εργάτη σε χρόνο εκτέλεσης (run-time) χωρίς επανεκκίνηση της εφαρμογής — κρίσιμο για λειτουργική ευελιξία σε περιβάλλον παραγωγής. Ο Director εγγράφεται (subscribe) σε αλλαγές ρυθμίσεων και αντιδρά άμεσα, ακολουθώντας το BEAM μοτίβο της επικοινωνίας μέσω μηνυμάτων. Η χρήση `{:continue, :apply_current_worker_config}` στο `init/1` εξασφαλίζει ότι η αρχική διαμόρφωση εφαρμόζεται αμέσως μετά την εκκίνηση, χωρίς να μπλοκαριστεί ο supervisor.

9.6 Στρώμα ιστού (Web Layer)

Το στρώμα παρουσίασης βασίζεται αποκλειστικά σε Phoenix LiveView, επιτρέποντας διαδραστικές εμπειρίες χρήστη αποδιδόμενες στον διακομιστή (server-rendered) χωρίς JavaScript framework πλευράς πελάτη (client-side).

- **Eco Delivery:** Παρακολούθηση κατανομών ECO προϊόντων, έκδοση πιστοποιητικών, πίνακας (dashboard) επισκόπησης.
- **Energy Bank:** Διαχείριση λογαριασμών εκκαθάρισης, προβολή καταθέσεων/αναλήψεων, ισοζύγιο καυσίμων.
- **Emissions Data Inventory:** Αναζήτηση εκπομπών ανά πελάτη, εξαγωγή δεδομένων, ιστορικές αναφορές.
- **Admin:** Διαχείριση ρυθμίσεων συστήματος, διαμόρφωση εργατών, ρόλοι χρηστών.

Τα LiveView modules ακολουθούν το μοτίβο Humble Object: η παρουσίαση (mount/handle_event/render) διαχωρίζεται από την επιχειρησιακή λογική, την οποία εκχωρούν σε use case modules. Αυτό επιτρέπει αποτελεσματική δοκιμή της επιχειρησιακής λογικής ανεξάρτητα από το στρώμα ιστού (βλ. Κεφ. 10 για πρακτικές TDD).

Η ενσωμάτωση με το Maersk Design System (MDS) — μια βιβλιοθήκη Web Components — εξασφαλίζει οπτική συνέπεια με άλλες εφαρμογές του ομίλου. Τα συστατικά MDS χρησιμοποιούνται ως custom HTML elements εντός των Phoenix HEEEx templates, διατηρώντας τη διαχωριστική γραμμή μεταξύ περιεχομένου (Elixir) και παρουσίασης (MDS). Οι στατικοί πόροι (static assets) διαχειρίζονται από esbuild με Phoenix integration.

Η επικοινωνία μεταξύ συνεδριών χρηστών για πραγματικού χρόνου ενημερώσεις χρησιμοποιεί το Phoenix PubSub: όταν ένας εργάτης ολοκληρώνει μια εισαγωγή δεδομένων, ενημερώνει τις ενεργές συνεδρίες LiveView μέσω εκπομπής (broadcast), ώστε οι χρήστες να βλέπουν ενημερωμένα δεδομένα χωρίς χειροκίνητη ανανέωση.

Η αρχιτεκτονική επιλογή Phoenix LiveView αντί για SPA (Single Page Application) με React ή Vue έχει συγκεκριμένες επιπτώσεις στη δομή του κώδικα: ολόκληρη η λογική κατάστασης (*state management*) παραμένει στον διακομιστή, εξαλείφοντας την ανάγκη για συγχρονισμό κατάστασης πελάτη (client-state synchronization). Ο διακομιστής αποστέλλει ελάχιστα diffs HTML μέσω WebSocket αντί για φορτία JSON (payloads), μειώνοντας τη σύζευξη πελάτη-διακομιστή. Το κόστος αυτής της επιλογής είναι η υψηλότερη εξάρτηση από συνδεσιμότητα WebSocket — αποδεκτό κόστος για εταιρικούς χρήστες σε αξιόπιστα δίκτυα.

Επιπλέον, η χρήση LiveComponents για επαναχρησιμοποιήσιμα στοιχεία διεπαφής (UI) (πχ emissions summary cards, certificate status badges) εφαρμόζει την αρχή DRY εντός του στρώματος ιστού, μειώνοντας την επαναλαμβανόμενη λογική προτύπων. Κάθε LiveComponent διαχειρίζεται ανεξάρτητα την κατάσταση του, επιτρέποντας μερικές επανασχεδιάσεις (re-renders) χωρίς να ανανεώνεται ολόκληρη η σελίδα.

9.7 Αυθεντικοποίηση (Authentication) και Εξουσιοδότηση (Authorization)

Η ταυτοποίηση χρηστών βασίζεται σε SAML SSO μέσω Azure Active Directory. Κάθε χρήστης αυθεντικοποιείται μέσω του εταιρικού παρόχου ταυτότητας (identity provider) της Maersk, ενώ οι πληροφορίες ταυτότητας και ρόλων προέρχονται από ομάδες AD.

Η εξουσιοδότηση (*authorization*) υλοποιείται με ρόλους βασισμένους σε ομάδες Azure AD. Ομάδες όπως “SBTi Developers” ή “ECO Sales” αντιστοιχίζονται σε εσωτερικούς ρόλους της εφαρμογής. Στα LiveView mounts, ο έλεγχος ρόλων πραγματοποιείται με βοηθητικές μακροεντολές (helper macros) τύπου `with_authenticated_request(ctx, roles: ~ROLES(admin))`, παρέχοντας δηλωτικό (*declarative*) και επαναχρησιμοποιήσιμο έλεγχο πρόσβασης.

Για πρόσβαση σε περιβάλλον παραγωγής, χρησιμοποιείται Privileged Identity Management (PIM) της Azure — ένα σύστημα ακριβώς-έγκαιρης (just-in-time) πρόσβασης όπου ο χρήστης αιτείται ανύψωση προνομίων για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αυτό ελαχιστοποιεί την επιφάνεια επίθεσης σε περίπτωση παραβίασης λογαριασμού, και δημιουργεί ακριβές ίχνος ελέγχου κάθε πρόσβασης στα συστήματα παραγωγής — απαίτηση που προέκυψε άμεσα από τον εσωτερικό έλεγχο GIA του 2023 (βλ. Κεφ. 2.7).

Τα μυστικά της εφαρμογής (διαπιστευτήρια βάσεων δεδομένων, API keys) διαχειρίζονται

μέσω HashiCorp Vault, με AppRole authentication για τις διοχετεύσεις CI/CD. Ο διαχωρισμός μεταξύ μυστικών χρόνου εκτέλεσης (runtime, Vault) και μυστικών χρόνου κατασκευής (build-time, agenix) αντικατοπτρίζει την αρχιτεκτονική αρχή της ελάχιστης δυνατής έκθεσης κατά την κάθε φάση.

Αξιοσημείωτη αρχιτεκτονική λεπτομέρεια είναι η απουσία κατάστασης εξουσιοδότησης σε επίπεδο συνεδρίας: κάθε αίτημα LiveView επαληθεύει τη συνεδρία (*session*) και τα δικαιώματα ανεξάρτητα, αντί να εκχωρεί αποφάσεις εξουσιοδότησης σε προσωρινά αποθηκευμένη κατάσταση (*cached*). Αυτό προστατεύει από κατηγορία επιθέσεων όπου η ανάκληση δικαιωμάτων (πχ αποχώρηση χρήστη) δεν αντανακλάται άμεσα σε ενεργές συνεδρίες. Στο πλαίσιο του συστήματος αυτού, όπου οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε εμπιστευτικά οικονομικά δεδομένα πελατών, αυτή η προσέγγιση αποτελεί ορθή αρχιτεκτονική επιλογή.

9.8 Στρώμα μονιμότητας (Persistence Layer)

Η κεντρική αποθήκευση δεδομένων του συστήματος βασίζεται σε PostgreSQL Flexible Server στο Azure.

Η κρίσιμη αρχιτεκτονική απόφαση αφορά τη χρήση **πολλαπλών βάσεων δεδομένων** αντί ενός ενιαίου αποθετηρίου: κάθε πλαίσιο πεδίου (*domain context*) έχει δική του Ecto Repo. Αυτό επιτρέπει:

- **Απομόνωση σφαλμάτων** (*blast radius*): πρόβλημα στη βάση δεδομένων του Energy Bank δεν επηρεάζει άμεσα τις Ocean emissions.
- **Ανεξάρτητη κλιμάκωση**: κάθε βάση μπορεί να διαμορφωθεί ανεξάρτητα (*storage, compute, backup policy*).
- **Καθαρά όρια πεδίου** (**domain boundaries**): η αδυναμία foreign key constraints μεταξύ βάσεων αναγκάζει ρητή μοντελοποίηση των διαπλαισιακών σχέσεων στον κώδικα.

Η στρατηγική δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας (*backup strategy*) αξιοποιεί το Azure Data Protection με ημερήσιες και εβδομαδιαίες λήψεις αντιγράφων. Κρίσιμο στοιχείο είναι τα αυτοματοποιημένα εβδομαδιαία τεστ αποκατάστασης: ένα GitHub Actions workflow (*db-restore-from-backup.yml*) εκτελείται κάθε Παρασκευή, αποκαθιστά τη βάση δεδομένων σε δοκιμαστικό περιβάλλον και επαληθεύει την ακεραιότητα των δεδομένων. Αυτή η πρακτική, σπάνια σε πολλές οργανώσεις, εξασφαλίζει ότι το RTO (*Recovery Time Objective*) παραμένει μετρήσιμο και επαληθευμένο, και όχι θεωρητικό.

Οι μεταπτώσεις σχήματος ακολουθούν αρχή αντίστροφης συμβατότητας (*backward-compatible migrations only*): κάθε αλλαγή σχήματος πρέπει να είναι συμβατή με την προηγούμενη έκδοση κώδικα, επιτρέποντας αναπτύξεις χωρίς διακοπή (*zero-downtime*) με κυλιόμενη ενημέρωση pods.

Η χρήση Ecto ως ORM (αντικείμενο-σχεσιακός χαρτογράφος — *Object-Relational Mapper*) παρέχει τυπική ασφάλεια για ερωτήματα μέσω Ecto.Query DSL, ενώ τα Changesets εγγυώνται επικύρωση δεδομένων πριν από κάθε εγγραφή.

9.9 Προέλευση από συμβάντα (Event Sourcing) για την Energy Bank

Το υποσύστημα Energy Bank αποτελεί αρχιτεκτονικά το πιο σύνθετο τμήμα του συστήματος, επιλέγοντας το μοτίβο της προέλευσης από συμβάντα (*Event Sourcing*) σε συνδυασμό με *CQRS* (*Command Query Responsibility Segregation*). Η επιλογή αυτή δεν είναι τυχαία: το πρόβλημα της λογιστικής καυσίμων απαιτεί πλήρες ελεγκτικό ίχνος (*audit trail*), δυνατότητα αναπαραγωγής συμβάντων (*event replay*) για επαναυπολογισμό ισοζυγίων, και αμεταβλητότητα του ιστορικού — ιδιότητες που η προέλευση από συμβάντα παρέχει φυσικά.

Η αρχιτεκτονική ακολουθεί το μοτίβο $\text{Commands} \rightarrow \text{Aggregates} \rightarrow \text{Events} \rightarrow \text{Projections}$, υλοποιούμενο με τη βιβλιοθήκη *Commanded* και σύστημα αποθήκευσης (backend) *EventStore* (αποθήκευση ροής συμβάντων σε PostgreSQL).

Η δομή λειτουργεί ως εξής: ένα **Command** εκφράζει πρόθεση (πχ “ανάληψη ποσότητας ενέργειας”), επικυρώνεται και διαβιβάζεται στο αντίστοιχο **Aggregate** (*ClearingAccount*). Το Aggregate εφαρμόζει τους επιχειρησιακούς κανόνες (πχ ο λογαριασμός πρέπει να έχει επαρκές υπόλοιπο), και αν η επικύρωση επιτύχει, παράγει ένα **Event** (*EnergyWithdrawn*) που αποθηκεύεται αμετάβλητα στο *EventStore*. Τα Events τροφοδοτούν **Projections** — read models που υπολογίζουν τρέχουσα κατάσταση (πχ τρέχον υπόλοιπο clearing account).

Το παρακάτω λήμμα παρουσιάζει το Command και τον CommandHandler για ανάληψη ενέργειας:

```
defmodule EnergyBank.Application.Transactions.WithdrawEnergy do
  defmodule Command do
    use Ecto.Schema
    import Ecto.Changeset

    @fields [
      :transaction_id,
      :account_id,
      :amount,
      :withdrawn_at,
      :recorded_at
    ]

    @primary_key false
    embedded_schema do
      field :transaction_id, :string
      field :account_id, :string
      field :amount, :decimal
      field :withdrawn_at, :naive_datetime
      field :recorded_at, :naive_datetime
    end

    def new!(attrs) do
```

```

    %__MODULE__{}
    |> cast(attrs, @fields)
    |> validate_required(@fields)
    |> apply_action!(:new)
  end
end

defmodule CommandHandler do
  alias EnergyBank.Domain.Transactions.Withdrawal

  @behaviour Commanded.Commands.Handler

  @impl Commanded.Commands.Handler
  def handle(state, %Command{} = command) do
    Withdrawal.withdraw(state, command |> Map.from_struct())
  end
end
end

```

Λήμμα 9.9.1: `EnergyBank.Application.Transactions.WithdrawEnergy` — Command και `CommandHandler` για ανάληψη ενέργειας από clearing account.

