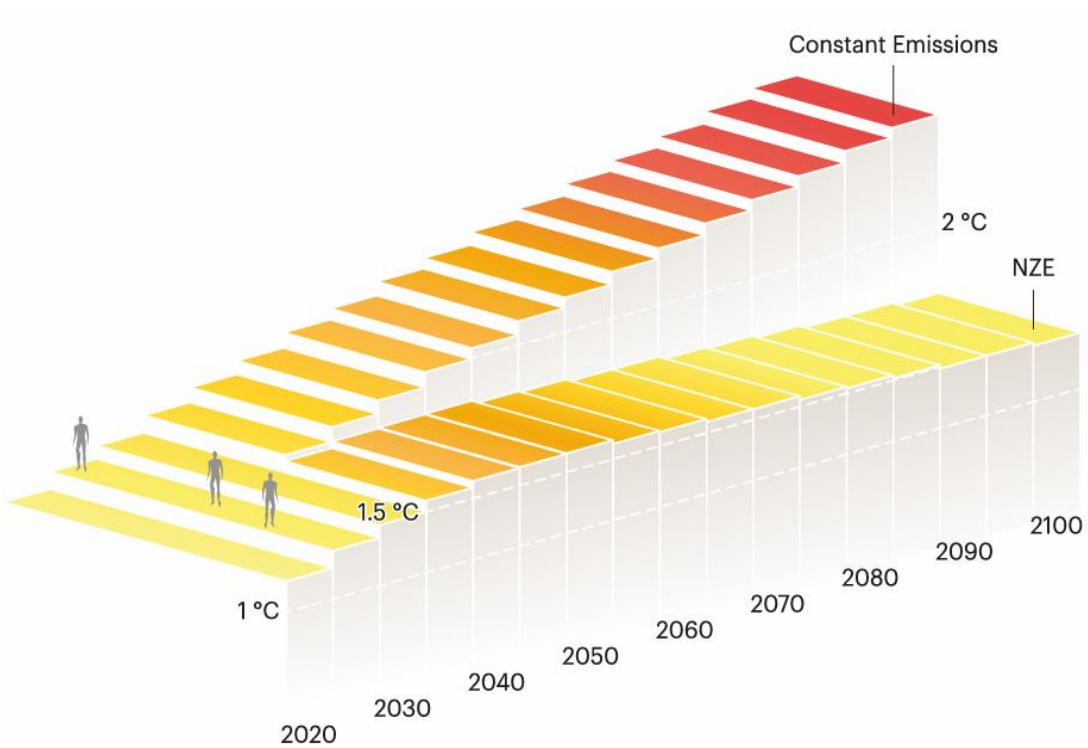


ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΗΔΕΝΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ (NZE)

WORLD ENERGY OUTLOOK 2025 (IEA)



Περιεχόμενα

1.	Πλαίσιο Σεναρίου NZE	3
1.1	Διεθνές Κλιματικό Πλαίσιο και Στόχοι της Συμφωνίας του Παρισιού	3
1.2	Τρέχουσα Κατάσταση και Κίνδυνος Υπέρβασης	3
1.3	Οικονομικές και Γεωπολιτικές Παράμετροι της Ενεργειακής Μετάβασης	4
2.	Εξέλιξη Εκπομπών και Κλιματικές Επιπτώσεις	6
2.1	Μείωση Εκπομπών και Τεχνολογικές Προκλήσεις	6
2.2	Βραχύβιοι Ρύποι και Τεχνολογίες Απομάκρυνσης Άνθρακα	7
2.3	Κλιματικά Κίνδυνοι και Αβεβαιότητα	8
3.	Μετασχηματισμός του Ενεργειακού Συστήματος στο NZE	9
3.1	Ο Ρόλος του Εξηλεκτρισμού στη Μείωση Εκπομπών	9
3.2	Εξηλεκτρισμός Τομέων Τελικής Κατανάλωσης	10
3.3	Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Τεχνολογική Καινοτομία	11
3.4	Καύσιμα Χαμηλών Εκπομπών στον Ενεργειακό Μετασχηματισμό	12
3.4.1	Συμβολή Βιοενέργειας και Βιοκαυσίμων	12
3.4.2	Υδρογόνο Χαμηλών Εκπομπών και Απανθρακοποίηση	13
3.5	Μείωση και Διαχείριση Εκπομπών Μεθανίου	14
4.	Οικονομικές Απαιτήσεις και Επενδυτικό Πλαίσιο	17
4.1	Χρηματοδότηση της Ενεργειακής Μετάβασης	17
4.2	Ορυκτά Καύσιμα και Τεχνολογίες Αντιστάθμισης	18
5.	Κοινωνικές και Υγειονομικές Επιπτώσεις της Ενεργειακής Μετάβασης	19
5.1	Προσιτότητα της Ενέργειας για τα Νοικοκυριά	19
5.2	Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Δημόσια Υγεία	20
6.	Ενεργειακή Ασφάλεια στο NZE	22
6.1	Ασφάλεια των Καυσίμων	22
6.2	Ασφάλεια Ηλεκτροδότησης	22
6.3	Ασφάλεια των Κρίσιμων Ορυκτών	23
7.	Εξελίξεις και Προκλήσεις της Επόμενης Δεκαετίας	25
8.	Συμπεράσματα και Ευκαιρίες	26
9.	Κατάλογος Σχημάτων	27

1. Πλαίσιο Σεναρίου NZE

1.1 Διεθνές Κλιματικό Πλαίσιο και Στόχοι της Συμφωνίας του Παρισιού

Η Συμφωνία του Παρισιού έθεσε ως στόχο τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη κάτω από τους 2°C και, κατά προτίμηση, στους 1,5°C, κάτι που απαιτεί μηδενικές εκπομπές από τον ενεργειακό τομέα έως τα μέσα του αιώνα. Στο πλαίσιο αυτό, οι αποφάσεις της COP28 λειτούργησαν ως καταλύτης, θέτοντας συγκεκριμένα ορόσημα, όπως τον τριπλασιασμό της ισχύος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και τον διπλασιασμό του ρυθμού βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας έως το 2030. Το σενάριο Net Zero Emissions (NZE) του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA) περιγράφει μια παγκόσμια πορεία συμβατή με τον στόχο των 1,5°C, αναγνωρίζοντας ωστόσο ότι η πορεία προς το μηδέν δεν είναι ομοιόμορφη, καθώς κάθε κράτος καλείται να χαράξει τη δική του στρατηγική βασιζόμενο στις εθνικές του ιδιαιτερότητες. Η ανάγκη για ριζική αλλαγή πορείας αντικατοπτρίζεται στο **Σχήμα 1**, όπου αποτυπώνεται η αναγκαία μείωση των εκπομπών CO₂ για την επίτευξη του στόχου NZE. Το NZE επικυρώνεται ετησίως ώστε να λαμβάνει υπόψη τις τρέχουσες επενδύσεις, τεχνολογικές εξελίξεις και εκπομπές, σε ένα περίπλοκο γεωπολιτικό και οικονομικό περιβάλλον όπου οι εκπομπές παραμένουν υψηλές και η πρόοδος στις καθαρές τεχνολογίες άνηση.

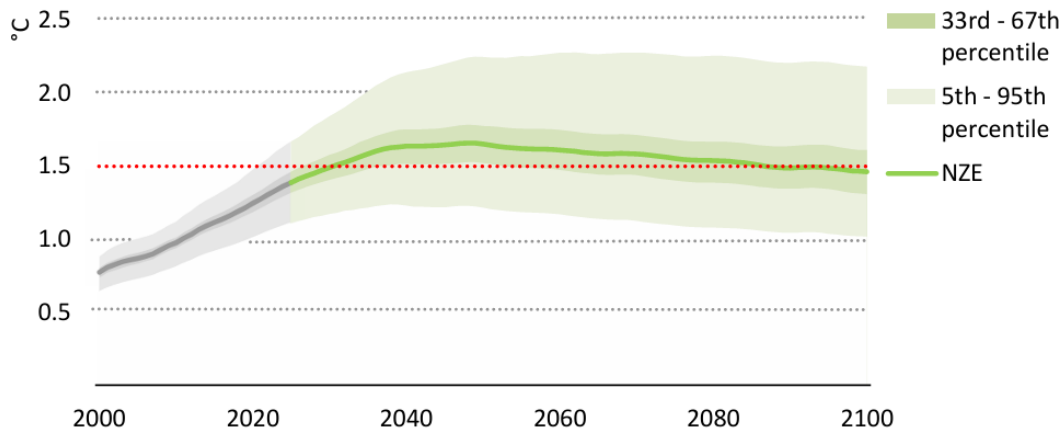


Σχήμα 1. Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ από τον ενεργειακό τομέα ανά σενάριο.

1.2 Τρέχουσα Κατάσταση και Κίνδυνος Υπέρβασης

Παρά τη σαφήνεια του στόχου, η τρέχουσα πραγματικότητα παραμένει ανησυχητική. Οι εκπομπές CO₂ συνεχίζουν να αυξάνονται, καθιστώντας όλο και πιο δύσκολο τον περιορισμό της υπερθέρμανσης κάτω από 1,5°C. Λόγω της καθυστέρησης στην εφαρμογή ενεργειών για τη

μείωση των εκπομπών, το NZE δείχνει προσωρινή υπέρβαση των 1,5°C γύρω στο 2040, με κορύφωση κοντά στους 1,6°C καθιστώντας την επόμενη δεκαετία αρκετά κρίσιμη. Για να επιστρέψει ο πλανήτης σε ασφαλή επίπεδα θερμοκρασίας έως το 2100, απαιτείται πλέον δραστική μείωση εκπομπών ετησίως. Η εξέλιξη της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας και η κρίσιμη δεκαετία της υπέρβασης φαίνονται στο **Σχήμα 2**.



IEA. CC BY 4.0.

Σχήμα 2. Εξέλιξη της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας και υπέρβαση του ορίου 1,5°C στο σενάριο NZE.

Αξιολογώντας την πρόοδο που έχει σημειωθεί, παρατηρείται μια εικόνα δύο ταχυτήτων. Από τη μία πλευρά, τεχνολογίες όπως τα ηλιακά φωτοβολταϊκά και η ηλεκτροκίνηση επιδεικνύουν μια εντυπωσιακή δυναμική, ξεπερνώντας συχνά ακόμη και τις πιο αισιόδοξες προβλέψεις του NZE του 2021. Από την άλλη πλευρά, κρίσιμοι παράγοντες όπως η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS), οι τεχνολογίες υδρογόνου και η συνολική ενεργειακή απόδοση φαίνεται να υστερούν. Επιπλέον, οι επενδύσεις και η ανάπτυξη καθαρών τεχνολογιών παραμένουν γεωγραφικά συγκεντρωμένες σε ανεπτυγμένες οικονομίες και Κίνα, αφήνοντας το μεγαλύτερο μέρος του αναπτυσσόμενου κόσμου εκτεθειμένο στην κλιματική κρίση χωρίς τα απαραίτητα εργαλεία μετάβασης.

