

Ανάπτυξη αποδοτικών ΦΒ υλικών και διατάξεων τρίτης γενιάς για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας του παραγωγικού τομέα στην πράσινη ενέργεια: 3GPV-4INDUSTRY

Εμβληματική Δράση στη Διαθεματική Περιοχή: 7.1. Advanced Materials for Energy/
Υλικά για φωτοβολταϊκές κυψέλες

ΠΣΚΕ «ΤΑΕΔΡ 0537347»



ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 5.3

Οδικός Χάρτης για την Τεχνολογία & την Καινοτομία & Εκμετάλλευση
Ερευνητικών Αποτελεσμάτων

Περιεχόμενα

1. Εκτελεστική Περίληψη.....	2
2. Στόχοι & Μεθοδολογική Προσέγγιση του Παραδοτέου)	Error! Bookmark not defined.
3. Τεχνολογικό & Αγοραστικό Πλαίσιο	4
4. Στρατηγικό Όραμα και Μακροπρόθεσμοι Στόχοι	5
5. Οδικός Χάρτης Τεχνολογικής Ωρίμανσης	6
6. Στρατηγική Καινοτομίας & Θέσης στην Αγορά.....	10
7. Εκμετάλλευση Ερευνητικών Αποτελεσμάτων	11
8. Σύνδεση με τον Παραγωγικό Ιστό & Πολιτικές Πράσινης Μετάβασης.....	13
9. Κίνδυνοι & Μέτρα Μετριασμού	14
10. Κανονιστική Συμμόρφωση και Βιωσιμότητα.....	15
11. Δείκτες Απόδοσης (KPIs).....	15
12. Συμπεράσματα – Συστάσεις για το Έργο.....	16

1 Εκτελεστική Περίληψη

Το παρόν παραδοτέο Π5.3 διαμορφώνει έναν ολοκληρωμένο οδικό χάρτη για:

1. Την τεχνολογική ωρίμανση των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) υλικών και διατάξεων τρίτης γενιάς, περιλαμβανομένων των περοβσκιτών (Perovskite Solar Cells - PSC), των οργανικών φωτοβολταϊκών (Organic Photovoltaics - OPV) και των διχαλκογενιδίων μετάλλων μετάπτωσης (Transition Metal Dichalcogenides - TMDs), καθώς και προηγμένων διεπιφανειών.
2. Τη στρατηγική καινοτομίας και θέσης της τεχνολογίας στην αγορά, με έμφαση στις εφαρμογές υψηλής προστιθέμενης αξίας (tandem διατάξεις, φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια - BIPV, βιομηχανικές στέγες κ.ά.).
3. Την οργανωμένη εκμετάλλευση των ερευνητικών αποτελεσμάτων, βάσει ευρωπαϊκών βέλτιστων πρακτικών (Technology Readiness Levels - TRLs, Horizon Europe, exploitation plans).

Ο οδικός χάρτης τοποθετεί τα αποτελέσματα του έργου στο πλαίσιο της διεθνούς δυναμικής για τεχνολογίες perovskite και tandem ΦΒ, όπου η απόδοση έχει ήδη υπερβεί το 33% σε εργαστηριακή κλίμακα και οι πρώτες πιλοτικές γραμμές παραγωγής έχουν ανακοινωθεί διεθνώς. Παράλληλα ενσωματώνει την κλίμακα **Technology Readiness Levels (TRL 1-9)**, όπως χρησιμοποιείται στην ΕΕ και στο Horizon Europe, για τη φάση-ανά-φάση ωρίμανση από βασική έρευνα σε εμπορική αξιοποίηση.

Ο χρονικός ορίζοντας του οδικού χάρτη εκτείνεται σε τρεις φάσεις:

- **Βραχυπρόθεσμη (0-2 έτη):** Εδραίωση επιστημονικής υπεροχής, σταθεροποίηση υλικών και διαδικασιών, μετάβαση σε TRL 4--5 (validated in lab / relevant environment).
- **Μεσοπρόθεσμη (3-5 έτη):** Πιλοτικές γραμμές, πρωτότυπα modules, δοκιμές πεδίου, άνοδος σε TRL 6-7 (demonstration in relevant/operational environment).
- **Μακροπρόθεσμη (5-10 έτη):** Εμπορικά προϊόντα, βιομηχανικές συνεργασίες, πλήρης ωρίμανση σε TRL 8-9 (qualified system / proven in operational environment).