Αξίζει να σημειωθεί η διαχωριστική γραμμή ευθύνης: το `Command` module χρησιμοποιεί `Ecto` για επικύρωση εισόδου (`cast`, `validate_required`), ενώ το `CommandHandler` αναθέτει την επιχειρησιακή λογική αποκλειστικά στο module πεδίου (domain) `Withdrawal.withdraw/2`. Ο `CommandHandler` δεν γνωρίζει τίποτα για βάσεις δεδομένων — εφαρμόζει Clean Architecture στο επίπεδο της προέλευσης από συμβάντα.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της προέλευσης από συμβάντα είναι η δυνατότητα *re-projection*: σε περίπτωση αλλαγής επιχειρησιακής λογικής (πχ νέος τρόπος υπολογισμού ισοζυγίου), το σύστημα μπορεί να επαναλάβει ολόκληρο το ιστορικό των συμβάντων και να δημιουργήσει εκ νέου τις projections. Αυτό παρέχει ασυνήθιστη ευελιξία για επιχειρησιακά συστήματα που εξελίσσονται παράλληλα με ρυθμιστικές αλλαγές (βλ. Κεφ. 6.3 για επιχειρησιακή περιγραφή).

Μια σημαντική αρχιτεκτονική πτυχή είναι η διαχείριση της τελικής συνέπειας (*eventual consistency*) μεταξύ commands και projections: όταν ένα command ολοκληρώνεται επιτυχώς, το αντίστοιχο συμβάν εγγράφεται στο `EventStore`, αλλά η projection ενδέχεται να μην έχει ακόμη ενημερωθεί. Σε σενάρια όπου το UI πρέπει να εμφανίσει αμέσως το αποτέλεσμα μιας ενέργειας, απαιτείται μηχανισμός `wait_until` που αναμένει την ενημέρωση της projection. Αυτό αποτελεί ένα από τα πιο λεπτά θέματα σχεδίασης σε συστήματα προέλευσης από συμβάντα, και η ομάδα το αντιμετωπίζει με ρητή επιλογή ανά λειτουργία: οι περισσότερες ροές διεπαφής αποδέχονται ελάχιστη καθυστέρηση, ενώ κρίσιμες λειτουργίες (πχ επαλήθευση υπολοίπου πριν από ανάληψη) χρησιμοποιούν σύγχρονη επαλήθευση.

Ο συνδυασμός CQRS με προέλευση από συμβάντα επιτρέπει επίσης ανεξάρτητη βελτιστοποίηση των διαδρομών ανάγνωσης/εγγραφής: οι διαδρομές εντολών (command paths) βελ-

τιστοποιούνται για συνέπεια και atomic writes, ενώ οι διαδρομές ερωτημάτων (projections) βελτιστοποιούνται για ταχύτητα ανάγνωσης. Για την Energy Bank, αυτό σημαίνει ότι οι αναφορές υπολοίπου των λογαριασμών εκκαθάρισης ανακτώνται από προϋπολογισμένα μοντέλα ανάγνωσης (read models), ενώ νέες καταθέσεις/αναλήψεις γράφουν αποκλειστικά στη ροή συμβάντων.

9.10 Αρχιτεκτονική παρατηρησιμότητας (Observability)

Η παρατηρησιμότητα (*observability*) αντιμετωπίζεται αρχιτεκτονικά, όχι ως εκ των υστέρων προσθήκη. Τα τρία επίπεδα — αρχεία καταγραφής (logs), μετρικές (metrics), ίχνη (traces) — ενσωματώνονται σε κάθε στρώμα του συστήματος, από το Phoenix request lifecycle ως τους Oban workers και τους καταναλωτές Kafka.

- **Αρχεία καταγραφής (Logs)** συλλέγονται μέσω Grafana Loki με LogQL για δομημένα ερωτήματα.
- **Μετρικές (Metrics)** ρέουν μέσω PromEx (βιβλιοθήκη Elixir για Prometheus) → Prometheus → Grafana dashboards.
- **Ίχνη (Traces)** προωθούνται μέσω OpenTelemetry σε OpenObserve (self-hosted instance, v0.14.4), με propagation context που διατρέπει αιτήματα HTTP, BEAM processes, ερωτήματα βάσης και Kafka messages. Αυτό επιτρέπει ανίχνευση μιας αίτησης από το LiveView mount ως τις εγγραφές βάσης δεδομένων.

Η στρατηγική alerting υλοποιείται ως κώδικας (*alerts-as-code*) σε YAML. Οι κανόνες ειδοποίησης ομαδοποιούνται σύμφωνα με διαφορετικά επίπεδα κρισιμότητας και χρονικούς ορίζοντες.

Ένας χαρακτηριστικός κανόνας ειδοποίησης που αφορά την ακεραιότητα των δεδομένων:

```
- name: NRG Energy Transition alerts
  interval: 1m
  rules:
    - alert: Too many concurrent requests to ETW
      expr: sum(nrg_etw_requests_count{app="nrg-workers"}) by(env) > 5
      for: 5m0s
      labels:
        hedwig_scope: nrg-errors-scope
      annotations:
        runbook_url: https://maersk-tools.atlassian.net/wiki/x/1l10iio
        summary: Too many current requests to ETW
        description: We've made too many concurrent requests to ETW in an
        ↪ environment.
```

Λήμμα 9.10.1: Κανόνας ειδοποίησης για ανίχνευση υπερβολικής παράλληλης φόρτωσης των εργατών External Trade Workbench (ETW).

Ο κανόνας αυτός αξιολογείται κάθε λεπτό και ενεργοποιείται αν εντοπιστούν περισσότερα από 5 ταυτόχρονα αιτήματα στο ETW για διάστημα 5 λεπτών. Η ετικέτα `hedwig_scope:nrg-errors-scope` δρομολογεί την ειδοποίηση μέσω Hedwig — εσωτερικό σύστημα ειδοποίησης της Maersk — σε κανάλια Teams και email.

Πέρα από τις τεχνικές ειδοποιήσεις (CrashLoopBackOff, cluster unreachability, non-200 spike), το σύστημα παρακολουθεί **επιχειρησιακές μετρικές**:

- Ο Ingestion Worker δεν έχει αναφέρει θετικό count εισαγωγής εντός 72 ωρών.
- Ο Enrichment Worker δεν έχει ολοκληρώσει εργασία εντός 6 ωρών.
- Δεδομένα πλοίων (*Vessel Voyage data*) πιο παλαιά από 49 ώρες.
- Ανεκχώρητες εκπομπές (*unallocated emissions*) άνω του 2%.
- Αποτυχία Energy Bank Projector.

Αυτή η πρακτική — ορισμός ορίων *freshness* (επικαιρότητας) για κρίσιμα για την επιχείρηση (business-critical) δεδομένα — αντανακλά την επιχειρησιακή ωριμότητα του συστήματος. Η ανίχνευση ενός μη ενημερωμένου (stale) ingestion worker δεν αποτελεί απλώς τεχνική ειδοποίηση, αλλά σηματοδοτεί πιθανή επίπτωση στην εγκυρότητα υπολογισμών εκπομπών — εγκυρότητα που κρίνεται από ρυθμιστικές αρχές και εξωτερικούς ελεγκτές.

Οι ειδοποιήσεις συνοδεύονται πάντα από *runbook URLs*, παρέχοντας στον μηχανικό εφευμερίας (on-call) βήμα-βήμα οδηγίες αποκατάστασης.

Η αρχιτεκτονική telemetry ακολουθεί το μοτίβο της βιβλιοθήκης Telemetry της Elixir: κάθε σημαντικό σημείο του συστήματος εκπέμπει επώνυμα συμβάντα (named events) (πχ `[ :nrg, :ocean, :emissions_calculation, :stop ]`) με μετρήσεις και metadata. Η βιβλιοθήκη PromEx συνδέεται αυτόματα σε Phoenix, Ecto και Oban telemetry events, δημιουργώντας Prometheus metrics χωρίς χειροκίνητη εντοργάνωση. Για προσαρμοσμένες επιχειρησιακές μετρικές (πχ `nrg_etw_requests_count`, `nrg_worker_ingestion_sum`), η ομάδα ορίζει ρητά telemetry events στα κατάλληλα σημεία του κώδικα.

Η κατανεμημένη ιχνηλάτηση μέσω OpenTelemetry παρέχει ένα πλήρες ίχνος για κάθε αίτημα χρήστη: από το LiveView event handler, μέσω use cases και gateways, ως τα ερωτήματα SQL και τα Kafka messages. Αυτό επιτρέπει διάγνωση σημείων συμφόρησης επιδόσεων (performance bottlenecks) που δεν εντοπίζονται από μετρικές μόνο — πχ αν ένα συγκεκριμένο ερώτημα αργεί μόνο για συγκεκριμένους πελάτες με μεγάλο αριθμό κινήσεων εμπορευματοκιβωτίου. Η αρχιτεκτονική παρατηρησιμότητας συνδέεται άμεσα με τις τεχνολογικές επιλογές που αναλύονται στο Κεφ. 8.

9.11 Τοπολογία ανάπτυξης (Deployment Topology)

Η τοπολογία ανάπτυξης αντικατοπτρίζει τις αρχές της διαθεσιμότητας, της κλιμάκωσης και της απλότητας λειτουργίας.

Εισερχόμενη κυκλοφορία (traffic) ακολουθεί την αλυσίδα: Akamai CDN → Stargate (εσωτερική πύλη API της Maersk) → Azure Kubernetes Service ingress controller

→ Kubernetes pods. Το Akamai παρέχει DDoS προστασία και global routing, ενώ το Stargate επιβάλλει εταιρικές πολιτικές ασφαλείας και περιορισμό ρυθμού (rate limiting).

Kubernetes pods οργανώνονται σε δύο τύπους:

- **3 αντίγραφα διακομιστή ιστού (web server replicas)**: εξυπηρέτηση HTTP/WebSocket κυκλοφορίας, Phoenix LiveView connections, λήψεις πιστοποιητικών.
- **1 pod εργάτη (worker)**: επεξεργασία παρασκηνίου — Oban jobs, καταναλωτές Kafka, Nrg Worker processes που διαχειρίζεται ο Director.

Ο διαχωρισμός web/worker επιτρέπει ανεξάρτητη κλιμάκωση: αν ο αριθμός των εργατών παρασκηνίου χρειαστεί αύξηση, αλλάζει ο αριθμός αντιγράφων του pod εργάτη χωρίς να επηρεαστεί το στρώμα ιστού.

Κυλιόμενες αναπτύξεις (rolling deployments) αποτελούν τον τρόπο ενημέρωσης: το Kubernetes αντικαθιστά σταδιακά τα pods ένα-ένα, εξασφαλίζοντας ότι κάποια αντίγραφα παραμένουν διαθέσιμα καθ' όλη τη διάρκεια. Αυτό, σε συνδυασμό με backward-compatible migrations (βλ. 9.8), επιτρέπει αναπτύξεις χωρίς διακοπή (zero-downtime) — σημαντικό για ένα σύστημα με 1.300 ενεργούς χρήστες.

Η ανάπτυξη εκτελείται μέσω ενός προσαρμοσμένου k8s binary, περιτυλίγματος (wrapper) πάνω σε `kubectl` κατασκευασμένου με Nix, που ενσωματώνει εταιρικές πρακτικές ανάπτυξης. Τα GitHub Actions workflows αυτοματοποιούν τον κύκλο κατασκευής → δοκιμή → ανάπτυξη (βλ. Κεφ. 8 για τεχνολογίες CI/CD).

Το σύστημα λειτουργεί σε δύο ανεξάρτητα περιβάλλοντα: *staging* για επαλήθευση πριν την παραγωγή, και *production* για τους τελικούς χρήστες. Η δομή infrastructure-as-code (Terraform) εξασφαλίζει ότι και τα δύο περιβάλλοντα είναι ισοδύναμα, αποτρέποντας το “works on staging, fails in production” σύνδρομο.

Η ροή ανάπτυξης ακολουθεί trunk-based development: ο κώδικας συγχωνεύεται στον κλάδο `main`, η διοχέτευση CI επικυρώνει (κατασκευή, δοκιμές, σάρωση ασφαλείας), και στη συνέχεια γίνεται αυτόματη ανάπτυξη στο *staging*, ακολουθούμενη — μετά από επιβεβαίωση — από ανάπτυξη στο *production*. Η διαδικασία είναι ελαφριά και αυτοματοποιημένη, με ελάχιστη χειροκίνητη παρέμβαση. Αυτή η υψηλή συχνότητα αναπτύξεων — χαρακτηριστική των πρακτικών XP (βλ. Κεφ. 10) — απαιτεί ισχυρή αυτοματοποίηση, αξιόπιστες σουίτες δοκιμών και backward-compatible migrations, τρεις αρχιτεκτονικές ιδιότητες που αποτελούν προτεραιότητα.