1.3 Οικονομικές και Γεωπολιτικές Παράμετροι της Ενεργειακής Μετάβασης

Η υλοποίηση της πράσινης μετάβασης καλείται σήμερα να αντιμετωπίσει ένα τριπλό μέτωπο προκλήσεων που περιπλέκει το διεθνές σκηνικό. Πρώτον, η οικονομική πίεση. Η σημαντική αύξηση του πληθωρισμού, ιδίως στον τομέα της ενέργειας, εν μέρει λόγω της ενεργειακής κρίσης του 2022, έχει πλήξει την προσιτότητα της ενέργειας, δημιουργώντας κοινωνικές πιέσεις. Δεύτερον, το χρηματοδοτικό κόστος. Οι καθαρές τεχνολογίες χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος αρχικού κεφαλαίου. Σε ένα περιβάλλον υψηλών επιτοκίων, οι επενδύσεις αυτές

καθίστανται απαγορευτικές για πολλές χώρες με περιορισμένους δημοσιονομικούς πόρους. Τρίτον, η γεωπολιτική αστάθεια στις διεθνείς σχέσεις και η υποχώρηση της παγκόσμιας εμπιστοσύνης δυσχεραίνουν τη συνεργασία που είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος που δεν γνωρίζει σύνορα.

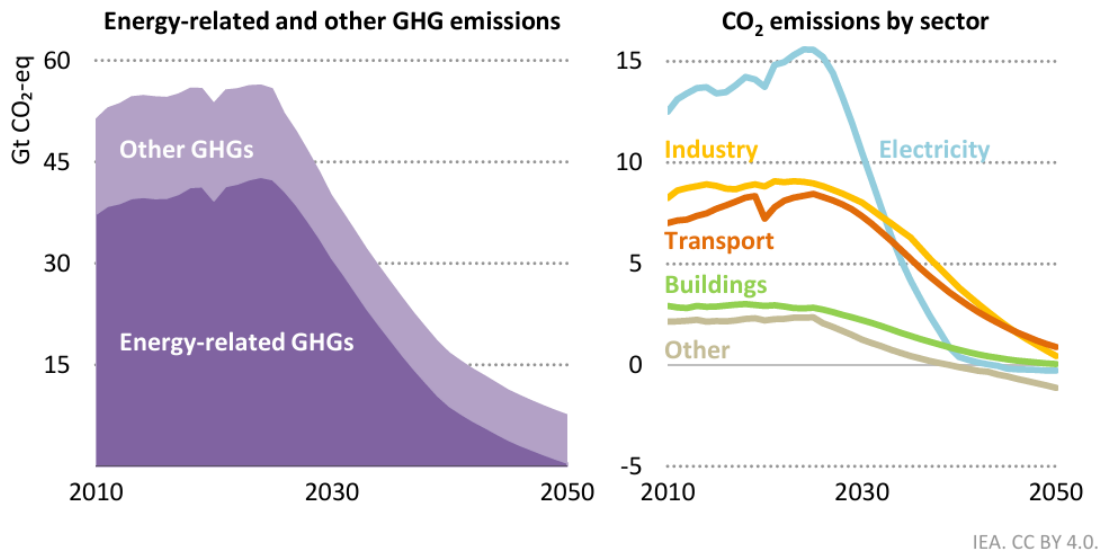
Η πιο πρόσφατη εκδοχή του σεναρίου NZE παρουσιάζει μια πορεία που παραμένει φιλόδοξη αλλά και ρεαλιστική. Αναγνωρίζει ότι, ακόμα και με την επίτευξη των στόχων της COP28, η μετάβαση θα είναι πιο αργή από το αρχικά επιδιωκόμενο, οδηγώντας σε μια παρατεταμένη περίοδο υπέρβασης του ορίου θερμοκρασίας. Η τελική επιτυχία και η επαναφορά κάτω από τους 1,5°C έως το τέλος του αιώνα θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από τεχνολογίες απομάκρυνσης CO₂ που δεν έχουν ακόμη δοκιμαστεί σε μεγαλύτερη κλίμακα. Ωστόσο, το σενάριο παραμένει εντός των ορίων του Παρισιού για θέρμανση κάτω των 2 °C και επιτυγχάνει τους διεθνώς συμφωνημένους ενεργειακούς στόχους.

2. Εξέλιξη Εκπομπών και Κλιματικές Επιπτώσεις

2.1 Μείωση Εκπομπών και Τεχνολογικές Προκλήσεις

Παρά τις διεθνείς προσπάθειες, το 2024 κατέγραψε ένα ιστορικό ρεκόρ στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, με το CO₂ να αποτελεί την κύρια πηγή. Στο πλαίσιο του σεναρίου NZE, προβλέπεται μια δραστική μείωση των συνολικών εκπομπών κατά 50% έως το 2035, και σχεδόν 55% μείωση των εκπομπών CO₂. Η μεγαλύτερη ευκαιρία για άμεση πρόοδο εντοπίζεται στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, ο οποίος, αν και σήμερα ευθύνεται για το 40% των εκπομπών, διαθέτει τις πιο ώριμες τεχνολογικές λύσεις.

Ωστόσο, η πραγματική δοκιμασία για τις επόμενες δεκαετίες εντοπίζεται στους λεγόμενους δύσκολους στην απανθρακοποίηση τομείς. Η βαριά βιομηχανία, οι οδικές εμπορευματικές μεταφορές, η ναυτιλία και η αεροπορία θα αποτελούν την κύρια πηγή υπολειπόμενων εκπομπών έως το 2050. Το γεγονός αυτό, υπογραμμίζει την ανάγκη για στοχευμένες τεχνολογικές λύσεις και σε αυτούς τους τομείς αλλά και επιχειρηματικές ευκαιρίες για τις οικονομίες που θα πρωτοπορήσουν στην ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών. Η στοχευμένη μείωση των εκπομπών ανά τομέα δραστηριότητας αποτυπώνονται στο **Σχήμα 3**.

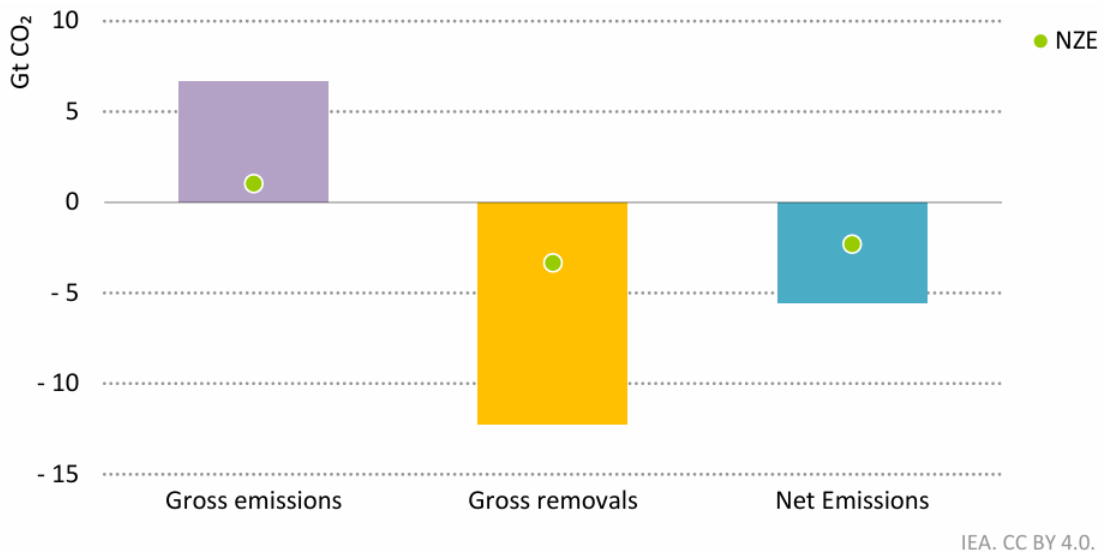


Σχήμα 3. Πορεία μείωσης εκπομπών CO₂ ανά τομέα δραστηριότητας στο σενάριο NZE.

2.2 Βραχύβιοι Ρύποι και Τεχνολογίες Απομάκρυνσης Άνθρακα

Το NZE προβλέπει επίσης και σημαντική πρόοδο στη μείωση βραχύβιων ατμοσφαιρικών ρύπων (SLCFs), με κυριότερους το μεθάνιο και τον μαύρο άνθρακα. Αν και έχουν μικρό χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα, η θερμαντική τους ισχύς είναι πολλαπλάσια του CO₂. Η μείωσή τους, η οποία αναμένεται να ξεπεράσει το 80% το 2035, προσφέρει σημαντικά οφέλη τόσο για το κλίμα, όσο και για την δημόσια υγεία παγκοσμίως. Παράλληλα, η αντιμετώπιση των μη ενεργειακών εκπομπών από τη γεωργία και την αποδάσωση παραμένει δύσκολη. Σύμφωνα με το NZE, για την μείωση των συνολικών εκπομπών, τονίζονται δύο βασικά σημεία. Πρώτον, η πλήρης εξάλειψή τους απαιτεί ολοκληρωμένη προσέγγιση, που συνδυάζει την μετάβαση στον ηλεκτρισμό με πολιτικές και τεχνολογικές καινοτομίες στους διάφορους τομείς. Δεύτερον, οι τεχνολογίες απομάκρυνσης CO₂ και η διαχείριση SLCFs είναι κρίσιμες για να περιοριστεί η υπερθέρμανση τις επόμενες δεκαετίες.

Η παραδοχή ότι η υπέρβαση των 1,5°C είναι πιθανή, καθιστά τις τεχνολογίες απομάκρυνσης CO₂ από την ατμόσφαιρα σημαντικό κομμάτι του NZE. Για να επιστρέψει η μέση παγκόσμια θερμοκρασία κάτω από το όριο 1,5 °C, απαιτείται εκτεταμένη απομάκρυνση CO₂ από την ατμόσφαιρα. Το NZE προτείνει τεχνολογίες όπως η βιοενέργεια με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (BECCS) και η άμεση απορρόφηση CO₂ από τον αέρα με αποθήκευση (DACs) για την επίτευξη του στόχου. Η τεχνολογία BECCS συνδυάζει την παραγωγή ενέργειας με την αφαίρεση άνθρακα, η οποία όμως περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα βιώσιμης βιομάζας καθώς και τις οικονομικές και λογιστικές προκλήσεις για τη μεταφορά και αποθήκευση του CO₂, ενώ η τεχνολογία DACs δεν έχει περιορισμούς σε πρώτες ύλες, χαρακτηρίζεται όμως από εξαιρετικά υψηλό ενεργειακό κόστος. Για ένα πιο βιώσιμο μέλλον, έως το 2100, η ετήσια απομάκρυνση άνθρακα θα πρέπει να ισούται με τις τρέχουσες εκπομπές της Ινδίας και της Ινδονησίας μαζί. Σήμερα, η συνολική δυναμικότητα απομάκρυνσης CO₂ ανέρχεται μόλις σε 1 Mt ετησίως. Αν και πρόσφατες εταιρικές δεσμεύσεις δείχνουν μια τάση εκθετικής αύξησης, εξακολουθεί να απέχει σημαντικά από τα 660 Mt CO₂ που απαιτούνται στο NZE το 2035. Η επίτευξη αυτών των επιπέδων θα χρειαστεί συντονισμένες προσπάθειες για καινοτομίες, τεράστια κεφάλαια και διεθνή συνεργασία. Η ανάγκη για τη δημιουργία αξιόπιστων, μετρήσιμων και πιστοποιημένων μεθόδων απομάκρυνσης άνθρακα είναι επιτακτική και απαιτεί συντονισμένη κινητοποίηση πόρων για επιτυχημένη εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα. Η συμβολή των διαφόρων τεχνολογικών μέτρων, συμπεριλαμβανομένης της δέσμευσης και απομάκρυνσης άνθρακα, στην επίτευξη των στόχων του NZE αποτυπώνεται στο **Σχήμα 4**.