Παράλληλα διαμορφώνεται ένα **σχέδιο εκμετάλλευσης (exploitation plan)** που περιλαμβάνει: χαρτογράφηση των αποτελεσμάτων (foreground), στρατηγική πνευματικής ιδιοκτησίας (IPR), μοντέλα αδειοδότησης και spin-off, διαδοχικά στάδια χρηματοδότησης (Horizon Europe, EIC, εθνικά προγράμματα, ιδιωτικά κεφάλαια) και δράσεις σύνδεσης με την ελληνική βιομηχανία ΑΠΕ.

Το μακροπρόθεσμο όραμα είναι η διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου οικοσυστήματος καινοτομίας για φωτοβολταϊκές τεχνολογίες νέας γενιάς (PSC & OPV), το οποίο θα καλύπτει ολόκληρη την αλυσίδα αξίας: από τη βασική έρευνα υλικών και τη σχεδίαση διατάξεων, έως την πιλοτική παραγωγή, την πιστοποίηση, την αρχιτεκτονική ενσωμάτωση και την εμπορική αξιοποίηση.

2 Στόχοι & Μεθοδολογική Προσέγγιση του Παραδοτέου

2.1 Στόχοι του παραδοτέου Π3.3

Το Π3.3 στοχεύει:

- Στην πάνω σε σαφή καμπύλη TRL.
- Στη **σύνθεση ενός συνεκτικού οδικού χάρτη τεχνολογίας και καινοτομίας** μέχρι την εμπορική φάση για **τοποθέτηση των τεχνολογικών αποτελεσμάτων** του έργου (υλικά, διεπιφάνειες, διατάξεις, μοντέλα επιλεγμένα προϊόντα/υποσυστήματα ΦΒ).
- Στη **διαμόρφωση δομημένου σχεδίου εκμετάλλευσης** (research exploitation), συμβατού με ευρωπαϊκές πρακτικές (Horizon Europe, EIC) και με τις απαιτήσεις της δράσης για σύνδεση με τον παραγωγικό ιστό.

2.2 Μεθοδολογία

Η προσέγγιση στηρίχθηκε σε:

- **Ανάλυση διεθνών οδικών χαρτών ΦΒ** (tandem, advanced renewables) και RDI roadmaps του ενεργειακού συστήματος.
- **Εφαρμογή TRL framework** σύμφωνα με ορισμούς της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και σχετικής βιβλιογραφίας.
- Χαρτογράφηση των **τεχνικών πακέτων εργασίας** του έργου σε άξονες τεχνολογίας/αγοράς.
- Συνθετική προσέγγιση **"from lab to market"** με ενσωμάτωση τεχνικών, κανονιστικών, οικονομικών και βιομηχανικών παραμέτρων.

3 Τεχνολογικό & Αγοραστικό Πλαίσιο

3.1 Διεθνείς τάσεις σε ΦΒ τρίτης γενιάς

Οι υβριδικοί περοβσκίτες και τα tandem ΦΒ αναγνωρίζονται διεθνώς ως ο βασικός διάδοχος της μονοκρυσταλλικής σιλικόνης, με εργαστηριακές αποδόσεις >33% για perovskite/Si tandems και >28% για all-perovskite tandems. Παράλληλα, οι μεταλλικοί διχαλκογενίδες (π.χ. MoS₂, WS₂, WSe₂) εξελίσσονται ως υπερ-λεπτά απορροφητικά στρώματα ή διεπιφανειακά στρώματα με ιδιαίτερα υψηλή ειδική ισχύ και ευελιξία. Τα οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV) αναπτύσσονται ταχέως με την ενσωμάτωση non-fullerene acceptors, επιτυγχάνοντας βελτιωμένη απορρόφηση φάσματος και αυξημένη απόδοση μετατροπής ενέργειας.

Κρίσιμες παγκόσμιες τάσεις:

- **Εμπορική είσοδος perovskite/Si tandems:** Διεθνείς αναλύσεις προβλέπουν είσοδο στην αγορά εντός των επόμενων ετών, με σημαντικές προκλήσεις σε σταθερότητα, κλιμάκωση και αξιοπιστία πεδίου.
- **Έμφαση στη σταθερότητα και LCOE:** Η εμπορική βιωσιμότητα εξαρτάται από τη μείωση του **levelized cost of electricity (LCOE)** μέσω μεγάλης διάρκειας ζωής, χαμηλού κόστους παραγωγής και υψηλής ενεργειακής απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες.
- **Ρόλος προηγμένων υλικών και διεπιφανειών:** Οδικοί χάρτες για tandem ΦΒ υπογραμμίζουν κρίσιμα σημεία σε απορροφητές, διεπιφάνειες, ενδογενή/εξωγενή ελαττώματα και encapsulation.