9.12 Αποκατάσταση από καταστροφή (Disaster Recovery) και αναπαραγωγικότητα

Η αρχιτεκτονική αναπαραγωγικότητας του συστήματος βασίζεται σε τρεις αλληλοσυμπληρούμενες αρχές: υποδομή ως κώδικας, αναπαραγώγιμες κατασκευές (*reproducible builds*) και δοκιμασμένη αποκατάσταση.

Υποδομή ως κώδικας μέσω Terraform: Ολόκληρη η υποδομή Azure (databases, AKS cluster, storage accounts, networking) ορίζεται σε αρχεία `.tf`. Σε περίπτωση καταστροφικής αποτυχίας, η υποδομή μπορεί να ανοικοδομηθεί από μηδενική βάση εκτελώντας `terraform apply`.

Αναπαραγώγιμες κατασκευές μέσω Nix: Το `flake.nix` ορίζει κλειδωμένες (*locked*) εξαρτήσεις για όλα τα εργαλεία ανάπτυξης, εξασφαλίζοντας ότι κάθε μέλος της ομάδας και κάθε CI runner χρησιμοποιεί ακριβώς την ίδια έκδοση εργαλείων. Αυτό εξαλείφει μια ολόκληρη κατηγορία σφαλμάτων (“it works on my machine”) και απλοποιεί σημαντικά την ένταξη (*onboarding*) νέων μελών.

Δοκιμασμένη αποκατάσταση βάσης δεδομένων: Εβδομαδιαία αυτοματοποιημένη επαλήθευση αντιγράφων ασφαλείας μέσω του workflow `db-restore-from-backup.yml`. Η αποκατάσταση χρησιμοποιεί *Point-In-Time Recovery (PITR)* της Azure, επιτρέποντας επαναφορά της βάσης σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο εντός του παραθύρου διατήρησης.

Τα ενδεικτικά μεγέθη αποκατάστασης εκτιμώνται ως εξής:

- **RTO (Recovery Time Objective):** Υποδομή ~2 ώρες (Terraform apply), εφαρμογή ~30 λεπτά (Kubernetes deploy), βάση δεδομένων από PITR ~1 ώρα.
- **RPO (Recovery Point Objective):** Ελάχιστη απώλεια δεδομένων λόγω PITR και continuous backups.

Σε σενάρια μερικής αποτυχίας (πχ αποτυχία ενός pod), το Kubernetes αντιμετωπίζει αυτόματα την κατάσταση μέσω ελέγχων υγείας (*health checks*) και αντικατάσταση pods. Οι ειδοποιήσεις `CrashLoopBackOff` (διάστημα 30 δευτερολέπτων) εξασφαλίζουν ότι η ομάδα ειδοποιείται άμεσα για επανεκκινούμενα pods, ενώ τα runbooks παρέχουν δομημένη διαδικασία διερεύνησης και αποκατάστασης.

Η συνολική αρχιτεκτονική αναπαραγωγικότητας υπηρετεί και σκοπούς ελέγχου: ο εσωτερικός έλεγχος GIA του 2023 (βλ. Κεφ. 2.7) έθεσε ρητά απαιτήσεις για *audit trail*, *data tracking* και *reproducibility*. Το συνδυασμένο χαρτοφυλάκιο προέλευσης από συμβάντα (Energy Bank), immutable migrations, automated backup tests και Terraform IaC παρέχει τεχνικές εγγυήσεις για κάθε μια από αυτές τις απαιτήσεις.

Αξίζει τέλος να σημειωθεί η ευρύτερη αρχιτεκτονική φιλοσοφία που διαπερνά το σύστημα: η επιλογή ώριμων, καλά κατανοητών τεχνολογιών (PostgreSQL, Kafka, Kubernetes, Terraform) αντί για λύσεις αιχμής (*cutting-edge*) μειώνει τον λειτουργικό κίνδυνο σε ένα σύστημα κρίσιμο για την παραγωγή.

Κεφάλαιο 10 — Εργασιακές μέθοδοι

Η ανάπτυξη του Πάγκου Εργασίας Εκπομπών δεν είναι μόνο ζήτημα τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών επιλογών. Εξίσου κρίσιμη για την επιτυχία του εγχειρήματος αποδείχθηκε η οργάνωση της καθημερινής εργασίας της ομάδας: ο τρόπος με τον οποίο οι προγραμματιστές συνεργάζονται, ελέγχουν τον κώδικά τους, παραδίδουν λογισμικό στους χρήστες και μεταδίδουν γνώση μεταξύ τους. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφουμε το σύνολο των εργασιακών μεθόδων που υιοθέτησε η ομάδα, εξηγούμε την αιτιολογία της κάθε επιλογής και παρουσιάζουμε εμπειρικά αποτελέσματα.

10.1 Agile και Extreme Programming

Ιστορικό και φιλοσοφία

Το Extreme Programming (XP) διατυπώθηκε από τον Kent Beck στο βιβλίο “Extreme Programming Explained” (1999) ως απάντηση στην πεποίθηση ότι οι καλές πρακτικές μηχανικής λογισμικού — έλεγχος, συνεργασία, ανατροφοδότηση — αξίζει να εφαρμόζονται στο «ακραίο» τους όριο. Αν ο έλεγχος είναι καλός, γράψε τεστ για τα πάντα. Αν η αναθεώρηση κώδικα είναι χρήσιμη, κάνε την συνεχώς μέσω pairing. Αν η συνεχής ολοκλήρωση μειώνει τα προβλήματα, τότε να ολοκληρώνεις κώδικα πολλές φορές την ημέρα.

Οι πέντε αξίες που διέπουν το XP είναι: **Communication** (επικοινωνία ως κύρια μηχανή επίλυσης προβλημάτων), **Simplicity** (ο απλούστερος κώδικας που λειτουργεί), **Feedback** (γρήγορη ανατροφοδότηση σε κάθε κλίμακα), **Courage** (θάρρος να αλλάξεις κώδικα, να πεις όχι σε περιττές απαιτήσεις, να παραδεχτείς ένα λάθος) και **Respect** (σεβασμός μεταξύ μελών της ομάδας και προς τον χρήστη).

Οι 12 πρακτικές XP

Το XP ορίζει δώδεκα βασικές πρακτικές, οι οποίες λειτουργούν ως ένα αλληλοενισχυόμενο σύστημα:

1. **Planning Game** — σχεδιασμός της επόμενης επανάληψης βάσει προτεραιοτήτων χρήστη και εκτίμησης ομάδας

2. **Small Releases** — παράδοση μικρών, αξιόπιστων αυξήσεων λειτουργικότητας σε τακτά διαστήματα
3. **Metaphor** — κοινή γλώσσα για την αρχιτεκτονική του συστήματος, κατανοητή από τεχνικούς και μη
4. **Simple Design** — ο κώδικας που υπάρχει εκείνη τη στιγμή πρέπει να είναι ο απλούστερος δυνατός
5. **Testing** — αυτοματοποιημένα τεστ για κάθε νέα συμπεριφορά, γραμμένα προτού ο κώδικας παραγωγής
6. **Refactoring** — συνεχής βελτίωση της δομής του κώδικα χωρίς αλλαγή συμπεριφοράς
7. **Pair Programming** — δύο προγραμματιστές, ένας υπολογιστής, συνεχής συνεργασία
8. **Collective Ownership** — κάθε μέλος της ομάδας μπορεί να αλλάξει οποιοδήποτε κομμάτι κώδικα
9. **Continuous Integration** — ολοκλήρωση και δοκιμή κώδικα πολλές φορές ημερησίως
10. **40-Hour Week** — βιώσιμος ρυθμός εργασίας, χωρίς χρόνιες υπερωρίες
11. **On-site Customer** — εκπρόσωπος του χρήστη διαθέσιμος για ερωτήσεις και ανατροφοδότηση
12. **Coding Standards** — κοινά πρότυπα κώδικα που επιτρέπουν τη συλλογική ιδιοκτησία (collective ownership)

Σύγκριση με Scrum και επιλογή XP

Το Scrum, η πιο διαδεδομένη ευέλικτη (agile) μεθοδολογία, εστιάζει στη διαχείριση έργου μέσω sprints, ρόλων (Scrum Master, Product Owner) και τελετών (ceremonies) (sprint planning, retrospective, review). Το XP, αντίθετα, δίνει έμφαση στις **τεχνικές πρακτικές μηχανικής** και αφήνει μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση.

Η ομάδα επέλεξε XP αντί Scrum για τρεις κυρίους λόγους: πρώτον, οι τεχνικές πρακτικές (TDD, εργασία σε ζεύγη, CI/CD) ήταν μη διαπραγματεύσιμη προϋπόθεση για την ποιότητα του κώδικα. Δεύτερον, το Scrum εισάγει επιπρόσθετες τελετές (overhead) που σε μια μικρή, συνεκτική ομάδα μπορούν να αντικατασταθούν από πιο ελαφριές συνήθειες. Τρίτον, το XP αρμόζει ιδιαίτερα σε έργα με μεταβαλλόμενες απαιτήσεις — ακριβώς η περίπτωση ενός συστήματος που αναπτύσσεται παράλληλα με τη διαμόρφωση της ίδιας της κανονιστικής πραγματικότητας γύρω από τις εκπομπές CO₂.

10.2 Pair Programming

Ρόλοι και ρυθμός

Η πρακτική του pair programming τοποθετεί δύο προγραμματιστές μπροστά σε έναν υπολογιστή, με σαφή διαχωρισμό ρόλων. Ο **οδηγός** (driver) κρατά τον έλεγχο του πληκτρολογίου και λαμβάνει τακτικές αποφάσεις χαμηλού επιπέδου: πώς ακριβώς να γράφει μια συνάρτηση, ποια δομή δεδομένων να χρησιμοποιηθεί, πώς να κληθεί ένα εξωτερικό API. Ο

πλοηγός (navigator) κρατά την αφηρημένη εικόνα: τι προβλήματα πρέπει να λυθούν, αν η κατεύθυνση είναι σωστή, πού μπορεί να κρύβεται ένα λάθος. Οι ρόλοι εναλλάσσονται συχνά — από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες — ανάλογα με τις ανάγκες του ζεύγους.

Η ομάδα στοχεύει σε προγραμματισμό σε ζεύγη για το 100% του χρόνου ανάπτυξης. Στην πράξη, υπάρχουν στιγμές που κάποιος εργάζεται μόνος (ασθένεια, ανεξάρτητη εξερεύνηση, διαδικαστικές εργασίες), αλλά η επεξεργασία κώδικα παραγωγής γίνεται σχεδόν αποκλειστικά σε ζεύγη.

Εργαλεία σε κατανομημένο περιβάλλον

Καθώς η ομάδα είναι κατανομημένη σε Δανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Πορτογαλία και Ινδία, η εργασία σε ζεύγη δεν μπορεί να βασίζεται στη φυσική παρουσία. Το κύριο εργαλείο είναι το **Tuple**, μια εφαρμογή σχεδιασμένη ειδικά για απομακρυσμένο προγραμματισμό σε ζεύγη (remote pair programming) που παρέχει εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση στη διάδραση.

Mob/Ensemble Programming

Για σύνθετα ζητήματα αρχιτεκτονικού ή σχεδιαστικού χαρακτήρα, η ομάδα χρησιμοποιεί **ensemble programming** (γνωστό και ως mob programming): τρία ή περισσότερα μέλη δουλεύουν ταυτόχρονα στο ίδιο πρόβλημα. Αυτή η πρακτική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν μια απόφαση θα επηρεάσει πολλά μέρη του κώδικα, ή όταν υπάρχει ανάγκη για ταχεία μεταφορά γνώσης (rapid knowledge transfer) σχετικά με ένα νέο σύστημα ή τεχνολογία.

Εμπειρικά αποτελέσματα και αντιμετώπιση κριτικής

Η πιο συχνή αντίρρηση στο pair programming είναι ότι «σπαταλάει» πόρους: δύο άτομα για δουλειά που μπορεί να κάνει ένα. Η εμπειρία της ομάδας, συγκρίνοντας περιόδους με και χωρίς εργασία σε ζεύγη (μετρώντας ιστορίες χρήστη ανά ημέρα σε παρόμοια χρονικά διαστήματα), έδειξε το αντίθετο: ο προγραμματισμός σε ζεύγη αύξησε την παραγωγικότητα. Η εξήγηση είναι πολυδιάστατη: λιγότερα σφάλματα (bugs) που χρειάζονται διόρθωση, λιγότερος χρόνος στην επιθεώρηση κώδικα, λιγότερες παρεξηγήσεις απαιτήσεων λόγω άμεσης επικοινωνίας, και ουσιαστική εξάλειψη των «σιλό» γνώσης που επιβραδύνουν κάθε ομάδα όπου κάθε κομμάτι κώδικα ξέρει μόνο ένα άτομο.

Επιπλέον, η παρουσία του δεύτερου ατόμου αποτελεί de facto διαρκή επιθεώρηση κώδικα. Λάθη εντοπίζονται τη στιγμή που γράφονται, όχι μέρες αργότερα σε ένα αίτημα ενσωμάτωσης (pull request).