Σχήμα 4. Συμβολή τεχνολογικών μέτρων στη μείωση εκπομπών CO₂ στο σενάριο NZE.

2.3 Κλιματικοί Κίνδυνοι και Αβεβαιότητα

Με την παγκόσμια θερμοκρασία να έχει ήδη αυξηθεί κατά 1,4°C, η υπέρβαση του ορίου των 1,5°C για ορισμένες δεκαετίες θεωρείται πλέον μέρος του βασικού σεναρίου NZE. Η σταδιακή μείωση μετά το 2050 βασίζεται σε φυσικές διαδικασίες απορρόφησης CO₂, μειώσεις SLCFs και αναδασώσεις, αλλά χωρίς ευρεία χρήση τεχνολογιών απομάκρυνσης CO₂, ο στόχος των 1,5 °C παραμένει απρόσιτος.

Η παρατεταμένη υπέρβαση θερμοκρασίας, που προβλέπει το NZE, ενέχει σημαντικούς κινδύνους. Τα ακραία καιρικά φαινόμενα θα ενταθούν, πλήττοντας δυσανάλογα τους ευάλωτους πληθυσμούς και ασκώντας πίεση στις ενεργειακές υποδομές, οι οποίες θα κληθούν να αντιμετωπίσουν πρόσθετα κόστη προσαρμογής. Ακόμη, οι φυσικοί μηχανισμοί και τα οικοσυστήματα κινδυνεύουν από μη αναστρέψιμες αλλαγές, οι οποίες θα έχουν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις ακόμη κι αν η θερμοκρασία μειωθεί αργότερα.

Η ανάλυση του IEA δείχνει ότι ακόμη και με την πλήρη εφαρμογή του NZE, υπάρχει 45% πιθανότητα η θερμοκρασία να μην υποχωρήσει κάτω από τους 1,5°C έως το 2100, και 20% πιθανότητα να ξεπεραστεί ακόμα και το όριο των 2°C. Η υπέρβαση των 1,5°C δεν είναι απλώς ένα όριο, αλλά φέρνει μακροχρόνιους και εν μέρει μη αναστρέψιμους κινδύνους. Καθώς οι τρέχουσες πολιτικές και τα διάφορα σενάρια δεν εγγυώνται την αποφυγή σοβαρών κινδύνων απαιτείται ένας συνδυασμός άμεσης και δραστηκής μείωσης εκπομπών, ταχύτατης ανάπτυξης τεχνολογιών απομάκρυνσης και επενδύσεις στην προσαρμογή και την ανθεκτικότητα.

3. Μετασχηματισμός του Ενεργειακού Συστήματος στο NZE

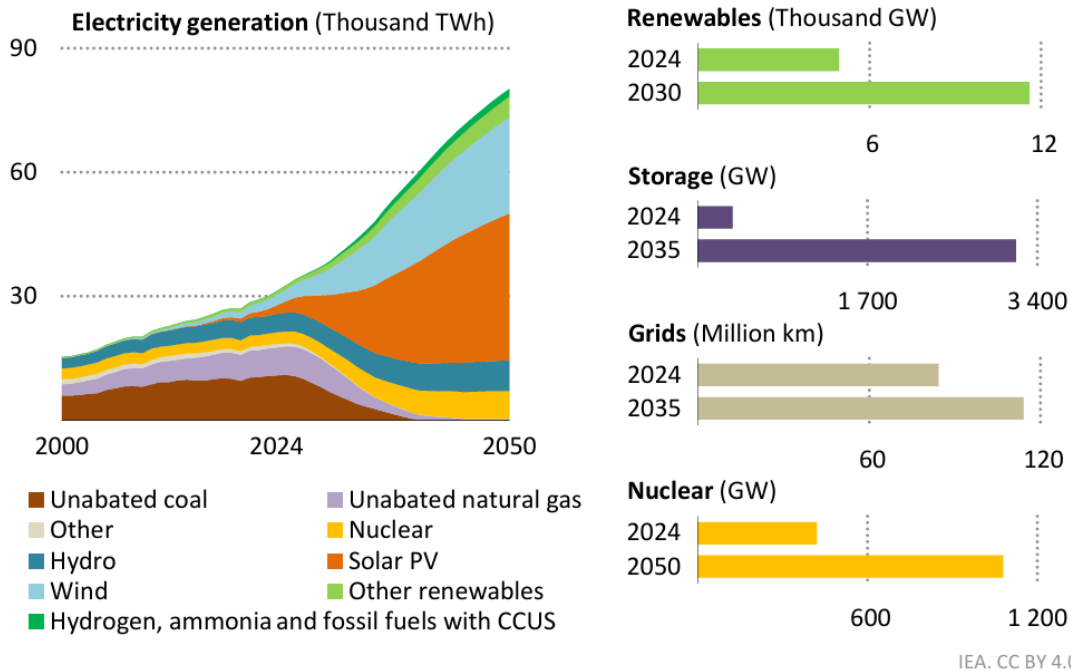
3.1 Ο Ρόλος του Εξηλεκτρισμού στη Μείωση Εκπομπών

Το σενάριο NZE περιγράφει μια παγκόσμια πορεία προς την επίτευξη μηδενικών εκπομπών έως το 2050, διαφορετική για κάθε χώρα ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Η μετάβαση βασίζεται στη συγκεντρωμένη δράση τεσσάρων παραγόντων, τον καθολικό εξηλεκτρισμό, την ενεργειακή αποδοτικότητα, τη χρήση καυσίμων χαμηλών εκπομπών και τη δραστική μείωση των εκπομπών μεθανίου.

Ο τομέας ηλεκτρισμού, που σήμερα ευθύνεται για περίπου το 40% των ενεργειακών εκπομπών, βρίσκεται στο επίκεντρο του NZE. Η στροφή της ηλεκτροπαραγωγής σε πηγές χαμηλών εκπομπών και η εκτεταμένη χρήση καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας συνεισφέρουν σημαντικά στη μείωση των εκπομπών έως το 2035. Στο πλαίσιο του NZE, προβλέπεται ότι έως το 2040 η ηλεκτροπαραγωγή θα βασίζεται εξ ολοκλήρου σε πηγές χαμηλών εκπομπών, ενώ ο εξηλεκτρισμός θα αποκτήσει κεντρικό ρόλο στο ενεργειακό σύστημα, καλύπτοντας πάνω από το ήμισυ της συνολικής κατανάλωσης έως το 2050. Η σταδιακή εδραίωση των καθαρών πηγών στο παγκόσμιο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής παρουσιάζεται αναλυτικά στο **Σχήμα 5**. Η εξέλιξη αυτή αναδεικνύει την αυξανόμενη σημασία της ενεργειακής ασφάλειας σε ένα τέτοιο περιβάλλον.

Ειδικότερα, προβλέπεται μια ταχεία μετατόπιση προς τις ΑΠΕ και την πυρηνική ενέργεια, οι οποίες αποκτούν κυρίαρχο ρόλο, ενώ τα ορυκτά καύσιμα με χρήση CCUS, το υδρογόνο και η αμμωνία ακολουθούν με μικρότερα ποσοστά. Παρότι το 2024 οι καθαρές πηγές κάλυπταν λίγο πάνω από το 40% της παγκόσμιας παραγωγής, έως το 2035 οι ΑΠΕ αναμένεται να φθάσουν τα τρία τέταρτα της συνολικής παραγωγής, ως αποτέλεσμα του τριπλασιασμού της εγκατεστημένης ισχύος τους έως το 2030. Η μετάβαση αυτή συνοδεύεται από την ανάγκη για ενισχυμένη ευελιξία των συστημάτων και αυξημένες επενδύσεις σε δίκτυα και αποθήκευση, με τις μπαταρίες και τις υποδομές μεταφοράς να αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για τη διατήρηση της ασφάλειας εφοδιασμού.

Καθώς ενισχύεται η συμμετοχή των μεταβλητών ΑΠΕ, αυξάνεται παράλληλα η ανάγκη για ευέλικτη και ελεγχόμενη ισχύ. Στο πλαίσιο αυτό, η πυρηνική ενέργεια και η υδροηλεκτρική παραγωγή επεκτείνονται σημαντικά, ενώ διατηρείται η λειτουργία συμβατικών μονάδων κυρίως για λόγους ευελιξίας και επάρκειας. Επιπλέον, μονάδες με δέσμευση άνθρακα, καθώς και μονάδες που χρησιμοποιούν υδρογόνο ή αμμωνία, συμβάλλουν στη διασφάλιση επαρκούς ισχύος με χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα.



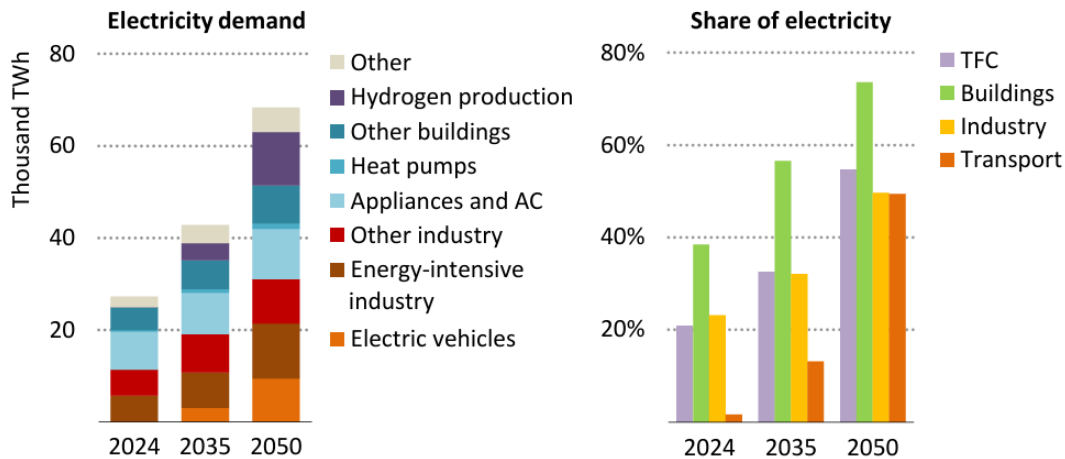
Σχήμα 5. Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή στο σενάριο NZE.

3.2 Εξηλεκτρισμός Τομέων Τελικής Κατανάλωσης

Ο εξηλεκτρισμός αποτελεί βασικό παράγοντα μείωσης των εκπομπών CO₂ στους τομείς τελικής χρήσης, όπως η βιομηχανία, οι μεταφορές και τα κτίρια. Οι τομείς αυτοί σήμερα, ευθύνονται για πάνω από το μισό των συνολικών εκπομπών. Στο σενάριο NZE, ο εξηλεκτρισμός συμβάλλει σε περίπου 40% της μείωσης εκπομπών από αυτούς τους τομείς έως το 2050.

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά, με μέση ετήσια αύξηση 4,1% έως το 2035, οπότε ο ηλεκτρισμός θα καλύπτει το ένα τρίτο της τελικής κατανάλωσης¹, φτάνοντας πάνω από το μισό έως το 2050. Ενώ στον κτιριακό τομέα η ηλεκτροδότηση είναι πιο έντονη, στις μεταφορές και τη βιομηχανία παραμένει η ανάγκη για καύσιμα χαμηλών εκπομπών, καθώς ο πλήρης εξηλεκτρισμός εκεί παραμένει τεχνικά δύσκολος. Συγκεκριμένα, η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών κατά 2,4 Gt έως το 2035, ενώ οι αντλίες θερμότητας αναμένεται να αυξήσουν τη συμμετοχή τους στη θέρμανση από το 12% σήμερα στο 45% το 2050. Η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τομέα τελικής χρήσης, καθώς και η συνολική συμμετοχή του ηλεκτρισμού στην τελική κατανάλωση, αποτυπώνονται αναλυτικά στο **Σχήμα 6**.

¹ Τελική κατανάλωση ενέργειας: η ενέργεια που καταναλώνουν οι τελικοί χρήστες (νοικοκυριά/κτίρια, μεταφορές, βιομηχανία, υπηρεσίες κ.λπ.) για λειτουργικές ανάγκες, χωρίς τις απώλειες μετατροπής στην παραγωγή και τις ιδιοκαταναλώσεις του ενεργειακού κλάδου.



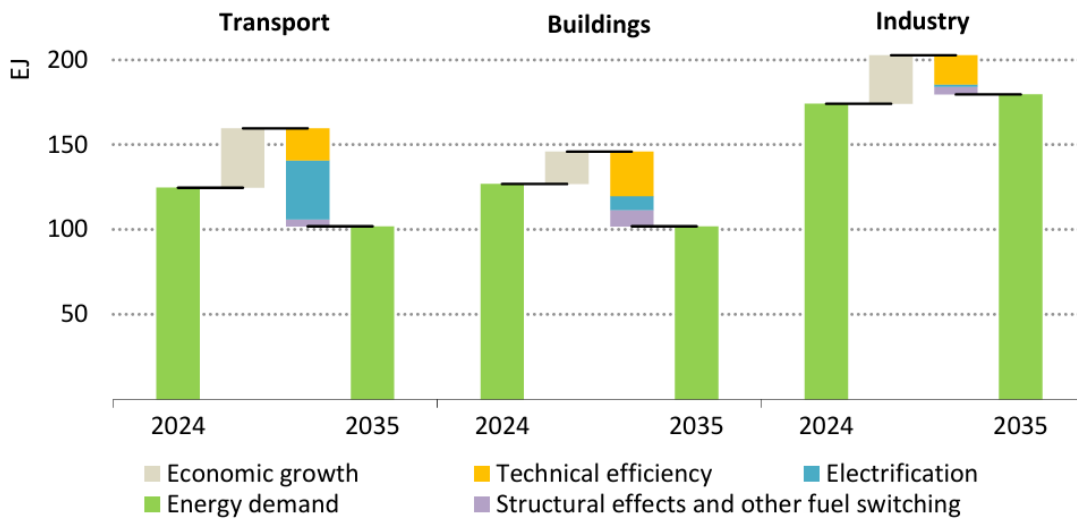
IEA. CC BY 4.0.

Σχήμα 6. Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χρήση και συμμετοχή στην τελική κατανάλωση ανά τομέα στο σενάριο NZE.

3.3 Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Τεχνολογική Καινοτομία

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί κρίσιμο πυλώνα της μετάβασης, καθώς περιορίζει τη συνολική ζήτηση και ενισχύει την οικονομική ανταγωνιστικότητα και την προσιτότητα της ενέργειας. Στο NZE, ο ρυθμός βελτίωσης της ενεργειακής έντασης διπλασιάζεται στο 4% ετησίως έως το 2030. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τεχνολογικών βελτιώσεων σε κτίρια και εξοπλισμό, εξηλεκτρισμού όπου είναι εφικτό, αποδοτικότερης χρήσης υλικών και αξιοποίησης της τεχνητής νοημοσύνης στη βιομηχανία.

Ανάλογα με τον τομέα, η σημασία της ενεργειακής αποδοτικότητας διαφοροποιείται. Ειδικότερα, στον κτιριακό τομέα, η εφαρμογή αυστηρότερων προτύπων απόδοσης, ο εξηλεκτρισμός της θέρμανσης και η εναλλαγή σε αποδοτικότερα καύσιμα για το μαγείρεμα συμβάλλουν σημαντικά στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Στις μεταφορές, η μετάβαση σε ηλεκτρικά οχήματα και οι αλλαγές στα πρότυπα μεταφοράς οδηγούν σε μείωση της κατανάλωσης, παρά την αύξηση της ανάγκης των μετακινήσεων. Στην βιομηχανία, η αποτελεσματικότερη χρήση των υλικών, η ανακύκλωση, οι βελτιστοποιήσεις του εξοπλισμού και των διαδικασιών παραγωγής, καθώς και η αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης ενισχύουν την ενεργειακή αποδοτικότητα. Η επίδραση των διαφόρων παραγόντων στη διαμόρφωση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας ανά τομέα, αναδεικνύοντας τον κεντρικό ρόλο της αποδοτικότητας, αποτυπώνεται στο **Σχήμα 7**.



IEA. CC BY 4.0.

Σχήμα 7. Τελική Κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα και επίδραση των μέτρων αποδοτικότητας στο σενάριο NZE.

3.4 Καύσιμα Χαμηλών Εκπομπών στον Ενεργειακό Μετασχηματισμό

3.4.1 Συμβολή Βιοενέργειας και Βιοκαυσίμων

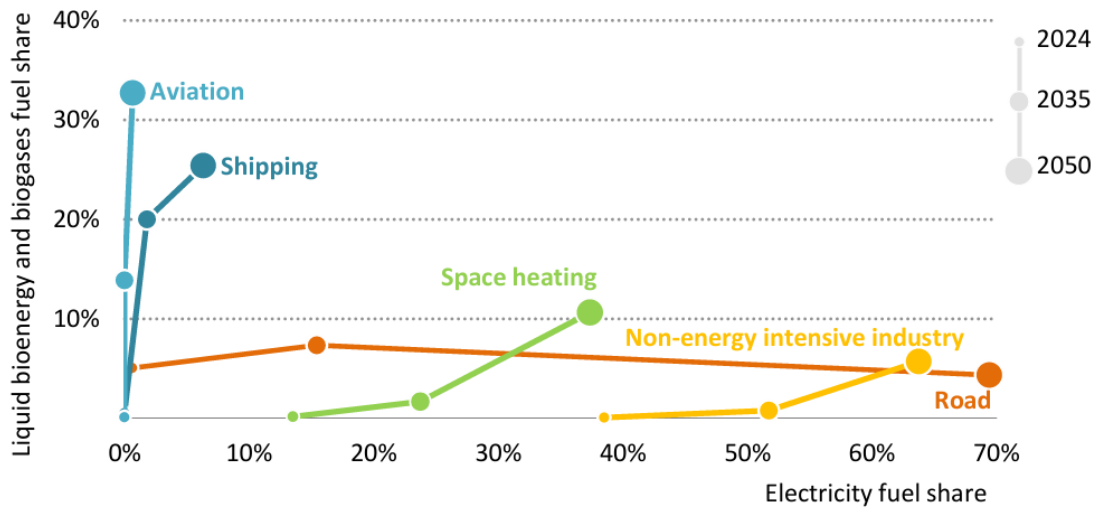
Αν και ο εξηλεκτρισμός κατέχει κεντρικό ρόλο στο σενάριο NZE, αναγνωρίζεται ότι δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών σε όλους τους τομείς της οικονομίας. Ως εκ τούτου, τα καύσιμα χαμηλών εκπομπών, όπως το υδρογόνο και η βιοενέργεια, λειτουργούν συμπληρωματικά, αποκτώντας αυξανόμενη σημασία έως το 2050, ιδιαίτερα σε κλάδους που παρουσιάζουν μεγάλες δυσκολίες στην απανθρακοποίηση.

Όσον αφορά τα βιοκαύσιμα, και ειδικότερα τα υγρά βιοκαύσιμα, αυτά διαδραματίζουν σήμερα κυρίαρχο ρόλο στις οδικές μεταφορές. Ωστόσο, καθώς η ηλεκτροκίνηση στις οδικές μεταφορές προχωρά, η χρήση τους προβλέπεται να μετατοπιστεί σταδιακά προς τομείς που είναι δυσκολότερο να εξηλεκτριστούν, όπως η αεροπορία και η ναυτιλία. Στον τομέα της αεροπορίας, τα βιοκαύσιμα αποτελούν την κύρια βάση των Βιώσιμων Αεροπορικών Καυσίμων (SAF) έως τη δεκαετία του 2030, ενώ σε μεταγενέστερο στάδιο αναμένεται να αποκτήσουν σημαντικό ρόλο τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται από υδρογόνο και CO₂.

Παράλληλα, η βιοενέργεια και κυρίως τα βιοαέρια συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών σε κτίρια και βιομηχανίες όπου ο εξηλεκτρισμός παραμένει μια δύσκολη πρόκληση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αξιοποιούνται οι υφιστάμενες υποδομές φυσικού αερίου, ενώ η χρήση βιοαερίων ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια, καθώς αυτά παράγονται και καταναλώνονται συνήθως σε τοπικό επίπεδο, προσφέροντας δυνατότητα αποθήκευσης με χαμηλότερο κόστος

σε σύγκριση με τον ηλεκτρισμό. Σύμφωνα με το σενάριο NZE, έως το 2050 τα βιοαέρια θα μπορούσαν να καλύπτουν περίπου το 10% της συνολικής ζήτησης φυσικού αερίου.

Η περαιτέρω ανάπτυξη των βιοκαυσίμων αντιμετωπίζει σημαντικούς περιορισμούς. Ένας βασικός περιορισμός αφορά τη διαθεσιμότητα γης, που έρχεται σε σύγκρουση με άλλους φυσικούς και περιβαλλοντικούς σκοπούς, όπως την προστασία των δασών. Στο NZE, η συνολική χρήση βιοενέργειας έως το 2050 φτάνει κοντά στο όριο της βιώσιμης δυναμικότητας, με έμφαση σε ξυλώδη βιομάζα από υποβαθμισμένες εκτάσεις. Ωστόσο, η μετατροπή της σε υγρά καύσιμα προϋποθέτει προηγμένες τεχνολογίες που αναπτύσσονται σταδιακά. Ένας δεύτερος σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας είναι το κόστος παραγωγής. Η πρώτη ύλη αντιστοιχεί σε πάνω από το 80% του συνολικού κόστους, ενώ οι τεχνολογίες μετατροπής παραμένουν δαπανηρές παρά τις καινοτομίες. Επομένως, ενώ τα βιοκαύσιμα συμβάλλουν στη μετάβαση, η συμβολή τους παραμένει περιορισμένη, καθιστώντας αναγκαία μια ισορροπημένη αξιοποίηση που να συνδυάζει τους κλιματικούς στόχους με τη βιωσιμότητα και την οικονομική αποδοτικότητα. Η εξέλιξη της χρήσης της βιοενέργειας και η μετατόπιση των βιοκαυσίμων προς τους τομείς της αεροπορίας και της ναυτιλίας αποτυπώνονται στο **Σχήμα 8**.