10.3 TDD — Test Driven Development

Red-Green-Refactor

Ο κύκλος TDD συνοψίζεται στη φράση του Kent Beck από το βιβλίο “Test-Driven Development: By Example” (2002): “Make it work, make it right, make it fast.” Ο κύ-

κλος ακολουθεί τρία βήματα που επαναλαμβάνονται συνεχώς:

1. **Red:** Γράψε ένα τεστ που εκφράζει τη νέα επιθυμητή συμπεριφορά. Το τεστ αποτυγχάνει, διότι ο κώδικας παραγωγής δεν έχει γραφεί ακόμα.
2. **Green:** Γράψε τον ελάχιστο κώδικα που κάνει το τεστ να περνά.
3. **Refactor:** Βελτίωσε τη δομή του κώδικα χωρίς να αλλάξεις τη συμπεριφορά. Τα τεστ εξασφαλίζουν ότι η βελτίωση δεν έσπασε τίποτα.

Η σειρά αυτή είναι κρίσιμη: ο κώδικας παραγωγής δεν γράφεται ποτέ προτού υπάρχει αποτυχημένο τεστ. Ο στόχος του κώδικα είναι να είναι όσο απλούστερος γίνεται ώστε να περάσει το τεστ, χωρίς **καμία** επιπλέον λειτουργία. Έτσι το τεστ αποτελεί τον ορισμό της συμπεριφοράς του κώδικα, ενώ επιτυγχάνεται πραγματική 100% κάλυψη σε λογικό επίπεδο (όχι απλά σε επίπεδο εκτέλεσης μονοπατιού / code path).

Πυραμίδα δοκιμών (Test Pyramid)

Η βάση κώδικα οργανώνει τα τεστ σε ιεραρχία:

- **Δοκιμές μονάδας (Unit tests):** Ελέγχουν μεμονωμένες συναρτήσεις ή modules σε απομόνωση, τρέχουν σε χιλιοστά του δευτερολέπτου.
- **Δοκιμές ολοκλήρωσης (Integration tests):** Ελέγχουν την αλληλεπίδραση μεταξύ modules ή με πραγματική βάση δεδομένων.
- **Δοκιμές αποδοχής (Acceptance tests):** Ελέγχουν ολόκληρες ροές χρήστη μέσω της διεπαφής, συνήθως με πραγματική συνεδρία LiveView.
- **Δοκιμές βάσει ιδιοτήτων (Property-based tests):** Με τη βιβλιοθήκη ExUnitProperties, η ομάδα γράφει τεστ που επαληθεύουν ιδιότητες (properties) για χιλιάδες αυτόματα παραγόμενες εισόδους. Αυτά τα τεστ δεν έχουν προκαθορισμένα δεδομένα, αλλά μια λίστα ιδιοτήτων που περιγράφουν την πηγή και τα παράγωγα του κώδικα. Κατά συνέπεια μπορούν να εξετάζουν αυτόματα πάρα πολλές παραλλαγές εισόδου και εξόδου, με στόχο την εύρεση αντιπαραδείγματος για την καλή λειτουργία του συστήματος.

Κουλτούρα κάλυψης δοκιμών (test coverage)

Με αρχεία τεστ που καλύπτουν περίπου το 80% του συνολικού κώδικα, η ομάδα διατηρεί υψηλή κάλυψη ως μη διαπραγματεύσιμη αρχή. Τα τεστ δημιουργούν εμπιστοσύνη που επιτρέπει τις συχνές παραδόσεις ανά ημέρα χωρίς φόβο παλινδρόμησης.

Λήμμα 10.3.1: Δοκιμή αποδοχής (Acceptance Test) LiveView

Το ακόλουθο απόσπασμα από το αρχείο `ocean_simulator_live_test.exs` δείχνει τον τρόπο με τον οποίο γράφονται δοκιμές αποδοχής για σελίδες LiveView. Τα πέντε τεστ του πρώτου `describe` block ελέγχουν διαφορετικές πτυχές της αρχικής κατάστασης της σελίδας

— τίτλο, φόρμα, επιλογές προϊόντων, επιλεγμένο έτος — αποτυπώνοντας με σαφήνεια τις προδιαγραφές του χαρακτηριστικού:

```
defmodule NrgWeb.OceanSimulatorLiveTest do
  # @related [impl](lib/nrg_web/live/ocean_simulator_live.ex)

  use NrgTest.ConnCase, async: true
  alias HtmlQuery, as: Hq
  alias NrgTest.Support.Fixtures

  describe "when the user initially visits the page" do
    setup ctx, do: with_authenticated_request(ctx, roles: ~ROLES(admin))

    test "it defaults to the latest year", %{conn: conn} do
      given_tradelane_factors(year: 1900)
      given_tradelane_factors(year: 2040)

      {:ok, _view, html} = live(conn, ~p"/ocean-simulator")

      [selected_year] = html |> Hq.all("#date option[selected]") |>
        ↪ Enum.map(&Hq.attr(&1, "value"))
      assert selected_year == "2040"
    end

    test "they see a pleasant title", %{conn: conn} do
      {:ok, _view, html} = live(conn, ~p"/ocean-simulator")

      actual_title = html |> Hq.find("h1") |> Hq.text()

      assert actual_title == "Ocean Emissions Simulator"
    end

    test "they see a happy little form", %{conn: conn} do
      {:ok, _view, html} = live(conn, ~p"/ocean-simulator")

      assert html |> Hq.find("form")
    end

    test "they can simulate emissions for simulatable products", %{conn: conn} do
      {:ok, _view, html} = live(conn, ~p"/ocean-simulator")

      options = html |> Hq.all("form #product_id option") |> Enum.map(&Hq.text/1)

      assert options == ["EC3", "EC0", "EC2", "EC4", "EC5", "ECM"]
    end
  end
end
```

```
describe "simulating the results of" do
  setup ctx, do: with_authenticated_request(ctx, roles: ~ROLES(admin))
  setup :provide_emissions_factors!

  test "ocean delivery using the ECO product", %{conn: conn, year: year} do
    {:ok, view, _html} = live(conn, ~p"/ocean-simulator")
    simulated_results = simulate_emissions(view, "eco1", year) |>
    ↪ simulation_results()
```

Αξιοσημείωτο είναι πώς κάθε τεστ εκφράζει ξεκάθαρα **μία** προδιαγραφή, με ονόματα που λειτουργούν ως έγγραφο απαιτήσεων (“it defaults to the latest year”, “they see a pleasant title”). Η χρήση του module `HtmlQuery` επιτρέπει ερωτήσεις στο παραγόμενο HTML με επιλογείς CSS (selectors), καθιστώντας τα τεστ ευανάγνωστα ακόμα και από μη-τεχνικούς αναγνώστες.

10.4 Συνεχής Ενσωμάτωση / Συνεχής Παράδοση (Continuous Integration / Continuous Delivery)

Ανάπτυξη βασισμένη στον κορμό (Trunk-based Development)

Η ομάδα τηρεί αυστηρά το μοντέλο **trunk-based development**: υπάρχει ένας και μόνο κλάδος (`main`) στον οποίο όλοι οι προγραμματιστές ολοκληρώνουν τον κώδικά τους πολλές φορές ημερησίως. Δεν υπάρχουν μακρόβιοι κλάδοι λειτουργιών (feature branches) που αποκλίνουν για μέρες ή εβδομάδες. Αυτό εξασφαλίζει ότι ανά πάσα στιγμή ο κώδικας στο `main` είναι η πιο πρόσφατη κατάσταση του συστήματος και ότι αποφεύγονται οι επίπονες συγχωνεύσεις (merge conflicts) που συσσωρεύονται σε μακρόβιους κλάδους.

Η πρακτική αυτή βασίζεται στην αρχή που περιγράφουν οι Humble & Farley στο “Continuous Delivery” (2010): κάθε υποβολή (commit) στον κορμό πρέπει να είναι δυνητικά παραδόσιμη στην παραγωγή. Αυτό απαιτεί την ύπαρξη αξιόπιστης σουίτας τεστ και αυτοματοποιημένης διοχέτευσης.

Ρυθμός παραδόσεων

Η συχνότητα παραδόσεων είναι κατά μέσο όρο **32 παραδόσεις (deploys) ανά ημέρα** στο περιβάλλον παραγωγής. Αυτός ο ρυθμός — περίπου μία παράδοση ανά 15 λεπτά κατά τη διάρκεια της εργάσιμης ημέρας — καθιστά κάθε αλλαγή μικρή και αναστρέψιμη. Αντί να «φυλάσσονται» αλλαγές για μια μεγάλη έκδοση, κάθε νέα λειτουργικότητα φτάνει στους χρήστες μόλις ολοκληρωθεί.

GitHub Actions και κατηγορίες ροών εργασίας (Workflows)

Η αυτοματοποίηση του CI/CD βασίζεται στο GitHub Actions με προσαρμοσμένο NixOS runner για επαναληψιμότητα και ταχύτητα (βλ. Κεφ. 8.11). Οι ροές εργασίας οργανώνονται

σε κατηγορίες:

- **Build/Test:** `emissions-workbench.yml`, `bops.yml` — εκτελούν τη σουίτα τεστ και το build για κάθε push
- **Security:** `iac-scan.yml` με Checkov για Infrastructure as Code scanning, Prisma Cloud SAST για στατική ανάλυση κώδικα
- **Cache:** `cache-send.yml`, `cache-build-image.yml` — διαχείριση Nix store cache για μείωση χρόνου build
- **Database:** `db-restore-from-backup.yml` — εβδομαδιαία αποκατάσταση βάσης δεδομένων κάθε Παρασκευή για επαλήθευση των backups
- **Infrastructure:** `deploy-openobserve.yaml`, `repave-github-runner.yml` — deployment observability stack και ανανέωση runner
- **Notifications:** `teams-notify.yml` — ειδοποιήσεις στο Microsoft Teams για κρίσιμα γεγονότα

Ανίχνευση επηρεαζόμενων (Affected Workspace) και τμηματικές κατασκευές (Incremental Builds)

Για τη βελτίωση της ταχύτητας, το CI αξιοποιεί ανίχνευση επηρεαζόμενων χώρων εργασίας (affected workspace detection): μόνο τα συστατικά που έχουν αλλάξει (ή εξαρτώνται από αυτά που άλλαξαν) επαναχτίζονται και δοκιμάζονται. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ένα ενιαίο αποθετήριο με πολλά ανεξάρτητα συστατικά.

Επαναφορά (Rollback)

Σε περίπτωση προβλήματος στην παραγωγή, η πολιτική επαναφοράς είναι απλή: ανάστροφη αλλαγή (revert) της προβληματικής υποβολής (commit) ή αιτήματος ενσωμάτωσης (PR), που δημιουργεί νέα υποβολή στο main και εκκινεί νέα ανάπτυξη μέσω της κανονικής διοχέτευσης. Δεν υπάρχουν ειδικές διαδικασίες «επαναφοράς» — η ίδια η παράδοση είναι ο μηχανισμός αποκατάστασης.

10.5 Κάθετη ιδιοκτησία (Vertical Ownership)

Έννοια και εφαρμογή

Η κατακόρυφη ιδιοκτησία (vertical ownership) σημαίνει ότι μια ομάδα κατέχει και είναι υπεύθυνη για ολόκληρο το κατακόρυφο «στρώμα» του συστήματος — από τις υποδομές cloud και το δίκτυο μέχρι τη βάση δεδομένων, τον κώδικα παραγωγής και τη διεπαφή χρήστη. Αντί να βασίζεται σε εξειδικευμένες οριζόντιες ομάδες (SRE team για τις υποδομές, DBA team για τις βάσεις δεδομένων, InfoSec team για την ασφάλεια), η ομάδα αντιμετωπίζει αυτές τις ανάγκες εσωτερικά.

Συγκεκριμένα η ομάδα είναι υπεύθυνη για:

- Πύθμιση εικονικού υλικού στο Azure (Kubernetes clusters, virtual machines)

- Παραμετροποίηση δικτύου και ασφαλείας (firewall rules, ingress controllers, TLS)
- Σχεδιασμό και διαχείριση βάσεων δεδομένων (schema design, migrations, backups)
- Τη βάση κώδικα και τον κύκλο CI/CD
- Observability και alerting (μέσω Grafana, OpenObserve, Hedwig)
- Σχεδιασμό και υλοποίηση της διεπαφής χρήστη

Πλεονεκτήματα

Το κύριο πλεονέκτημα είναι η **ταχύτητα**: η ομάδα δεν χρειάζεται να περιμένει άλλη ομάδα για να κάνει μια αλλαγή στην υποδομή, να ανοίξει ένα δελτίο (ticket) σε εξωτερικό DBA, ή να ζητήσει από το InfoSec team να αξιολογήσει μια αλλαγή. Αυτή η αυτονομία συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό των 32 αναπτύξεων ανά ημέρα: δεν υπάρχουν εξωτερικά σημεία συμφόρησης (bottlenecks) στον κύκλο παράδοσης.