IEA. CC BY 4.0.

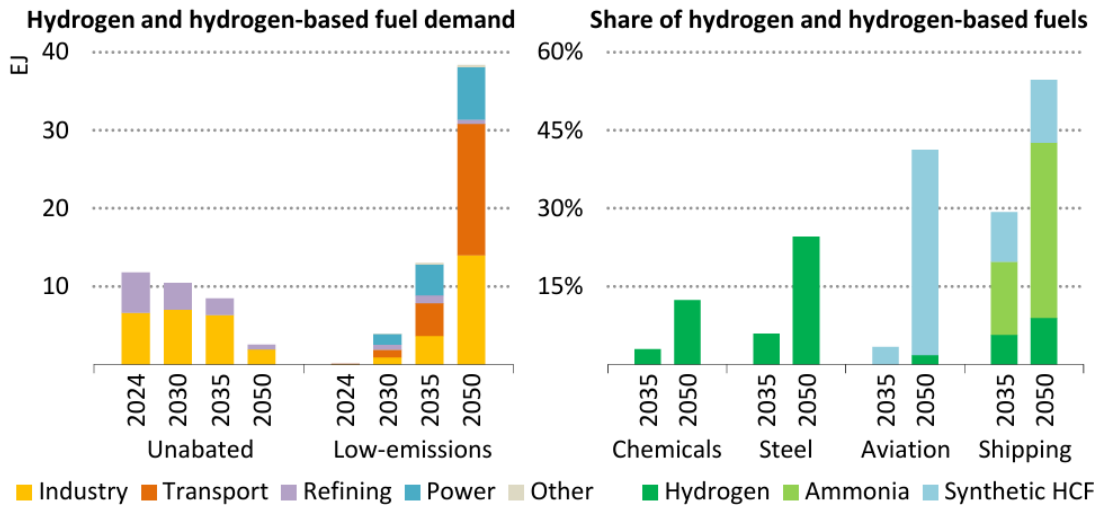
Σχήμα 8. Χρήση βιοενέργειας ανά τομέα και τύπο καυσίμου στο σενάριο NZE.

3.4.2 Υδρογόνο Χαμηλών Εκπομπών και Απανθρακοποίηση

Πέρα από τα βιοκαύσιμα, το υδρογόνο χαμηλών εκπομπών και τα καύσιμα που βασίζονται σε αυτό, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο σε τομείς όπου άλλες λύσεις είναι δυσκολότερες ή ακριβότερες. Στο σενάριο NZE, τα καύσιμα αυτά καλύπτουν περίπου το 2% της συνολικής κατανάλωσης το 2035 και αναμένεται να φτάσουν σχεδόν το 10% έως το 2050, με εκτεταμένη χρήση στην αεροπορία, τη ναυτιλία και τη βιομηχανία.

Πιο συγκεκριμένα, στη βιομηχανία προβλέπεται ότι πάνω από το 35% του χρησιμοποιούμενου υδρογόνου έως το 2035 θα προέρχεται από πηγές χαμηλών εκπομπών. Στη ναυτιλία και την

αεροπορία, τα καύσιμα αυτά αντικαθιστούν σταδιακά τα συμβατικά, καλύπτοντας περίπου το 30% των ενεργειακών αναγκών της ναυτιλίας και το 3% της αεροπορίας έως το 2035. Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, αν και η χρήση τους παραμένει περιορισμένη, περίπου 1,5% το 2035, προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για τη μείωση των εκπομπών και την ενίσχυση της ευελιξίας του συστήματος. Η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών απαιτεί εντατικές επενδύσεις και διεθνή συνεργασία για την επιτυχή ένταξή τους στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα. Η κλιμάκωση της παραγωγής υδρογόνου χαμηλών εκπομπών και η κατανομή της κατανάλωσής του στους κρίσιμους τομείς της βιομηχανίας και των μεταφορών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 9**.



IEA. CC BY 4.0.

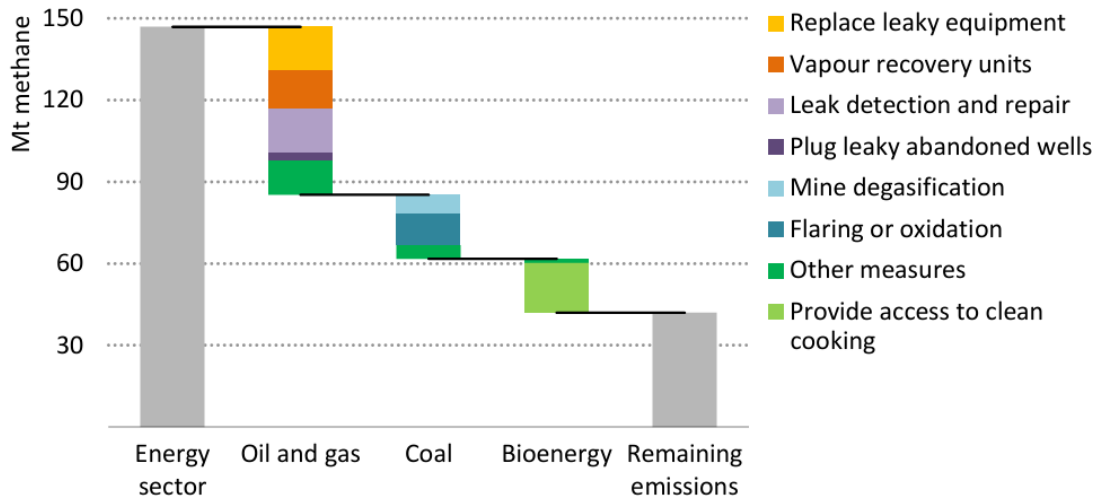
Σχήμα 9. Παραγωγή και κατανάλωση υδρογόνου χαμηλών εκπομπών ανά τομέα στο σενάριο NZE.

3.5 Μείωση και Διαχείριση Εκπομπών Μεθανίου

Η αντιμετώπιση των εκπομπών μεθανίου αποτελεί μία από τις πλέον επείγουσες προτεραιότητες, καθώς αυτές ευθύνονται για περίπου το 30% της παγκόσμιας υπερθέρμανσης από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης. Παρά το γεγονός ότι το μεθάνιο έχει σχετικά σύντομο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα, περίπου 12 χρόνια, η ικανότητά του να απορροφά θερμότητα είναι πολλαπλάσια εκείνης του CO₂, γεγονός που το καθιστά καθοριστικό παράγοντα για την κλιματική κρίση. Σήμερα, οι συγκεντρώσεις του υπερβαίνουν κατά 2,5 φορές τα προβιομηχανικά επίπεδα, με τον ενεργειακό τομέα να ευθύνεται για πάνω από το 35% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών. Στο πλαίσιο του σεναρίου NZE, προβλέπεται ότι οι εκπομπές μεθανίου από την ενέργεια πρέπει να μειωθούν κατά περισσότερο από 80% έως το 2035, μέσω της καθολικής εφαρμογής των διαθέσιμων μέτρων. Ένα ιδιαίτερα αισιόδοξο γεγονός είναι ότι σχεδόν το μισό της παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου καλύπτεται ήδη από εταιρικούς στόχους για σχεδόν μηδενικές εκπομπές. Υπάρχουν πλέον ώριμα και χαμηλού κόστους μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν

άμεσα, ενώ υπολογίζεται ότι περίπου το 30% των εκπομπών μεθανίου από το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τον άνθρακα θα μπορούσε να αποφευχθεί χωρίς καθαρό κόστος. Αυτό συμβαίνει διότι η αξία του αερίου που ανακτάται συχνά υπερβαίνει το κόστος των απαιτούμενων παρεμβάσεων. Παρ' όλα αυτά, η υιοθέτηση αυτών των μέτρων συχνά καθυστερεί, λόγω της έλλειψης πληροφόρησης, τα ανεπαρκή οικονομικά κίνητρα, τις ανταγωνιστικές επενδυτικές προτεραιότητες και τις δυσκολίες πρόσβασης σε κεφάλαια, ιδίως στις αναπτυσσόμενες οικονομίες.

Υπάρχουν ήδη τεχνολογίες χαμηλού κόστους για τη μείωση του μεθανίου όπως τα συστήματα ανίχνευσης και επισκευής διαρροών (LDAR), η αυστηρή απαγόρευση της τακτικής καύσης και η εγκατάσταση συστημάτων αξιοποίησης του αερίου. Παράλληλα, η ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών, όπως αισθητήρες και δορυφόροι για τη συνεχή και ακριβή παρακολούθηση των εκπομπών, τεχνητή νοημοσύνη για την προληπτική συντήρηση υποδομών και την έγκαιρη πρόβλεψη βλαβών και καταλυτική οξείδωση για τον περιορισμό των εκπομπών που είναι δύσκολο να δεσμευτούν με παραδοσιακά μέσα, προσφέρουν νέες προοπτικές για περαιτέρω μείωση των εκπομπών. Οι διαθέσιμες ευκαιρίες για τη μείωση των εκπομπών μεθανίου ανά τομέα του ενεργειακού κλάδου, καθώς και τα συγκεκριμένα τεχνολογικά μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα, φαίνονται στο **Σχήμα 10**.



IEA. CC BY 4.0.

Σχήμα 10. Δυνατότητες και τεχνολογικά μέτρα μείωσης των εκπομπών μεθανίου στον ενεργειακό τομέα.

Στον τομέα του άνθρακα, η αξιοποίηση ή η ελεγχόμενη καύση του μεθανίου στα ορυχεία μπορεί να μειώσει τις εκπομπές έως και στο μισό με σχετικά χαμηλό κόστος. Αντίστοιχα, στον τομέα της βιοενέργειας, η μετάβαση σε καθαρές τεχνολογίες μαγειρέματος και ο εκσυγχρονισμός των πρακτικών παραγωγής μπορούν να περιορίσουν σημαντικά το αποτύπωμα μεθανίου. Σε διεθνές επίπεδο, η κινητοποίηση ενισχύεται από πρωτοβουλίες όπως η Παγκόσμια Δέσμευση για το Μεθάνιο (Global Methane Pledge) και η θέσπιση κανονισμών

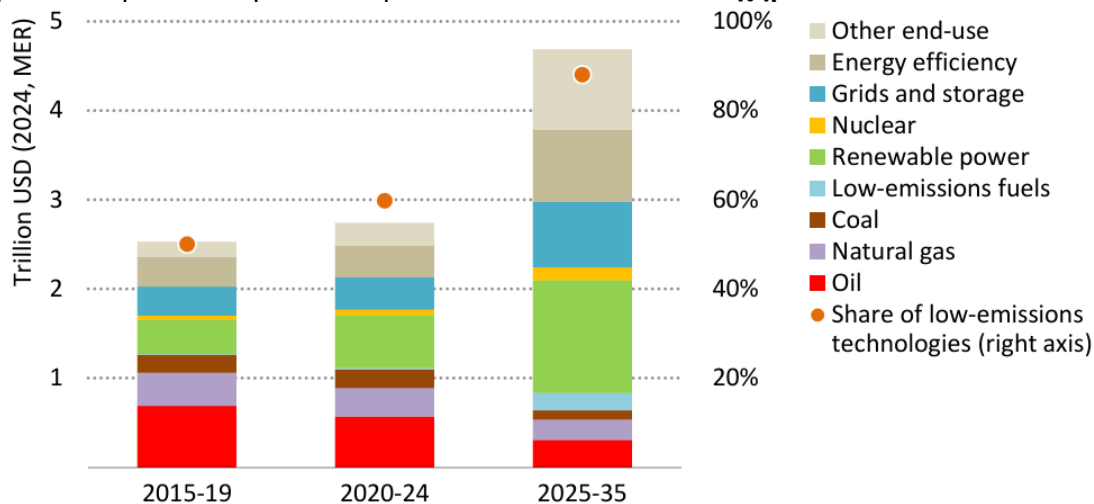
για τις εισαγωγές ενέργειας, παράγοντες που αναμένεται να επιταχύνουν τις μειώσεις σε παγκόσμια κλίμακα.

4. Οικονομικές Απαιτήσεις και Επενδυτικό Πλαίσιο

4.1 Χρηματοδότηση της Ενεργειακής Μετάβασης

Η υλοποίηση του σεναρίου NZE προϋποθέτει μια ριζική αναδιάρθρωση όσον αφορά τα κεφάλαια στον ενεργειακό τομέα. Η μετάβαση βασίζεται σε τεχνολογίες οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης αλλά προσφέρουν το πλεονέκτημα των πολύ χαμηλών λειτουργικών εξόδων σε βάθος χρόνου. Αυτό το χαρακτηριστικό οδηγεί σε μια σημαντική αύξηση των συνολικών επενδύσεων.

Συγκεκριμένα, οι ετήσιες επενδύσεις στον ενεργειακό τομέα προβλέπεται να ανέλθουν κατά μέσο όρο στα 4,8 τρισεκατομμύρια USD την επόμενη δεκαετία, ενώ αναμένεται να αυξηθούν περαιτέρω στα 5,6 τρισεκατομμύρια USD έως το 2035. Τα επίπεδα αυτά είναι σημαντικά υψηλότερα σε σύγκριση τόσο με τις σημερινές δαπάνες όσο και με τις προβλέψεις του σεναρίου STEPS, υπογραμμίζοντας το μέγεθος της οικονομικής κινητοποίησης που απαιτείται. Η κατανομή των ετήσιων επενδύσεων ανά ενεργειακό κλάδο και η σύγκριση των αναγκών του σεναρίου NZE με τα ιστορικά δεδομένα αποτυπώνονται στο **Σχήμα 11**.



IEA. CC BY 4.0.

Σχήμα 11. Ετήσιες επενδύσεις στον ενεργειακό τομέα ανά κλάδο στο σενάριο NZE έως το 2035.

Κεντρικό ρόλο σε αυτή την επενδυτική ανέλιξη διαδραματίζει η καθαρή ηλεκτροδότηση. Οι επενδύσεις στον τομέα του ηλεκτρισμού προβλέπεται σχεδόν να διπλασιαστούν έως το 2035, με τη συντριπτική πλειονότητα των κεφαλαίων να κατευθύνεται προς τις ΑΠΕ, την ενίσχυση των ηλεκτρικών δικτύων, τα συστήματα αποθήκευσης και την πυρηνική ενέργεια. Αυτή η κατανομή πόρων τονίζει τη σημασία που αποδίδεται στην ασφάλεια και την ευελιξία των σύγχρονων ηλεκτρικών συστημάτων. Ταυτόχρονα, παρατηρείται ραγδαία αύξηση των επενδύσεων που στοχεύουν στον εξηλεκτρισμό της τελικής κατανάλωσης. Οι πόροι αυτοί

διοχετεύονται κυρίως στην αγορά ηλεκτρικών οχημάτων και στην εγκατάσταση αντλιών θερμότητας, καθώς και στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, με ιδιαίτερη έμφαση στον κτιριακό τομέα.

4.2 Ορυκτά Καύσιμα και Τεχνολογίες Αντιστάθμισης

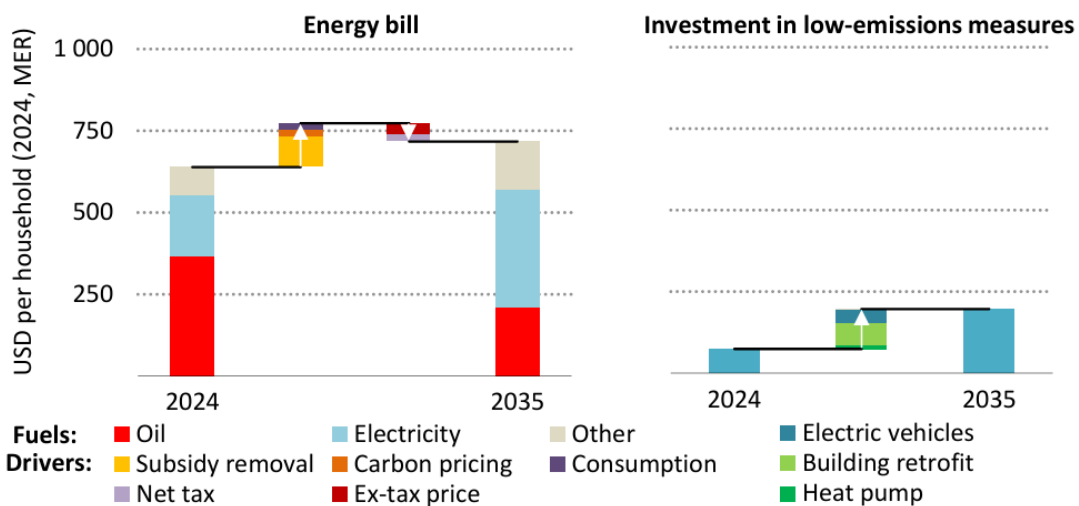
Η ενίσχυση των επενδύσεων σε καθαρές τεχνολογίες συνοδεύεται από μια δραστική υποχώρηση των κεφαλαίων που κατευθύνονται στα ορυκτά καύσιμα. Έως το 2035, οι επενδύσεις αυτές αναμένεται να περιοριστούν σε λιγότερο από το ένα τρίτο των σημερινών επιπέδων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι επενδύσεις στα ορυκτά καύσιμα δεν μηδενίζονται πλήρως. Ένα μέρος τους παραμένει απαραίτητο για τη διατήρηση της παραγωγής στα υφιστάμενα κοιτάσματα και για τη στήριξη της υπολειπόμενης χρήσης τους σε τομείς όπου η πλήρης αντικατάσταση είναι χρονοβόρα. Στις περιπτώσεις αυτές, οι εκπομπές προβλέπεται να αντισταθμίζονται ή να περιορίζονται μέσω της χρήσης τεχνολογιών CCUS και προηγμένων μεθόδων απομάκρυνσης CO₂, διασφαλίζοντας τη συμβατότητα με τους στόχους του σεναρίου NZE.

5. Κοινωνικές και Υγειονομικές Επιπτώσεις της Ενεργειακής Μετάβασης

5.1 Προσιτότητα της Ενέργειας για τα Νοικοκυριά

Στο σενάριο NZE, η προσιτότητα της ενέργειας για τα νοικοκυριά αποτελεί κεντρικό παράγοντα της μετάβασης και επηρεάζεται από τρεις βασικές μεταβολές. Η πρώτη αφορά την αύξηση των απαιτούμενων αρχικών επενδύσεων σε καθαρές τεχνολογίες, όπως η αγορά ηλεκτρικών οχημάτων, η εγκατάσταση αντλιών θερμότητας και οι ενεργειακές ανακαινίσεις κτιρίων. Η δεύτερη μεταβολή αφορά τη ριζική μετατόπιση των δαπανών από τα ορυκτά καύσιμα προς την ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος, η τρίτη παράμετρος αφορά τις ρυθμιστικές παρεμβάσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν την τιμολόγηση των εκπομπών CO₂, τη σταδιακή κατάργηση των επιδοτήσεων στα ορυκτά καύσιμα και την παροχή ισχυρών κινήτρων για την υιοθέτηση καθαρών τεχνολογιών.

Παρότι βραχυπρόθεσμα τα νοικοκυριά, ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες οικονομίες, καλούνται να αντιμετωπίσουν υψηλότερες αρχικές δαπάνες, η μεσοπρόθεσμη προοπτική είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή, καθώς επωφελούνται από μια σημαντική μείωση των λειτουργικών τους εξόδων. Η ευρεία εξάπλωση των ηλεκτρικών οχημάτων και ο εξηλεκτρισμός των συστημάτων θέρμανσης συμβάλλουν στη δραστική μείωση των δαπανών για καύσιμα κίνησης και θέρμανσης. Παράλληλα, οι λογαριασμοί ηλεκτρικού ρεύματος προβλέπεται να παρουσιάσουν οριακή μόνο αύξηση. Ως αποτέλεσμα, το συνολικό ενεργειακό κόστος για τα νοικοκυριά αναμένεται να μειωθεί κατά μέσο όρο περίπου κατά 15%. Η μεταβολή στη δομή των δαπανών των νοικοκυριών και η τελική μείωση του μέσου ετήσιου ενεργειακού κόστους στο σενάριο NZE, παρά την αύξηση της συμμετοχής του ηλεκτρισμού, αποτυπώνονται στο **Σχήμα 12**.



IEA. CC BY 4.0.

Σχήμα 12. Μέση ετήσια ενεργειακή δαπάνη νοικοκυριών στο σενάριο NZE.