Επιπλέον, η ομάδα αναπτύσσει βαθιά κατανόηση του ολόκληρου του συστήματος — όταν εμφανίζεται ένα πρόβλημα στην παραγωγή, δεν χρειάζεται να «μεταφερθεί» μεταξύ ομάδων, αλλά μπορεί να αντιμετωπιστεί άμεσα.

Μειονεκτήματα και αντιμετώπισή τους

Το κύριο μειονέκτημα είναι το **γνωσιακό φορτίο (cognitive load)**: κάθε μέλος της ομάδας πρέπει να είναι σε θέση να εργαστεί σε πολύ διαφορετικά στρώματα — από Terraform για την υποδομή ως CSS για τη διεπαφή. Αυτό απαιτεί πλατύτερη γνώση αλλά ενδεχομένως λιγότερο βάθος εξειδίκευσης σε κάθε τομέα. Στη βιβλιογραφία, η δομή αυτή περιγράφεται ενίοτε ως “T-shaped skills”: βάθος σε ένα κύριο τομέα, με ευρύτητα σε πολλούς.

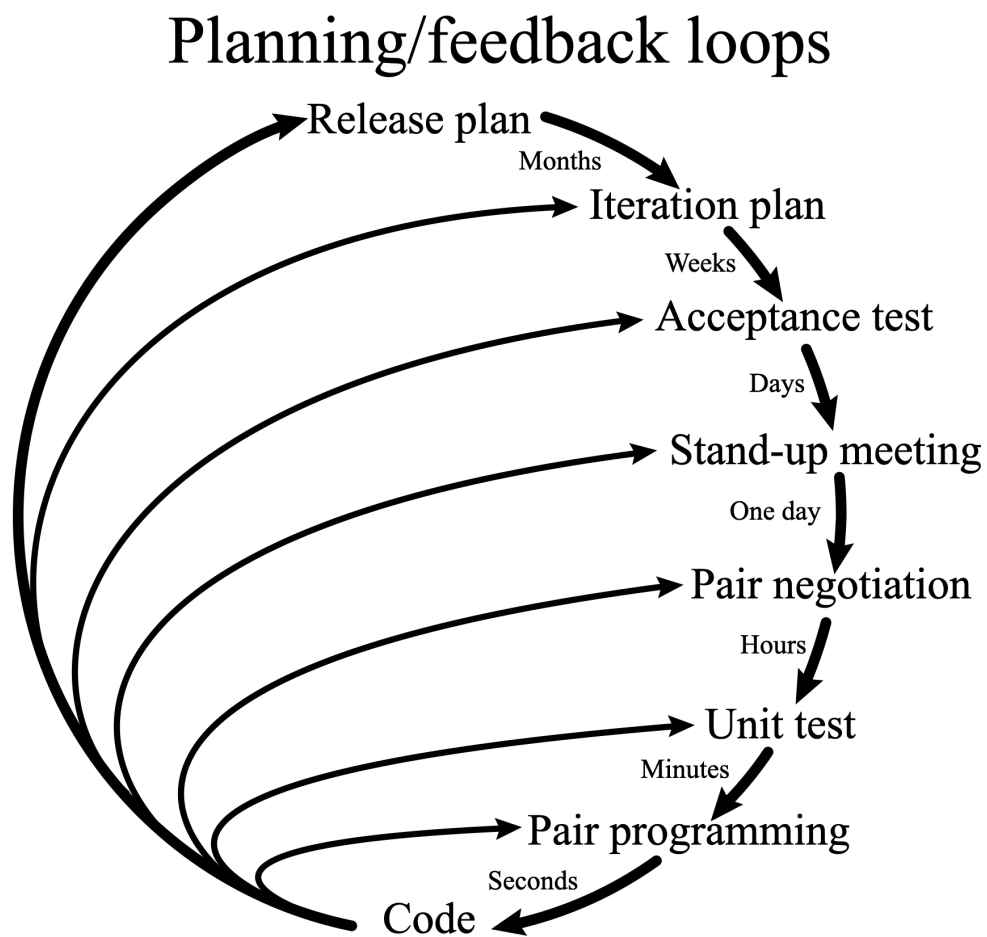
Η κύρια απάντηση στο γνωσιακό φορτίο είναι η **διανομή γνώσης μέσω εργασίας σε ζεύγη**: κάθε εργασία σε οποιοδήποτε στρώμα γίνεται με δύο άτομα, οπότε η γνώση δεν παραμένει σε ένα άτομο. Επιπλέον, τα coding standards και τα εργαλεία (Nix, Terraform modules) μειώνουν την πολυπλοκότητα εκμάθησης.

10.6 Βρόχοι ανατροφοδότησης (Feedback Loops)

Η αρχή

Για κάθε επιτυχημένο εγχείρημα ανάπτυξης λογισμικού, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνεχούς ροής πληροφορίας από τους χρήστες και το σύστημα πίσω στην ομάδα ανάπτυξης. Αυτή η ανατροφοδότηση επιτρέπει στην ομάδα να ξέρει αν βρίσκεται στη σωστή κατεύθυνση ή πρέπει να αναπροσαρμόσει. Χωρίς ανατροφοδότηση, η ανάπτυξη γίνεται «στα τυφλά».

Στο XP δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη δημιουργία **πολλαπλών, όσο το δυνατό συντομότερων βρόγχων ανατροφοδότησης** σε κάθε κλίμακα.



Σχήμα 3: Βρόγχοι Ανατροφοδότησης XP

Βρόγχοι από δευτερόλεπτα έως μήνες

Η εικόνα απεικονίζει τους ομόκεντρους βρόγχους ανατροφοδότησης του XP, από τον εσωτερικότερο (ταχύτερο) προς τον εξωτερικότερο (πιο αργό):

Pair (δευτερόλεπτα–λεπτά): Ο πιο στενός βρόγχος είναι η συνεχής συζήτηση εντός του ζεύγους προγραμματιστών. Κάθε γραμμή κώδικα αναθεωρείται άμεσα από τον πλοηγό. Αυτός ο βρόγχος επαναλαμβάνεται κάθε λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά.

Tests + Compiler (λεπτά): Η εκτέλεση των τεστ — που με το `mix test.watch` γίνεται αυτόματα μόλις αλλάξει ένα αρχείο — παρέχει ανατροφοδότηση σε λίγα δευτερόλεπτα έως λεπτά. Ο μεταγλωττιστής της Elixir εντοπίζει τύπο σφαλμάτων άμεσα.

Daily Standup (ημέρα): Η καθημερινή σύντομη συνάντηση (standup) συγχρονίζει την ομάδα: τι έγινε χθες, τι γίνεται σήμερα, τι εμποδίζει την πρόοδο. Σε κατανεμημένη ομάδα (Ευρώπη/Ινδία) αυτό γίνεται κατά τις κοινές ώρες εργασίας.

Acceptance Tests + Production Telemetry (ημέρες–εβδομάδα): Οι δοκιμές αποδοχής που εκτελούνται σε πραγματικό περιβάλλον, σε συνδυασμό με τα δεδομένα παρατηρησιμότητας από τους ~1.300 ενεργούς χρήστες, παρέχουν ανατροφοδότηση για το αν η νέα λειτουργικότητα λειτουργεί σωστά υπό πραγματικές συνθήκες.

Iteration Planning (εβδομάδα): Εβδομαδιαίος σχεδιασμός επανάληψης για κατανομή των επόμενων ιστοριών χρήστη, αναθεώρηση προτεραιοτήτων, εκτίμηση εργασίας.

Strategic Alignment (μήνας): Σε μηνιαία κλίμακα, πιο αφηρημένα στρατηγικά πλάνα ορίζουν την κατεύθυνση της ανάπτυξης: ποια νέα προϊόντα, ποιες ανάγκες των χρηστών, ποιες κανονιστικές αλλαγές (π.χ. EU ETS, CSRD) θα διαμορφώσουν τον οδικό χάρτη (roadmap).

Η πολυεπίπεδη αυτή δομή βρόχων έχει ένα σημαντικό χαρακτηριστικό: οι ταχύτεροι βρόχοι αντιμετωπίζουν τεχνικά σφάλματα και τοπικές αποφάσεις, ενώ οι αργότεροι διαχειρίζονται στρατηγική κατεύθυνση. Αυτός ο διαχωρισμός αποτρέπει την «τυραννία της επείγουσας λεπτομέρειας»: η ομάδα δεν χρειάζεται να διακόψει τη στρατηγική συζήτηση για να διορθώσει ένα τυπογραφικό λάθος.

Ασύγχρονη ανατροφοδότηση στην πράξη

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πράξη η ανατροφοδότηση είναι λιγότερο δομημένη και πολύ πιο ασύγχρονη από ό,τι η θεωρητική περιγραφή των βρόχων υποδηλώνει. Επειδή η ομάδα παραδίδει αλλαγές πολλές φορές ημερησίως, οι χρήστες — εσωτερικοί υπάλληλοι της Maersk — μπορούν να παρέχουν σχόλια άμεσα μέσω Microsoft Teams ή email.

10.7 Ένταξη (Onboarding) και διαμοιρασμός γνώσης (Knowledge Sharing)

Φιλοσοφία και στόχοι

Ο στόχος της ένταξης είναι να ενταχθεί ο νέος προγραμματιστής στις πρακτικές της ομάδας (εργασία σε ζεύγη, TDD, CI/CD) όσο το δυνατόν πιο γρήγορα, μέσα από πράξη και

όχι θεωρία. Χάρη στην εργασία σε ζεύγη ένα νέο μέλος μπορεί να συμβάλει στην παραγωγή από την πρώτη κιόλας μέρα.

Σύστημα αναδόχου (Buddy System)

Κάθε νέος προγραμματιστής αναλαμβάνεται από έναν **ανάδοχο (buddy)** — έμπειρο μέλος της ομάδας που είναι υπεύθυνο για την ομαλή ένταξη. Ο ανάδοχος:

- Παρουσιάζει τα εσωτερικά συστήματα και εργαλεία (Jira, Confluence, Miro, Tuple)
- Οδηγεί τον νέο προγραμματιστή στα πρώτα ορόσημα (milestones)
- Εισάγει στις παραγωγικές συνεδρίες μέσω εργασίας σε ζεύγη
- Φροντίζει για την πρόσβαση στα απαραίτητα συστήματα (Kubernetes cluster, HashiCorp Vault, Azure)

Συνεδρίες μεταφοράς γνώσης (KT Sessions)

Οι συνεδρίες μεταφοράς γνώσης (Knowledge Transfer, KT) είναι δομημένες συναντήσεις που καλύπτουν:

- **Team Intro:** Η αποστολή της ομάδας, οι πελάτες, η πρόταση αξίας (value proposition)
- **Shipping Basics:** Βασικές γνώσεις θαλάσσιας μεταφοράς (απαραίτητες για κατανόηση του πεδίου)
- **Technical Architecture:** Αρχιτεκτονική από άκρο σε άκρο (end-to-end), από τους αγωγούς δεδομένων ως τον διακομιστή ιστού
- **Production Deployment & Monitoring:** Πώς λειτουργεί το CI/CD, πώς παρακολουθείται το σύστημα, πώς αντιμετωπίζεται ένα περιστατικό (incident)

10.8 Επιθεώρηση κώδικα (Code Review) μέσω εργασίας σε ζεύγη

Συνεχής αναθεώρηση ως αρχιτεκτονική επιλογή

Σε ομάδες που δεν ακολουθούν εργασία σε ζεύγη, η τυπική πρακτική επιθεώρησης κώδικα γίνεται μέσω Pull Requests: ένας προγραμματιστής γράφει κώδικα, ανοίγει PR, και ένας ή περισσότεροι συνάδελφοι τον αναθεωρούν πριν τη συγχώνευση. Αυτή η διαδικασία εισάγει καθυστέρηση (ο προγραμματιστής περιμένει ανατροφοδότηση), αποσυνδέει την αναθεώρηση από τη συγγραφή, και συχνά οδηγεί σε επιφανειακά σχόλια λόγω έλλειψης πλαισίου.

Στην παρούσα ομάδα, ο προγραμματισμός σε ζεύγη **αντικαθιστά** τα PRs ως μηχανισμός επιθεώρησης κώδικα. Κάθε γραμμή κώδικα γράφεται παρουσία δεύτερου προγραμματιστή που αναθεωρεί άμεσα. Αυτή η **συνεχής αναθεώρηση** είναι βαθύτερη από μια αναθεώρηση PR, διότι ο αναθεωρητής κατανοεί πλήρως το πλαίσιο, τις εναλλακτικές που απορρίφθηκαν και τους λόγους κάθε απόφασης.

Ροή χωρίς αιτήματα ενσωμάτωσης (PRs) εσωτερικά

Κώδικας που γράφεται σε ζεύγος συγχωνεύεται απευθείας στο `main` χωρίς τυπικό PR. Αυτό επιτρέπει τον ρυθμό των 32 αναπτύξεων ημερησίως — η αναμονή για έγκριση PR θα δημιουργούσε σημείο συμφόρησης ασύμβατο με το trunk-based development.

Η ιχνηλασιμότητα, που συνήθως εξυπηρετεί η αναθεώρηση PR, αντιμετωπίζεται με προ-σεγμένα μηνύματα υποβολής (commit messages) που εξηγούν το «γιατί» κάθε αλλαγής.

Συμβιβασμοί (Trade-offs)

Η απουσία PRs σημαίνει λιγότερη τυπική καταγραφή ανά αλλαγή. Σε ορισμένα πλαίσια αυτό θα ήταν πρόβλημα (π.χ. σε ρυθμιζόμενες βιομηχανίες που απαιτούν ίχνος ελέγχου ανά αλλαγή). Στην παρούσα περίπτωση, η ισορροπία μεταξύ ταχύτητας παράδοσης και ιχνηλασιμότητας κρίνεται ικανοποιητική από την ομάδα. Το ιστορικό git με περιγραφικά μηνύματα υποβολής (commit messages) αντικαθιστά ουσιαστικά την ανάγκη για συζητήσεις PR, ενώ ο ανθρώπινος παράγοντας καλύπτεται από την εργασία σε ζεύγη.

Κεφάλαιο 11 — Συμπεράσματα

11.1 Σύνοψη της λύσης

Ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών (*Emissions Workbench*) αναπτύχθηκε σε απάντηση σε ένα συγκεκριμένο, επείγον και πολύπλευρο πρόβλημα: η Maersk, ως ένας από τους μεγαλύτερους μεταφορείς εμπορευματοκιβωτίων παγκοσμίως με στόλο άνω των 700 πλοίων, αδυνατούσε να ανταποκριθεί αξιόπιστα στις αυξανόμενες ρυθμιστικές και εμπορικές απαιτήσεις για μέτρηση, αναφορά και αξιοποίηση δεδομένων εκπομπών. Η χειρωνακτική διαδικασία που προηγείτο — email αιτήματα, μη αυτόματη εξαγωγή δεδομένων, εφαρμογή συντελεστών εκπομπών σε υπολογιστικά φύλλα Excel και επιστροφή αποτελεσμάτων με email — ήταν ακατάλληλη ως προς την ακρίβεια, την κλίμακα, την ταχύτητα και την ιχνηλασιμότητα (βλ. Κεφ. 2.5). Κατά τη συγγραφή του κειμένου, είναι διαθέσιμος στη διεύθυνση <https://emissions-workbench.maersk.com/>.

Η λύση που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε από την ομάδα *ET Platform* στα μόλις έξι μήνες (Μάρτιος–Σεπτέμβριος 2023) οργανώνεται γύρω από τέσσερις πυλώνες λειτουργικότητας, καθένας με σαφή αποστολή και διακριτή τεχνική υλοποίηση. Ο **Πυλώνας Α — Ocean Emissions** (Κεφ. 5) υλοποιεί την αυτοματοποιημένη συλλογή τηλεμετρίας πλοίων μέσω του STAR Connect, τον υπολογισμό εκπομπών ανά κίνηση εμπορευματοκιβωτίου βάσει εγκεκριμένων συντελεστών εμπορικής διαδρομής (*trade factors*) και την ενσωμάτωση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών (EU ETS). Ο **Πυλώνας Β — Προϊόντα ECO Παράδοσης** (Κεφ. 6) καθιστά δυνατή την εμπορική πώληση ναυτιλιακής μεταφοράς με μειωμένο ανθρακικό αποτύπωμα, με αυτόματη έκδοση επαληθεύσιμων πιστοποιητικών (ECOv1, ECOv2) και ενσωματωμένη λογιστική πράσινου καυσίμου μέσω του *Energy Bank*. Ο **Πυλώνας Γ — Bunker Optimization** (Κεφ. 7) αντικαθιστά χειρωνακτικές αποφάσεις ανεφοδιασμού με αλγόριθμο γραμμικής βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιώντας το κόστος καυσίμου σε ολόκληρους ορίζοντες σχεδιασμού δρομολογίων. Ο **Πυλώνας Δ — Net Zero 2040** παρέχει εσωτερικούς πίνακες αναφοράς για την παρακολούθηση της πορείας προς τους κλιματικούς στόχους της εταιρείας.

Η τεχνολογική βάση της πλατφόρμας (Κεφ. 8) επιλέχθηκε με γνώμονα τις μη διαπραγματεύσιμες απαιτήσεις: ταυτόχρονη επεξεργασία χιλιάδων events από πολλαπλές πηγές δεδομένων, μηδενικό *downtime* κατά τις αναβαθμίσεις, αδιάσπαστη ιχνηλασιμότητα για ελεγχτικούς σκοπούς. Η BEAM/Elixir ως πυρήνας, το Phoenix LiveView για διαδραστικά interfaces πραγματικού χρόνου, η αρχιτεκτονική *event sourcing* μέσω Commanded/EventStore για τη

λογιστική πράσινου καυσίμου, το Kafka για ροή δεδομένων υψηλού όγκου και το Dremio ως επίπεδο πρόσβασης σε δεδομένα — αποτέλεσαν συνεκτικό σύνολο που αντιμετώπισε τεχνικές αιτήσεις τις οποίες λιγότερο εξειδικευμένοι συνδυασμοί τεχνολογιών δεν θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν εξίσου. Η αρχιτεκτονική του συστήματος (Κεφ. 9) οργανώνεται ως *monorepo* με διακριτά συστατικά, επιτρέποντας ατομικές (*atomic*) αναπτύξεις και ισχυρή ανακατασκευή (*refactoring*) εγχάρσια σε ολόκληρη τη βάση κώδικα.

Εξίσου κρίσιμη υπήρξε η μεθοδολογική επιλογή (Κεφ. 10): η ομάδα υιοθέτησε πρακτικές *Extreme Programming* — *pair programming*, *test-driven development*, *continuous integration* και *vertical ownership* — που έκαναν εφικτό τον ρυθμό παράδοσης σε επίπεδο παραγωγικού κώδικα, ταυτόχρονα διατηρώντας υψηλή ποιότητα και κοινή γνώση της βάσης κώδικα.

11.2 Επιτυχίες και μετρήσεις αντίκτυπου

Τα αποτελέσματα της λύσης είναι μετρήσιμα και σε πολλές διαστάσεις. Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τις κύριες μετρικές που τεκμηριώνουν τον αντίκτυπο του Πάγκου Εργασίας Εκπομπών σε επίπεδο επιχειρησιακής λειτουργίας, τεχνικής ωριμότητας και οργανωτικής αποτελεσματικότητας.

Διάσταση	Μετρική	Τιμή
Υιοθέτηση	Ενεργοί χρήστες	1.300+ (από <100 στην εποχή Excel)
Εμπορικός αντίκτυπος	ECO Delivery Ocean 2024	98.000 FFE / 31 εκ. USD
Κανονιστική συμμόρφωση	Έλεγχος GIA 2023	Πλήρης αντιμετώπιση όλων των ευρημάτων
Ταχύτητα παράδοσης	Αναπτύξεις σε παραγωγή	~32 αναπτύξεις/ημέρα
Αξιοπιστία	Μεταπτώσεις σχήματος χωρίς διακοπή	720+
Έλεγχος ποιότητας	Αυτοματοποιημένα αρχεία δοκιμών	80%+ κάλυψη
Κλίμακα κώδικα	Αρχεία πηγαίου κώδικα	~6.000 αρχεία
Κύκλος ανάπτυξης	Από έναρξη έως παραγωγή	6 μήνες (Μάρ.–Σεπ. 2023)

Η αύξηση χρηστών από λιγότερους από 100 (στην εποχή των χειρωνακτικών διαδικασιών) σε πάνω από 1.300 αντικατοπτρίζει τη θεμελιώδη αλλαγή του επιχειρησιακού μοντέλου: από ένα σύστημα όπου δεδομένα εκπομπών ήταν προσβάσιμα μόνο από ειδικευμένη ομάδα αναφοράς, σε μια πλατφόρμα αυτοεξυπηρέτησης που χρησιμοποιείται από εμπορικούς αντιπροσώ-

πους, αναλυτές βιωσιμότητας, διαχειριστές συμβολαίων και στελέχη διαχείρισης προϊόντων. Η πρόσβαση σε αξιόπιστα δεδομένα εκπομπών δεν αποτελεί πλέον αίτημα που εκκρεμεί για εβδομάδες — αλλά άμεσα διαθέσιμη πληροφορία.

Το μέγεθος 98.000 FFE / \$31 εκ. USD για ECO Delivery Ocean κατά το 2024 αποδεικνύει ότι η πλατφόρμα δεν υποστηρίζει απλώς εσωτερικές ανάγκες αναφοράς, αλλά είναι άμεσα συνδεδεμένη με μια νέα εμπορική δραστηριότητα που πριν από αυτήν δεν ήταν τεχνικά εφικτή σε αυτή την κλίμακα. Η αυτόματη έκδοση πιστοποιητικών ECOv1 και ECOv2, η αδιάσπαστη αλυσίδα ιχνηλασιμότητας ISCC/POS και η επιβολή του περιορισμού του ισοζυγίου μάζας (*mass balance*) μέσω προέλευσης από συμβάντα στο *Energy Bank* συνιστούν το τεχνικό θεμέλιο αυτής της εμπορικής επιτυχίας.

Ο ρυθμός ~32 αναπτύξεων ανά ημέρα — σε συνδυασμό με 720+ migrations που εκτελέστηκαν χωρίς καμία διακοπή λειτουργίας — αποτελεί τεκμήριο της ωριμότητας της αλυσίδας παράδοσης λογισμικού. Η επίτευξη αυτού του ρυθμού χωρίς αύξηση ελαττωμάτων ή δυσλειτουργιών στην παραγωγή αποδίδεται στη συνδυαστική δράση: αυτόματων τεστ, *continuous integration* μέσω GitHub workflows, *infrastructure as code* και της κουλτούρας *pair programming* που αντιμετωπίζει τα σφάλματα πριν φτάσουν στο τελικό προϊόν.

Η επιτυχής αντιμετώπιση του εσωτερικού ελέγχου GIA του 2023 αποτελεί μια επιπλέον διάσταση επιτυχίας που συχνά υποτιμάται: ο έλεγχος εντόπισε συγκεκριμένα κενά στην ιχνηλασιμότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων. Η πλατφόρμα αντιμετώπισε πλήρως τα ευρήματα αυτά, αποδεικνύοντας ότι ο τεχνικός σχεδιασμός (event sourcing, immutable audit trail, automated certificate generation) δεν υπηρετεί μόνο λειτουργικούς στόχους αλλά και εταιρική διακυβέρνηση.

11.3 Μαθήματα από την υλοποίηση

Πέραν των μετρήσιμων επιτυχιών, η ανάπτυξη και λειτουργία του Πάγκου Εργασίας Εκπομπών ανέδειξε μια σειρά από ουσιαστικά μαθήματα — αρκετά από τα οποία σχετίζονται με συμβιβασμούς (trade-offs) που δεν έχουν μονοσήμαντες απαντήσεις, αλλά αντιθέτως απαιτούν συνεχή επίγνωση και ενεργή διαχείριση.

Κάθετη ιδιοκτησία και γνωσιακό φορτίο. Η απόφαση για πλήρη *vertical ownership* — κάθε προγραμματιστής αναλαμβάνει λειτουργικότητα από τη βάση δεδομένων έως το UI — ενισχύει τη συνοχή και μειώνει την εξάρτηση μεταξύ ομάδων, αλλά αυξάνει το γνωστικό φορτίο σε κάθε μέλος. Ένας μηχανικός χρειάζεται να γνωρίζει Elixir, Ecto, Phoenix LiveView, PostgreSQL, Kafka, Terraform και τον επιχειρησιακό τομέα (GHG accounting, ISCC, EU ETS) ταυτόχρονα. Το αντίμετρο που υιοθέτησε η ομάδα — συστηματικό *pair programming*, buddy system για νέα μέλη και εκτεταμένη εσωτερική τεκμηρίωση (βλ. Κεφ. 10.7) — μέτρια αλλά δεν εξαλείφει αυτή την πίεση. Το μάθημα είναι ότι το *vertical ownership* λειτουργεί καλύτερα σε ομάδες που έχουν επενδύσει βαριά στην κουλτούρα συνεχούς μεταφοράς γνώσης.

Πολυπλοκότητα ενιαίου αποθετηρίου. Το ενιαίο αποθετήριο (monorepo) με 6.000 αρχεία πηγαίου κώδικα και πολλαπλά συστατικά προσφέρει ισχυρά οφέλη: ατομικές

αναπτύξεις, εύκολη ανακατασκευή, κοινή εκδοχή εξαρτήσεων. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η βάση κώδικα, αυξάνεται και ο χρόνος δόμησης (*build time*) και η πολυπλοκότητα της διοχέτευσης CI. Το Nix/Flake workspace παρέχει αναπαραγώγιμα (*reproducible*) περιβάλλοντα ανάπτυξης που απλοποιούν την εμπειρία για τους μηχανικούς, αλλά η εκμάθηση του ίδιου του Nix αποτελεί πρόσθετο φραγμό εισόδου — ιδιαίτερα για νέα μέλη χωρίς προηγούμενη εμπειρία με το εργαλείο. Η επένδυση αξίζει στην τελική, αλλά απαιτεί χρόνο απόσβεσης.