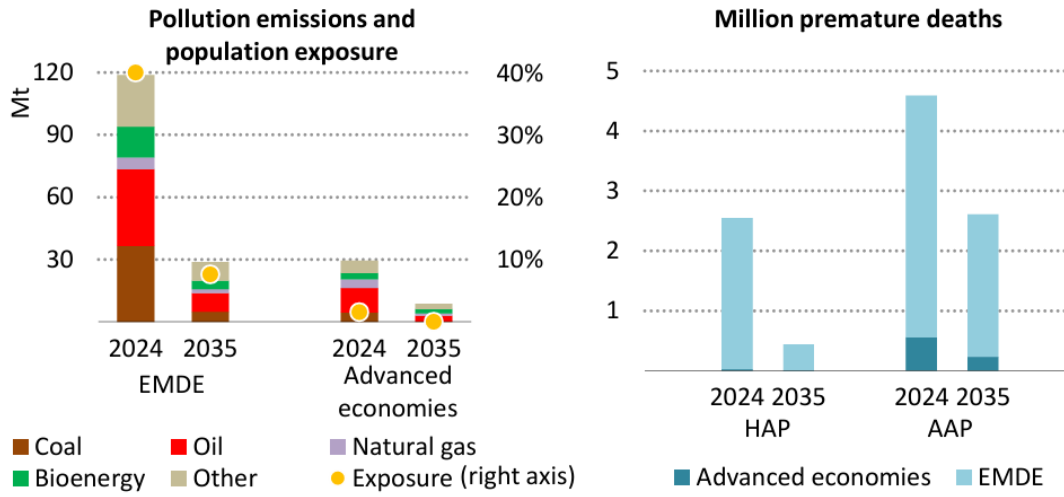
Τα οφέλη αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τα χαμηλότερα εισοδηματικά στρώματα, τα οποία δαπανούν δυσανάλογα μεγάλο μέρος του εισοδήματός τους για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών. Ωστόσο, η πρόσβαση σε αυτά τα οφέλη προϋποθέτει τη δυνατότητα κάλυψης του αρχικού κόστους επένδυσης, γεγονός που καθιστά κρίσιμη τη στοχευμένη κρατική στήριξη. Ταυτόχρονα, η κατάργηση επιδοτήσεων στα ορυκτά καύσιμα και η εφαρμογή τιμολόγησης του CO₂ δημιουργούν δημοσιονομικές και κοινωνικές προκλήσεις, αλλά και νέες πηγές εσόδων. Οι πόροι αυτοί μπορούν να αξιοποιηθούν για την προστασία των ευάλωτων νοικοκυριών και τη διευκόλυνση της ενεργειακής μετάβασης.

5.2 Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Δημόσια Υγεία

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί μία από τις σοβαρότερες απειλές για την παγκόσμια υγεία. Προκαλεί περίπου 4,5 εκατομμύρια πρόωρους θανάτους ετησίως, ενώ επιπλέον 2,5 εκατομμύρια θάνατοι συνδέονται με την οικιακή ρύπανση, κυρίως από τη χρήση στερεών καυσίμων για μαγείρεμα. Πάνω από το 90% αυτών των θανάτων καταγράφεται σε αναδυόμενες και αναπτυσσόμενες οικονομίες, όπου μεγάλο μέρος του πληθυσμού εκτίθεται καθημερινά σε ιδιαίτερα επιβαρυμένο αέρα, με σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και την οικονομική παραγωγικότητα.

Στο σενάριο NZE, οι εκπομπές των βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων μειώνονται ταχύτατα σε όλες τις περιοχές. Έως το 2035, οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{2.5}), διοξειδίου του θείου (SO₂) και οξειδίων του αζώτου (NO_x) μειώνονται κατά περίπου 70% στις ανεπτυγμένες οικονομίες και σχεδόν 80% στις αναδυόμενες και αναπτυσσόμενες. Αυτή η εξέλιξη οδηγεί σε μια δραστική μείωση της έκθεσης του πληθυσμού σε ρυπασμένο αέρα, βελτιώνοντας σημαντικά τις συνθήκες διαβίωσης. Η δραστική μείωση των εκπομπών βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων και η αντίστοιχη υποχώρηση των πρόωρων θανάτων που οφείλονται στην κακή ποιότητα του αέρα αποτυπώνονται στο **Σχήμα 13**.

Ως αποτέλεσμα αυτών των παρεμβάσεων, υπολογίζεται ότι θα αποφεύγονται περίπου 2 εκατομμύρια πρόωροι θάνατοι ετησίως από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Παράλληλα, η επίτευξη καθολικής πρόσβασης σε καθαρές λύσεις μαγειρέματος αναμένεται να μειώσει τους θανάτους από οικιακή ρύπανση κατά 85%. Καθίσταται έτσι προφανές ότι η ενεργειακή μετάβαση, πέρα από τον περιβαλλοντικό της ρόλο, λειτουργεί ως ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την διασφάλιση της παγκόσμιας υγείας.



IEA. CC BY 4.0.

Σχήμα 13. Μείωση εκπομπών βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων και αποφευχθέντες πρόωροι θάνατοι στο σενάριο NZE.

6. Ενεργειακή Ασφάλεια στο NZE

6.1 Ασφάλεια των Καυσίμων

Στο πλαίσιο του σεναρίου NZE, η ενεργειακή ασφάλεια επαναπροσδιορίζεται μέσα από τη δυναμική σχέση μεταξύ των καθαρών τεχνολογιών και των παραδοσιακών πηγών ενέργειας. Η αύξηση των επενδύσεων σε καθαρές μορφές ενέργειας και στην ενεργειακή αποδοτικότητα συνοδεύεται από μια σταδιακή μείωση των επενδύσεων στα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, οι επενδύσεις αυτές δεν μηδενίζονται πλήρως, καθώς κρίνονται απαραίτητες για την αντιστάθμιση της φυσικής μείωσης της παραγωγής στα υφιστάμενα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Παράλληλα, η διατήρηση των κρίσιμων υποδομών παραμένει προτεραιότητα για τη διασφάλιση της ευστάθειας του ενεργειακού συστήματος κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου.

Καθώς η παγκόσμια ζήτηση για ορυκτά καύσιμα υποχωρεί, παρατηρείται μια σημαντική αναδιάρθρωση στην προσφορά. Η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου τείνει να συγκεντρώνεται σε παραγωγούς χαμηλού κόστους, με αποτέλεσμα το μερίδιο του OPEC+ στην αγορά να αυξάνεται και να αναμένεται να φτάσει περίπου το 55% έως το 2035.

Αυτή η μετατόπιση έχει άμεσες οικονομικές επιπτώσεις. Οι διεθνείς τιμές των καυσίμων υποχωρούν, μειώνοντας αισθητά το κόστος των εισαγωγών για τις χώρες-εισαγωγείς. Από την άλλη πλευρά, οι χαμηλότερες τιμές δημιουργούν σοβαρές δημοσιονομικές και μακροοικονομικές προκλήσεις για τις χώρες-παραγωγούς. Η μείωση των εσόδων από τις εξαγωγές καθιστά την έγκαιρη οικονομική διαφοροποίηση αυτών των κρατών επιτακτική ανάγκη για τη διασφάλιση της κοινωνικής και οικονομικής τους σταθερότητας.

6.2 Ασφάλεια Ηλεκτροδότησης

Η υλοποίηση του σεναρίου NZE συνεπάγεται πρωτοφανείς προκλήσεις για την ασφάλεια της ηλεκτροδότησης, δεδομένου ότι έως το 2050 η ηλεκτρική ενέργεια αναμένεται να καλύπτει πάνω από το μισό της παγκόσμιας τελικής κατανάλωσης. Το ηλεκτρικό σύστημα γίνεται εξαιρετικά πιο σύνθετο, εξαιτίας της μαζικής διείσδυσης των μεταβλητών ΑΠΕ και της αυξανόμενης ζήτησης από τελικές χρήσεις, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα και οι αντλίες θερμότητας. Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά αναγκαίο έναν ολοκληρωμένο συνδυασμό μέτρων για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ευστάθειας του δικτύου.

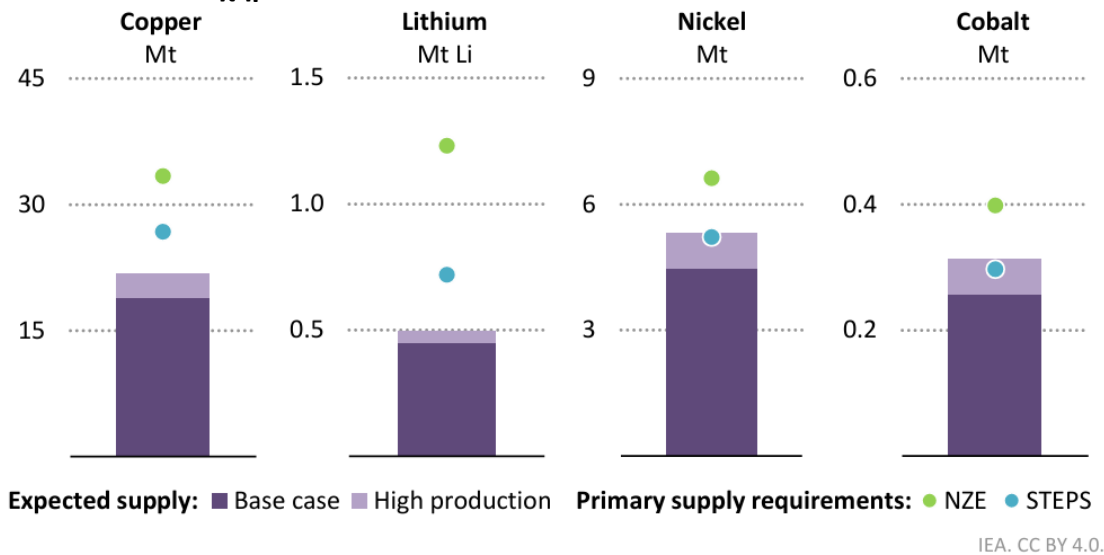
Κρίσιμο ρόλο διαδραματίζει η διατηρήσιμη ισχύς (dispatchable capacity), η οποία προβλέπεται να παραμείνει συνολικά στα σημερινά επίπεδα έως το 2035. Η ισχύς αυτή εξασφαλίζεται μέσω ενός μείγματος από υδροηλεκτρικά έργα, γεωθερμία, βιοενέργεια και πυρηνική ενέργεια, πηγές που προσφέρουν σταθερότητα στο σύστημα. Παράλληλα, οι μπαταρίες επεκτείνονται με γρήγορο ρυθμό, φτάνοντας περίπου τα 2.900 GW έως το 2035, καλύπτοντας κυρίως τις βραχυπρόθεσμες ανάγκες ευελιξίας. Ωστόσο, η πλήρης αξιοπιστία απαιτεί και λύσεις αποθήκευσης μακράς διάρκειας, όπως η αντλησιοταμίευση, για τη διαχείριση εποχιακών διακυμάνσεων.

Η ευελιξία του συστήματος ενισχύεται επιπλέον μέσω της απόκρισης ζήτησης, μια πηγή που παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτη σήμερα. Η ενεργοποίησή της απαιτεί τη θέσπιση κατάλληλων κινήτρων, τη δημιουργία δυναμικών αγορών και την ανάπτυξη προηγμένων ψηφιακών υποδομών. Τέλος, η υπερεγκατάσταση ΑΠΕ, η ορθολογική διαχείριση των περικοπών παραγωγής και οι εκτεταμένες επενδύσεις σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής αποτελούν απαραίτητες προϋποθέσεις για τη διατήρηση της ασφάλειας εφοδιασμού σε ένα ενεργειακό σύστημα με υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών.

6.3 Ασφάλεια των Κρίσιμων Ορυκτών

Στο σενάριο NZE, η ζήτηση για κρίσιμα ορυκτά παρουσιάζει μια εκθετική αύξηση, η οποία είναι πολύ ταχύτερη σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο σενάριο, εξαιτίας της έντονης ηλεκτροδότησης και της ευρείας εξάπλωσης των καθαρών ενεργειακών τεχνολογιών. Η μετάβαση απαιτεί τεράστιες ποσότητες πρώτων υλών για την κατασκευή μπαταριών, δικτύων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Συγκεκριμένα, έως το 2035, η ζήτηση για χαλκό στο σενάριο NZE προβλέπεται να είναι περίπου 25% υψηλότερη σε σχέση με το σενάριο STEPS, ενώ η ζήτηση για λίθιο ανέρχεται στο 70% υψηλότερα. Αντίστοιχα, οι ανάγκες για νικέλιο, κοβάλτιο και γραφίτη αυξάνονται κατά 30% έως 50%. Παρά τις πρόσφατες εξαγγελίες για νέα εξορυκτικά έργα, στο σενάριο NZE εξακολουθούν να υφίστανται σημαντικά κενά μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, ιδίως για τον χαλκό να αποτελεί το πιο κρίσιμο σημείο υστέρησης. Η εκρηκτική άνοδος της ζήτησης για κρίσιμα ορυκτά στο σενάριο NZE σε σύγκριση με τις τρέχουσες προβλέψεις, καθώς και η πίεση που ασκείται στις εφοδιαστικές αλυσίδες για την κάλυψη των αναγκών σε χαλκό και λίθιο, αποτυπώνονται στο **Σχήμα 14**.



Σχήμα 14. Ζήτηση κρίσιμων ορυκτών για τεχνολογίες καθαρής ενέργειας στο σενάριο NZE.

Λόγω της ανεπαρκούς, αλλά και της γεωγραφικά συγκεντρωμένης προσφοράς κρίσιμων ορυκτών, υπάρχει πιθανότητα να αυξηθεί το κόστος των καθαρών τεχνολογιών και, κατ' επέκταση, να επιβραδυνθεί η πορεία προς το καθαρό μηδέν. Πιθανές διαταραχές στην παγκόσμια εφοδιαστική αλυσίδα ενδέχεται να έχουν αλυσιδωτές επιπτώσεις στις τιμές για τους καταναλωτές, στην ανάπτυξη της βιομηχανίας και στα ποσοστά απασχόλησης.

Για την αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων, κρίνεται αναγκαία η ανάληψη άμεσων και μεσοπρόθεσμων δράσεων. Αυτές επικεντρώνονται σε τρεις βασικούς άξονες. Πρώτον, στη διαφοροποίηση των αλυσίδων εφοδιασμού, προκειμένου να μειωθεί η εξάρτηση από συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές. Δεύτερον στην ενίσχυση της ανακύκλωσης για την ανάκτηση πολύτιμων υλικών και τη μείωση της ανάγκης για νέα εξόρυξη και τέλος στη διασφάλιση αξιόπιστης πρόσβασης, καθώς η δημιουργία σταθερών πλαισίων εφοδιασμού είναι καθοριστική για μια ομαλή και οικονομικά προσιτή ενεργειακή μετάβαση.

7. Εξελίξεις και Προκλήσεις της Επόμενης Δεκαετίας

Η περίοδος έως το 2035 αποτελεί την πιο κρίσιμη φάση για την επιτυχία του σεναρίου NZE. Κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας, οι παγκόσμιες εκπομπές από τον ενεργειακό τομέα πρέπει να μειωθούν κατά περίπου 50% σε σχέση με τα επίπεδα του 2024. Ταυτόχρονα, ο ηλεκτρισμός αναβαθμίζεται σε κυρίαρχη μορφή ενέργειας, καλύπτοντας το ένα τρίτο της τελικής κατανάλωσης παγκοσμίως.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ προβλέπεται να τετραπλασιαστεί, αγγίζοντας περίπου τα 19.600 GW. Η πυρηνική ενέργεια, μαζί με άλλες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών, θα λειτουργήσουν ενισχυτικά στη δραστική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος του τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Παράλληλα, ο ρυθμός βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας πρέπει να φτάσει στο 4% ετησίως, ενώ οι εκπομπές μεθανίου από τον ενεργειακό τομέα χρειάζεται να μειωθούν κατά 80%, περιορίζοντας αποτελεσματικά την κορύφωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Την ίδια περίοδο, επιταχύνεται η ανάπτυξη τεχνολογιών που θεωρούνται κρίσιμες για τη μακροπρόθεσμη απανθρακοποίηση. Μία από αυτές είναι η δέσμευση και αφαίρεση CO₂, όπου η ικανότητα δέσμευσης και απομάκρυνσης CO₂ προβλέπεται να φτάσει τα 2.260 Mt έως το 2035. Οι αφαιρέσεις CO₂ καθίστανται πλέον απαραίτητες, όχι μόνο για την επίτευξη του μηδενικών εκπομπών το 2050, αλλά και για την επαναφορά της υπερθέρμανσης κάτω από το όριο των 1,5°C αργότερα εντός του αιώνα. Ταυτόχρονα κλιμακώνεται συστηματικά η χρήση υδρογόνου και καυσίμων που βασίζονται σε αυτό. Η παραγωγή υδρογόνου χαμηλών εκπομπών αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία, προσφέροντας λύσεις σε τομείς όπου η άμεση ηλεκτροδότηση δεν είναι εφικτή. Η δεκαετία έως το 2035 δεν είναι απλώς ένα ενδιάμεσο στάδιο, αλλά η περίοδος που θα καθορίσει αν η παγκόσμια κοινότητα μπορεί να θέσει τις βάσεις για ένα βιώσιμο και ασφαλές ενεργειακό μέλλον.

8. Συμπεράσματα και Ευκαιρίες

Η ανάλυση του σεναρίου NZE για το 2025 αναδεικνύει μια αδιαμφισβήτητη πραγματικότητα. Ο στόχος των 1,5°C παραμένει ζωντανός, αλλά οι κίνδυνοι δεν έχουν ξεπεραστεί πλήρως. Η επόμενη δεκαετία, έως το 2035, χαρακτηρίζεται ως η πλέον καθοριστική για τον ενεργειακό τομέα. Η αναγκαιότητα για μείωση των εκπομπών κατά 50% και η ταυτόχρονη διαχείριση της προσωρινής θερμοκρασιακής υπέρβασης απαιτούν μια παγκόσμια κινητοποίηση που υπερβαίνει τα τρέχοντα πολιτικά και οικονομικά δεδομένα. Η επιτυχία δεν εξαρτάται πλέον μόνο από την τεχνολογική ωριμότητα, η οποία σε μεγάλο βαθμό έχει επιτευχθεί, αλλά από την ταχύτητα της κλιμάκωσης και τη σταθερότητα των διεθνών συνεργασιών σε ένα ασταθές γεωπολιτικό περιβάλλον.

Παρά τις προκλήσεις που υφίστανται, η πορεία προς ένα καθαρό ενεργειακό μέλλον δεν πρέπει να εκλαμβάνεται μόνο ως κόστος, αλλά και ως μια ευκαιρία οικονομικής ανάπτυξης. Η αναδιάρθρωση του ενεργειακού χάρτη δημιουργεί νέες αγορές και ευκαιρίες επενδύσεων και κερδοφορίας. Οι οικονομίες που θα πρωτοπορήσουν στην κατασκευή νέων καθαρών τεχνολογιών, όπως τα φωτοβολταϊκά νέας γενιάς, προηγμένες μπαταρίες και συστήματα υδρογόνου, θα διασφαλίσουν της θέση και την υπεροχή τους στην παγκόσμια βιομηχανία. Ακόμη, η ανάγκη για κρίσιμα ορυκτά ανοίγει νέους δρόμους για επενδύσεις στην εξόρυξη, την επεξεργασία και κυρίως στην κυκλική οικονομία μέσω της ανακύκλωσης υλικών.

Το σενάριο NZE αποδεικνύει ότι η πράσινη μετάβαση είναι ο μοναδικός δρόμος για τη διασφάλιση της μακροχρόνιας προσιτότητας της ενέργειας. Η απεξάρτηση από τις ευμετάβλητες τιμές των ορυκτών καυσίμων και η στροφή προς τον καθολικό εξηλεκτρισμό βοηθούν τα νοικοκυριά απέναντι σε ενεργειακές κρίσεις. Ταυτόχρονα, τα οφέλη για τη δημόσια υγεία από τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελούν έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την ευεξία των ανθρώπων.

Συμπερασματικά, για την επίτευξη του στόχου των μηδενικών εκπομπών έως το 2050 απαιτείται μετατροπή των διεθνών δεσμεύσεων σε συγκεκριμένες πολιτικές προς εφαρμογή. Το σενάριο NZE λειτουργεί ως ένας αναλυτικός χάρτης που αποδεικνύει ότι τα απαραίτητα κεφάλαια και οι τεχνολογικές λύσεις είναι διαθέσιμα. Η ουσιαστική πρόοδος εξαρτάται πλέον από τη διαμόρφωση του κατάλληλου ρυθμιστικού πλαισίου και την παροχή κινήτρων που θα διασφαλίσουν ότι η μετάβαση θα πραγματοποιηθεί με όρους οικονομικής προσιτότητας, ενεργειακής ασφάλειας και κοινωνικής ισότητας. Το μέλλον της παγκόσμιας ενέργειας βασίζεται στον καθαρό ηλεκτρισμό, την αποδοτική χρήση των πόρων και τη διεθνή συνεργασία.

9. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ από τον ενεργειακό τομέα ανά σενάριο.	3
Σχήμα 2. Εξέλιξη της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας και υπέρβαση του ορίου 1,5°C στο σενάριο NZE.	4
Σχήμα 3. Πορεία μείωσης εκπομπών CO ₂ ανά τομέα δραστηριότητας στο σενάριο NZE.	6
Σχήμα 4. Συμβολή τεχνολογικών μέτρων στη μείωση εκπομπών CO ₂ στο σενάριο NZE.	8
Σχήμα 5. Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή στο σενάριο NZE.	10
Σχήμα 6. Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χρήση και συμμετοχή στην τελική κατανάλωση ανά τομέα στο σενάριο NZE.	11
Σχήμα 7. Τελική Κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα και επίδραση των μέτρων αποδοτικότητας στο σενάριο NZE.	12
Σχήμα 8. Χρήση βιοενέργειας ανά τομέα και τύπο καυσίμου στο σενάριο NZE.	13
Σχήμα 9. Παραγωγή και κατανάλωση υδρογόνου χαμηλών εκπομπών ανά τομέα στο σενάριο NZE.	14
Σχήμα 10. Δυνατότητες και τεχνολογικά μέτρα μείωσης των εκπομπών μεθανίου στον ενεργειακό τομέα.	15
Σχήμα 11. Ετήσιες επενδύσεις στον ενεργειακό τομέα ανά κλάδο στο σενάριο NZE έως το 2035.	17
Σχήμα 12. Μέση ετήσια ενεργειακή δαπάνη νοικοκυριών στο σενάριο NZE.	19
Σχήμα 13. Μείωση εκπομπών βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων και αποφευχθέντες πρόωροι θάνατοι στο σενάριο NZE.	21
Σχήμα 14. Ζήτηση κρίσιμων ορυκτών για τεχνολογίες καθαρής ενέργειας στο σενάριο NZE. ...	23