Προέλευση από συμβάντα: ισχύς και πολυπλοκότητα ένταξης. Η αρχιτεκτονική της προέλευσης από συμβάντα (*event sourcing*) μέσω Commanded ήταν η ορθή επιλογή για το *Energy Bank*: παρέχει πλήρες ιστορικό κάθε συναλλαγής, δυνατότητα επανекτέλεσης (*event replay*) για αποκατάσταση projections και αδιάσπαστο ίχνος ελέγχου. Αλλά η νοητική μετάβαση από παραδοσιακό CRUD σε Commands → Aggregates → Events → Projections είναι σημαντική. Νέοι προγραμματιστές χρειάζονται αρκετές εβδομάδες pairing για να κατανοήσουν πλήρως τη ροή. Το μάθημα: event sourcing είναι αρχιτεκτονικό εργαλείο για προβλήματα με ισχυρές απαιτήσεις ιχνηλασιμότητας — όπως η λογιστική πράσινου καυσίμου — αλλά αυξάνει τον χρόνο εκπαίδευσης νέων μελών και πρέπει να εφαρμόζεται επιλεκτικά, όχι γενικευμένα.

Νέφος έναντι αυτοφιλοξενίας (cloud vs self-hosting). Η χρήση υπηρεσιών Azure (Azure Kubernetes Service, Azure Blob Storage, Azure Database for PostgreSQL) προσφέρει εξαιρετική ευελιξία κλιμάκωσης και μειώνει το λειτουργικό φορτίο διαχείρισης υποδομής. Ωστόσο, το λειτουργικό κόστος είναι σημαντικό και εξαρτάται άμεσα από τον όγκο δεδομένων — ένα ζήτημα που γίνεται πιο οξύ καθώς η πλατφόρμα αυξάνει τη βάση χρηστών και τον όγκο συναλλαγών. Ο σωστός σχεδιασμός κλιμάκωσης (auto-scaling, spot instances, data retention policies) απαιτεί συνεχή προσοχή για να αποφευχθεί ανεξέλεγκτη αύξηση κόστους.

Ταχύτητα παράδοσης ως ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Ίσως το σημαντικότερο μάθημα είναι οργανωτικής φύσης: η ικανότητα παράδοσης ~32 αναπτύξεων ανά ημέρα σε ένα ρυθμιστικά ευαίσθητο περιβάλλον (EU ETS, CSRD, GIA audit) αποδεικνύει ότι ποιότητα και ταχύτητα δεν είναι αντίθετοι στόχοι. Οι πρακτικές XP — και ειδικά ο συνδυασμός TDD, pair programming και continuous deployment — δεν επιβραδύνουν την ανάπτυξη για χάρη της ποιότητας· αντίθετα, δημιουργούν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες η υψηλή ταχύτητα παράδοσης είναι βιώσιμη μακροπρόθεσμα.

Συνολικά, ο Πάγκος Εργασίας Εκπομπών αποδεικνύει ότι ένα σύστημα που καλείται να συνδυάσει επιστημονική ακρίβεια (GHG Protocol, ISCC, Well-to-Wake), εμπορική αξιοπιστία (πιστοποιητικά έτοιμα για έλεγχο [audit-ready], ισοζύγιο μάζας) και υψηλό ρυθμό παράδοσης λογισμικού μπορεί να υλοποιηθεί επιτυχώς — υπό τον όρο ότι οι τεχνολογικές, αρχιτεκτονικές και μεθοδολογικές επιλογές αντιμετωπίζονται ως ενιαίο σύστημα και όχι ως ανεξάρτητες αποφάσεις.

Κεφάλαιο 12 — Μελλοντική εργασία

Η παρούσα εργασία παρουσίασε τον Πάγκο Εργασίας Εκπομπών (Emissions Workbench) του ET Platform της Maersk στην τρέχουσα παραγωγική του μορφή: τρεις πυλώνες (Ocean Emissions, Προϊόντα ECO Παράδοσης, Bunker Optimization) που καλύπτουν τη μέτρηση, πιστοποίηση και βελτιστοποίηση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από θαλάσσιες μεταφορές. Ωστόσο, το κανονιστικό και επιχειρησιακό τοπίο εξελίσσεται ταχύτατα, και η πλατφόρμα αναμένεται να επεκταθεί σε πολλαπλές κατευθύνσεις κατά τα επόμενα έτη. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι πέντε κυριότεροι άξονες μελλοντικής εργασίας που έχουν ήδη σχεδιαστεί ή βρίσκονται σε φάση αξιολόγησης.

12.1 Μετρήσεις Scope 2: Γραφεία, Τερματικά και Cold Ironing

Η τρέχουσα υλοποίηση του Ocean Emissions πυλώνα (βλ. Κεφ. 3 και Κεφ. 5) εστιάζει αποκλειστικά στις εκπομπές *Εύρους 1 (Scope 1)* — δηλαδή στις άμεσες εκπομπές από καύση καυσίμου στις κύριες μηχανές και τις βοηθητικές μηχανές των πλοίων. Πρόκειται για τις εκπομπές που η Maersk ελέγχει άμεσα και οι οποίες υπόκεινται στην αναφορά EU MRV, MARPOL και EU ETS Maritime. Ωστόσο, το GHG Protocol (βλ. Κεφ. 3.2) αναγνωρίζει επίσης τις εκπομπές *Εύρους 2 (Scope 2)*, που αφορούν στην έμμεση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Για έναν οργανισμό της κλίμακας της Maersk, οι Scope 2 εκπομπές δεν είναι αμελητέες: εκτείνονται σε εκατοντάδες γραφεία και κόμβους εφοδιαστικής (logistics) παγκοσμίως, καθώς και στους λιμενικούς τερματικούς σταθμούς (*terminals*) που λειτουργεί ή χρησιμοποιεί ο όμιλος. Μια ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία αποτελεί το *cold ironing* (ή *shore power*): η σύνδεση πλοίων σε ηλεκτροδότηση ξηράς κατά τον ελλιμενισμό τους, αντί χρήσης των βοηθητικών μηχανών. Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται κατά το cold ironing χαρακτηρίζεται ως Scope 2 — και, ανάλογα με το ενεργειακό μείγμα του εκάστοτε λιμανιού, μπορεί να έχει σημαντικά μικρότερο ή και μεγαλύτερο αποτύπωμα από τη χρήση MGO (*Marine Gas Oil*) στις βοηθητικές μηχανές.

Η ενσωμάτωση των Scope 2 μετρήσεων στον Πάγκο Εργασίας Εκπομπών πρόκειται να υλοποιηθεί κατά τη διάρκεια του 2026 και αφορά τρεις διακριτές πηγές δεδομένων: (α) κα-

ταναλώσεις ηλεκτρισμού γραφείων που θα αντλούνται από το εταιρικό ενεργειακό σύστημα διαχείρισης, (β) καταναλώσεις ηλεκτρισμού τερματικών σταθμών μέσω εξαγωγής δεδομένων ανά μήνα και εγκατάσταση, και (γ) δεδομένα cold ironing από τους λιμένες που ήδη παρέχουν αυτή την υπηρεσία. Για τα πλοία, η ενσωμάτωση θα απαιτήσει επέκταση του αγωγού STAR Connect (βλ. Κεφ. 5.4) ώστε να καταγράφει και τα διαστήματα παραμονής στο λιμάνι κατά τα οποία το πλοίο βρίσκεται σε shore power. Επιπλέον, θα απαιτηθεί η αντιστοίχιση κάθε λιμανιού με τον αντίστοιχο συντελεστή εκπομπών (*emission factor*) του τοπικού δικτύου ηλεκτρισμού (*grid emission factor*), δεδομένου ότι η ένταση άνθρακα ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρει σημαντικά μεταξύ χωρών και εποχών.

12.2 Επεκτάσεις Στόλου και Κάλυψης Δραστηριοτήτων

Ο τρέχων Πάγκος Εργασίας Εκπομπών (βλ. Κεφ. 5) υπολογίζει και αναφέρει εκπομπές αποκλειστικά για τον θαλάσσιο στόλο της Maersk. Ωστόσο, η εταιρεία λειτουργεί ως ολοκληρωμένος πάροχος εφοδιαστικής (logistics) που συμπεριλαμβάνει χερσαίες, εναέριας και λιμενικές δραστηριότητες. Η πλήρης εικόνα των Scope 1 και Scope 3 εκπομπών της αλυσίδας εφοδιασμού δεν μπορεί να προκύψει χωρίς ενσωμάτωση αυτών των δραστηριοτήτων.

Προτείνεται η επέκταση της κάλυψης σε τέσσερις νέες κατηγορίες:

Οδικές μεταφορές (trucking): Η Maersk λειτουργεί στόλο φορτηγών οχημάτων για πρώτη και τελευταία επαφή (*first and last mile*) σε πολλές χώρες. Η ενσωμάτωση αφορά κυρίως εκπομπές Scope 1 από καύση ντίζελ, καθώς και μελλοντικά Scope 1 εκπομπές από ηλεκτρικά φορτηγά (zero tailpipe, αλλά με Scope 2 ηλεκτρισμού). Τεχνικά, τα δεδομένα αναλώσεων καυσίμου υπάρχουν σε συστήματα διαχείρισης στόλου (fleet management) που θα πρέπει να ενσωματωθούν μέσω νέου αγωγού — παρόμοιου με το STAR Connect αλλά για χερσαία οχήματα.

Σιδηροδρομικές μεταφορές (rail): Σε ορισμένες αγορές (π.χ. Ευρώπη, Κίνα) η Maersk χρησιμοποιεί τον σιδηρόδρομο για συνδυασμένες (intermodal) μεταφορές. Οι εκπομπές εδώ είναι κυρίως Scope 3 (τρίτα μέρη), χωρίς να αποκλείεται μελλοντικά Scope 1 για ιδιόκτητους εκτελεστές.

Εξοπλισμός τερματικών (terminal equipment): Γερανοί, ρυμουλκά λιμένων (*yard tractors*) και reach stackers που λειτουργούν στους τερματικούς σταθμούς καταναλώνουν diesel ή ηλεκτρισμό. Η κατηγορία αυτή υπάγεται στο Scope 1 (diesel) ή Scope 2 (ηλεκτρισμός), και η ενσωμάτωσή της προϋποθέτει σύνδεση με τα τοπικά συστήματα παρακολούθησης κατανάλωσης των terminals.

Εναέριας μεταφορές (air freight): Για τα logistics segments που περιλαμβάνουν air cargo (συνήθως Scope 3, ως contracted carrier), πρόκειται να ενσωματωθεί υπολογισμός εκπομπών βάσει της μεθοδολογίας ICAO και παραγόντων φόρτωσης (*load factors*).

Και οι τέσσερις κατηγορίες θα αξιοποιήσουν το υπάρχον θεμέλιο του πυλώνα Ocean Emissions (βλ. Κεφ. 5): τον κεντρικό μηχανισμό υπολογισμού εκπομπών, τα δέντρα εκφράσεων (expression trees) ελεγχιμότητας και την αρχιτεκτονική αποθήκευσης στη λίμνη δεδομένων *Dremio*.

12.3 Επέκταση SBTi Αναφοράς

Στην τρέχουσα κατάσταση, η αναφορά SBTi γίνεται σε μεγάλο βαθμό χειροκίνητα ή μέσω εξαγωγών δεδομένων από τον Πάγκο Εργασίας σε εξωτερικά εργαλεία. Προτείνεται η ανάπτυξη αυτοματοποιημένης μονάδας *SBTi Reporting* εντός της πλατφόρμας, που θα αναλαμβάνει: (α) τον υπολογισμό βάσης αναφοράς (*baseline*) βάσει ιστορικών δεδομένων εκπομπών, (β) την αυτόματη σύγκριση τρεχουσών εκπομπών με τη γραμμή στόχου SBTi ανά έτος, και (γ) την παραγωγή αναφοράς σε μορφή συμβατή με τα templates αναφοράς του SBTi και της CDP (*Carbon Disclosure Project*). Η επέκταση αυτή δεν απαιτεί νέους επιχειρησιακούς πυλώνες — στηρίζεται στα δεδομένα που ήδη παράγει το σύστημα — αλλά απαιτεί την προτυποποίηση της μεθοδολογίας αναγωγής εκπομπών ανά γραμμή επιχείρησης και τμήμα στόλου.

12.4 Προηγμένα αναλυτικά στοιχεία (Analytics): Προβλεπτικές Εκπομπές και Σενάρια Απανθρακοποίησης

Η παρούσα πλατφόρμα εστιάζει στη μέτρηση και αναφορά εκπομπών που έχουν ήδη συντελεστεί — δηλαδή στη λειτουργία ως σύστημα αρχείου (*system of record*) για εκπομπές. Ένας σημαντικός άξονας μελλοντικής εργασίας αφορά την επέκταση σε *προβλεπτικές* και *στρατηγικές* αναλύσεις.

Προβλεπτικές εκπομπές (*predictive emissions*): Προτείνεται η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης εκπομπών για μελλοντικές περιόδους, βάσει προγραμματισμένων δρομολογιών, εκτιμώμενης κατανάλωσης καυσίμου και γνωστών συντελεστών. Αυτό θα επιτρέπει στους χρήστες να εκτιμούν το αποτύπωμα μελλοντικών περιόδων πριν αυτές ολοκληρωθούν, διευκολύνοντας πρόωπη κατανομή ECO προϊόντων και έγκαιρη ανταπόκριση σε κανονιστικούς στόχους.

Σενάρια απανθρακοποίησης (*decarbonization scenarios*): Προτείνεται η δυνατότητα παραγωγής εναλλακτικών σεναρίων μέσω ενός *scenario engine*, που θα επιτρέπει σε χρήστες να ορίζουν υποθετικές παραμέτρους — π.χ. «τι θα συνέβαινε αν 20% των δρομολογιών χρησιμοποιούσαν βιοκαύσιμο» ή «ποια η επίπτωση στις εκπομπές EU ETS αν μειωθεί η μέση ταχύτητα πλεύσης κατά 1 κόμβο». Τα αποτελέσματα θα παρουσιάζονται σε συγκριτική μορφή με το baseline σενάριο, υποστηρίζοντας ανάλυση οικονομικής αποδοτικότητας (*cost-effectiveness analysis*) κάθε δυνητικής παρέμβασης.

Τεχνικά, η ανάπτυξη αυτής της λειτουργικότητας θα αξιοποιήσει τα υπάρχοντα μοντέλα υπολογισμού εκπομπών του πυλώνα Ocean Emissions — τα οποία είναι ήδη παραμετρικά μέσω των *expression trees* — και θα τα επεκτείνει ώστε να δέχονται υποθετικές εισόδους αντί για πραγματικές τηλεμετρικές τιμές. Οι αναλύσεις θα αποθηκεύονται ως εκδόσεις σεναρίων (*scenario versions*) χωρίς να επηρεάζουν τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής.

12.5 Σύνδεση Bunker Optimization με την Energy Bank

Ο Πυλώνας Γ (Bunker Optimization, βλ. Κεφ. 7) και ο Πυλώνας Β (Προϊόντα ECO Παράδοσης και Energy Bank, βλ. Κεφ. 6.3) λειτουργούν σήμερα ως ανεξάρτητα συστήματα: το BOPS σχεδιάζει τον ανεφοδιασμό καυσίμου αποκλειστικά βάσει κριτηρίων κόστους και διαθεσιμότητας, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα αποθέματα πράσινης ενέργειας που έχει καταχωρίσει η Energy Bank. Αντίστοιχα, η Energy Bank δεν γνωρίζει ποια πλοία έχουν προγραμματιστεί να ανεφοδιαστούν σε ποια λιμάνια.

Η μελλοντική σύνδεση μεταξύ των δύο πυλώνων, όπως περιγράφεται ήδη στο Κεφ. 7.7, αφορά δύο διακριτά επίπεδα ολοκλήρωσης. Πρώτον, η *carbon-aware βελτιστοποίηση*: ο MBC επιλυτής του BOPS πρόκειται να ενσωματώσει το κόστος EU ETS δικαιωμάτων ως πρόσθετο όρο στη συνάρτηση κόστους, ώστε η επιλογή λιμανιού ανεφοδιασμού να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τιμή καυσίμου αλλά και εκτιμώμενο κόστος άνθρακα. Δεύτερον, η *αυτόματη επιλογή πράσινου καυσίμου*: όταν η Energy Bank διαθέτει αποθέματα πράσινης ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο λιμάνι (βλ. Κεφ. 6.3.3), ο επιλυτής θα μπορεί να το επιλέξει προτιμησιακά, μειώνοντας εξάρτηση από τη λογιστική *book-and-claim* για δρομολόγια με φυσική διαθεσιμότητα πράσινου καυσίμου.

Για την υλοποίηση αυτής της σύνδεσης πρόκειται να δημιουργηθεί νέο σημείο πρόσβασης API (endpoint) που θα εκθέτει τα διαθέσιμα αποθέματα Energy Bank ανά λιμάνι και χρονικό παράθυρο, το οποίο θα αντλεί το BOPS κατά τη φάση συγχέντρωσης δεδομένων πριν από κάθε εκτέλεση πλάνου (plan run). Η ολοκληρωμένη αυτή οπτική — κόστος καυσίμου, κόστος άνθρακα, διαθεσιμότητα πράσινης ενέργειας — θα μετατρέψει το BOPS από εργαλείο ελαχιστοποίησης κόστους σε στρατηγικό σύστημα λήψης αποφάσεων που ευθυγραμμίζει κάθε απόφαση ανεφοδιασμού με τους στόχους απανθρακοποίησης του ομίλου.

Κεφάλαιο 13 — Βιβλιογραφία

13.1 Διεθνή πρότυπα και πρωτόκολλα

[CEN EN 16258, 2012] — European Committee for Standardization. *Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers)*. EN 16258:2012. Brussels: CEN.

[GHG Protocol Corporate Standard, 2004] — World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard* (Revised Edition). Washington, DC / Geneva. Διαθέσιμο στο <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>.

[GHG Protocol Scope 2 Guidance, 2015] — World Resources Institute. *GHG Protocol Scope 2 Guidance: An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard*. Washington, DC. Διαθέσιμο στο <https://ghgprotocol.org/scope-2-guidance>.

[GHG Protocol Scope 3 Standard, 2011] — World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*. Washington, DC / Geneva. Διαθέσιμο στο <https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard>.

[GLEC Framework v3.0, 2023] — Smart Freight Centre. *Global Logistics Emissions Council Framework for Logistics Emissions Accounting and Reporting* (Version 3.0). Amsterdam: Smart Freight Centre. Διαθέσιμο στο <https://www.smartfreightcentre.org/en/our-programs/global-logistics-emissions-council/>.

[IPCC AR5, 2013] — Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report*. Cambridge University Press.

[ISCC System Document ISCC-203, 2023] — ISCC System GmbH. *Requirements for Traceability* (System Document 203, Version 4.0). Cologne: ISCC. Διαθέσιμο στο <https://www.iscc-system.org/>.

[ISO 14064-1, 2018] — International Organization for Standardization. *Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals*. ISO 14064-1:2018. Geneva.

[SBTi Corporate Manual, 2023] — Science Based Targets initiative. *SBTi Corporate Net-Zero Standard Criteria* (Version 1.2) και *Maritime Transport Sector Decarbonization Approach*. Διαθέσιμα στο <https://sciencebasedtargets.org/>.

[UNFCCC, 2012] — United Nations Framework Convention on Climate Change. *Doha Amendment to the Kyoto Protocol*. Διαθέσιμο στο <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/the-doha-amendment>.

13.2 Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO)

[IMO 4th GHG Study, 2020] — International Maritime Organization. *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020*. London: IMO. Διαθέσιμο στο <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>.

[MARPOL Annex VI, 2008] — International Maritime Organization. *MARPOL Annex VI: Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships*. London: IMO.

[MEPC.377(80), 2023] — International Maritime Organization. *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. Resolution MEPC.377(80). Marine Environment Protection Committee, 80th session. London: IMO.

13.3 Ευρωπαϊκή νομοθεσία

[CSRD, 2022] — Ευρωπαϊκή Ένωση. *Οδηγία (ΕΕ) 2022/2464 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 14ης Δεκεμβρίου 2022 σχετικά με την υποβολή εκθέσεων βιωσιμότητας από τις εταιρείες. Επίσημη Εφημερίδα της ΕΕ L 322/15*. Διαθέσιμη στο <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464>.

[EU ETS Maritime, 2023] — Ευρωπαϊκή Ένωση. *Οδηγία (ΕΕ) 2023/959 για την επέκταση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών στις θαλάσσιες μεταφορές. Επίσημη Εφημερίδα της ΕΕ L 130/134*. Διαθέσιμη στο <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/959>.

[FuelEU Maritime, 2023] — Ευρωπαϊκή Ένωση. *Κανονισμός (ΕΕ) 2023/1805 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 13ης Σεπτεμβρίου 2023 σχετικά με τη χρήση ανανεώσιμων και χαμηλών εκπομπών άνθρακα καυσίμων στις θαλάσσιες μεταφορές. Επίσημη Εφημερίδα της ΕΕ L 234/48*. Διαθέσιμος στο <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1805>.

[MRV Maritime, 2015] — Ευρωπαϊκή Ένωση. *Κανονισμός (ΕΕ) 2015/757 για την παρακολούθηση, αναφορά και επαλήθευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από θαλάσσιες μεταφορές. Επίσημη Εφημερίδα της ΕΕ L 123/55*.

[RED II, 2018] — Ευρωπαϊκή Ένωση. *Οδηγία (ΕΕ) 2018/2001 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 11ης Δεκεμβρίου 2018 σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (αναδιτύπωση). Επίσημη Εφημερίδα της ΕΕ L 328/82*.

13.4 Βιβλία και τεχνική βιβλιογραφία

[Armstrong, 2013] — Armstrong, J. (2013). *Programming Erlang: Software for a Concurrent World* (2nd Edition). Pragmatic Bookshelf. ISBN 978-1-937785-53-6.

[Beck, 2002] — Beck, K. (2002). *Test-Driven Development: By Example*. Addison-Wesley Professional. ISBN 978-0-321-14653-3.

[Beck & Andres, 2004] — Beck, K. & Andres, C. (2004). *Extreme Programming Explained: Embrace Change* (2nd Edition). Addison-Wesley Professional. ISBN 978-0-321-27865-4.

[Evans, 2003] — Evans, E. (2003). *Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software*. Addison-Wesley Professional. ISBN 978-0-321-12521-7.

[Humble & Farley, 2010] — Humble, J. & Farley, D. (2010). *Continuous Delivery: Reliable Software Releases through Build, Test, and Deployment Automation*. Addison-Wesley Professional. ISBN 978-0-321-60191-9.

[Jurić, 2024] — Jurić, S. (2024). *Elixir in Action* (3rd Edition). Manning Publications. ISBN 978-1-63343-911-2.

[Martin, 2017] — Martin, R. C. (2017). *Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design*. Prentice Hall. ISBN 978-0-13-449416-6.

[Thomas, 2018] — Thomas, D. (2018). *Programming Elixir ≥ 1.6*. Pragmatic Bookshelf. ISBN 978-1-68050-299-2.

[Vernon, 2013] — Vernon, V. (2013). *Implementing Domain-Driven Design*. Addison-Wesley Professional. ISBN 978-0-321-83457-7.

[Young, 2010] — Young, G. (2010). *CQRS Documents*. Self-published whitepaper. Διαθέσιμο στο https://cQRS.files.wordpress.com/2010/11/cQRS_documents.pdf.

13.5 Διαδικτυακοί πόροι και τεκμηρίωση τεχνολογιών

[Apache Kafka, 2024] — Apache Software Foundation. *Apache Kafka Documentation*. Διαθέσιμο στο <https://kafka.apache.org/documentation/>.

[CDP, 2024] — Carbon Disclosure Project. *CDP Climate Change Questionnaire και Methodology*. Διαθέσιμο στο <https://www.cdp.net/>.

[Commanded, 2024] — Commanded Library Authors. *Commanded — Use Commanded to build Elixir CQRS/ES applications*. Διαθέσιμο στο <https://hexdocs.pm/commanded/>.

[Ecto, 2024] — Dashbit. *Ecto Documentation*. Διαθέσιμο στο <https://hexdocs.pm/ecto/>.

[Maersk, 2024] — A.P. Møller-Mærsk. *Sustainability Report 2024 — Towards Net Zero by 2040*. Copenhagen: A.P. Møller-Mærsk. Διαθέσιμο στο <https://www.maersk.com/sustainability/reports-and-resources>.

[Nix, 2024] — NixOS Foundation. *Nix Reference Manual και Nix Flakes Documentation*. Διαθέσιμο στο <https://nix.dev/>.

[Oban, 2024] — Sorentwo. *Oban — Robust job processing in Elixir*. Διαθέσιμο στο <https://hexdocs.pm/oban/>.

[OpenTelemetry, 2024] — Cloud Native Computing Foundation. *OpenTelemetry Specification*. Διαθέσιμο στο <https://opentelemetry.io/docs/specs/>.

[Phoenix Framework, 2024] — Phoenix Framework Authors. *Phoenix Framework Documentation και LiveView Documentation*. Διαθέσιμα στο

<https://hexdocs.pm/phoenix/> και https://hexdocs.pm/phoenix_live_view/.

[PostgreSQL, 2024] — PostgreSQL Global Development Group. *PostgreSQL 16 Documentation*. Διαθέσιμο στο <https://www.postgresql.org/docs/16/>.

[Terraform, 2024] — HashiCorp. *Terraform Documentation*. Διαθέσιμο στο <https://developer.hashicorp.com/terraform/docs>.

13.6 Πηγές εικόνων

Σχήμα 1 (Κεφ. 3.2). — *Carbon Accounting Scopes*. Άδεια Creative Commons CC BY 4.0. Διαθέσιμο στο <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=140748311>.

Σχήμα 2 (Κεφ. 10.6). — *Extreme Programming Feedback Loops*. Don Wells — προσωπικό έργο βάσει XP-feedback.gif. Άδεια Creative Commons CC BY-SA 3.0. Διαθέσιμο στο <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=27448045>.