Στο πλαίσιο αυτό, το έργο TAEDR-0537347 εστιάζει σε καινοτόμα υλικά, διεπιφάνειες και διατάξεις τρίτης γενιάς που μπορούν να τοποθετήσουν την εγχώρια βιομηχανία σε ανταγωνιστική θέση.

3.2 Πλαίσιο Technology Readiness Levels (TRL)

Η κλίμακα **TRL 1–9** χρησιμοποιείται από την ΕΕ και τα προγράμματα Horizon Europe ως βασικό εργαλείο αξιολόγησης ωριμότητας τεχνολογίας.

Συνοπτικά:

Στάδιο	TRL	Περιγραφή (ΕΕ)
Βασική έρευνα	1–3	Βασικές αρχές – διατύπωση έννοιας – πειραματική απόδειξη concept σε εργαστήριο
Σχεδιασμός & δοκιμές	4–6	Επικύρωση σε εργαστήριο/συναφές περιβάλλον – επίδειξη υποσυστήματος/πρωτοτύπου
Ανάπτυξη & εμπορευματοποίηση	7–9	Πρωτότυπο σε λειτουργικό περιβάλλον – σύστημα ολοκληρωμένο – επιβεβαιωμένο σε πραγματική λειτουργία

Ο οδικός χάρτης του παρόντος παραδοτέου βασίζεται σε σταδιακή αναβάθμιση TRL για επιλεγμένα αποτελέσματα του έργου.

4 Στρατηγικό Όραμα και Μακροπρόθεσμοι Στόχοι

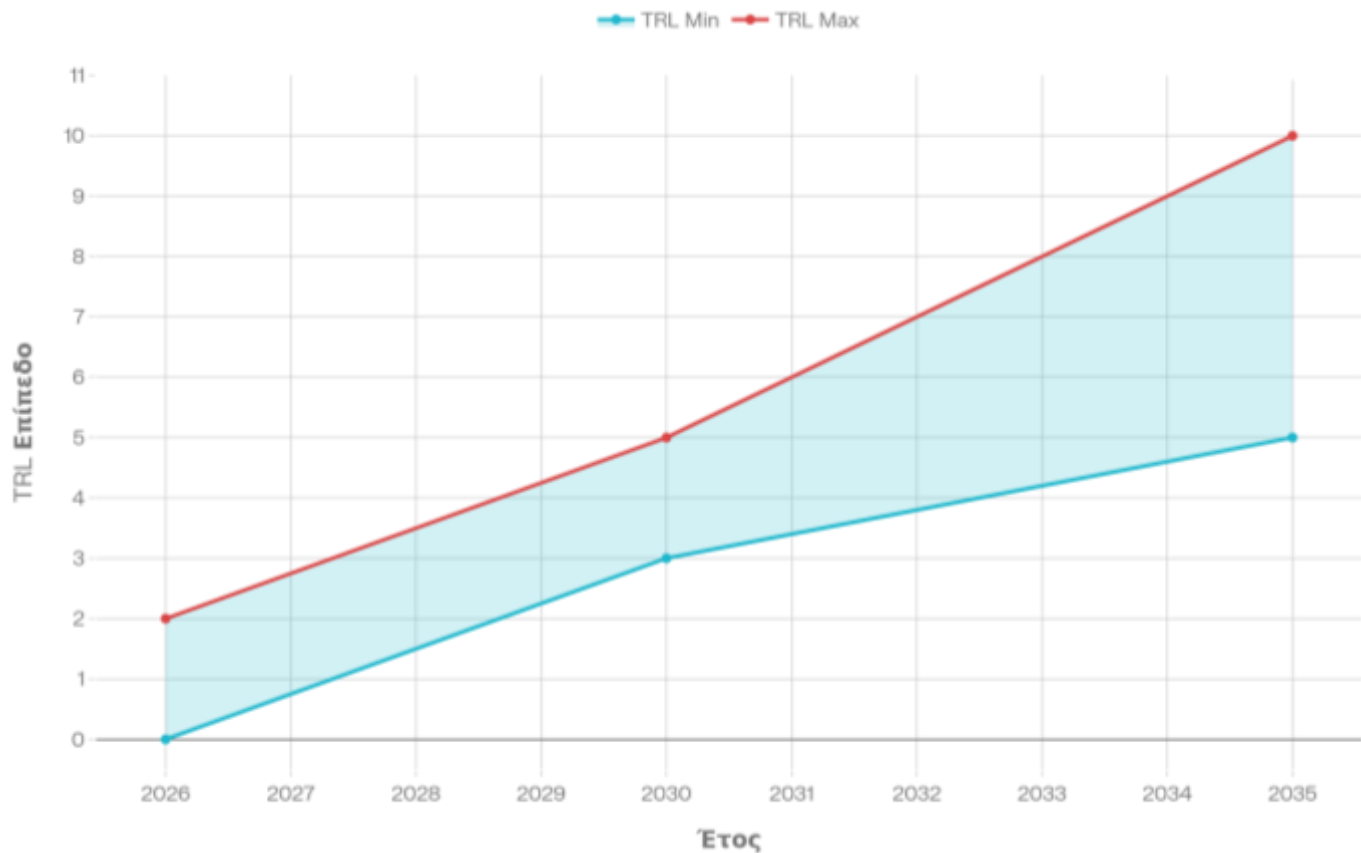
Το όραμα του έργου είναι, μέχρι το 2035, να έχει διαμορφωθεί στην Ελλάδα και στην ΕΕ:

- **Τεχνολογική πλατφόρμα ΦΒ τρίτης γενιάς**, βασισμένη σε περοβσκίτες, οργανικά φωτοβολταϊκά, διχαλκογενίδια και προηγμένα διεπιφανειακά υλικά, με ώριμες αλυσίδες αξίας.
- **Βιομηχανική ικανότητα παραγωγής modules** και υβριδικών λύσεων (π.χ. perovskite/Si, BIPV) με ανταγωνιστικό LCOE σε σχέση με την κλασική σιλικόνη.
- **Δίκτυο συνεργασιών μεταξύ ερευνητικών φορέων και βιομηχανίας**, που αξιοποιεί πλήρως τα αποτελέσματα του έργου και λειτουργεί ως πυρήνας για περαιτέρω επενδύσεις R&D.

Στρατηγικοί στόχοι:

- Μετάβαση των τεχνολογιών PSC και OPV από εργαστηριακή ωριμότητα σε πιστοποιημένα, αξιόπιστα προϊόντα για επιλεγμένες αγορές.
- Δημιουργία κρίσιμης μάζας τεχνογνωσίας και υποδομών ώστε να ενισχυθεί η τεχνολογική αυτονομία και η ανταγωνιστικότητα σε ευρωπαϊκό επίπεδο.
- Στοχευμένη ηγετική θέση σε εξειδικευμένες αγορές όπου οι PSC και OPV υπερέχουν έναντι του πυριτίου (BIPV, εύκαμπτα/ελαφριά φωτοβολταϊκά, tandem διατάξεις).

- Ενσωμάτωση αρχών βιωσιμότητας, κυκλικής οικονομίας και κανονιστικής συμμόρφωσης (RoHS, WEEE, LCA) ήδη από το στάδιο σχεδιασμού της τεχνολογίας.



Εικόνα 1. Εξέλιξη TRL perovskites solar cells (2026-2035).

5 Οδικός Χάρτης Τεχνολογικής Ωρίμανσης

5.1 Βραχυπρόθεσμη Φάση (0–2 έτη): TRL 3–5

Στόχος: Μετάβαση από αποδεδειγμένες στο εργαστήριο έννοιες (TRL 3) σε επικυρωμένες τεχνολογίες σε εργαστηριακά και συναφή περιβάλλοντα (TRL 4--5).

Κύριες δράσεις:

- **Ωρίμανση υλικών και διεπιφανειών**
 - Βελτιστοποίηση συνθέσεων περοβσκίτη (single-junction, wide-bandgap για tandem).

- Μελέτη/βελτιστοποίηση διχαλκογενιδίων ως απορροφητών ή διεπιφανειακών στρωμάτων.
- Σχεδιασμός και επιβεβαίωση διεπιφανειακής μηχανικής για σταθερότητα και μείωση ελαττωμάτων.
- Ενσωμάτωση non-fullerene acceptors σε οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV) για βελτιωμένη απορρόφηση φάσματος και απόδοση μετατροπής ενέργειας.
- **Μοντελοποίηση και προσομοιώσεις**
 - DFT/TCAD μοντέλα για ηλεκτρονικές, οπτικές και μεταφορικές ιδιότητες.
 - Προβλεπτικά μοντέλα σταθερότητας και failure modes για περοβσκίτες, OPV και TMDs, εναρμονισμένα με διεθνείς αναλύσεις για tandems.
- **Εργαστηριακά κύτταρα και μικρά modules**
 - Επίτευξη αποδόσεων σε επίπεδο κελιού συγκρίσιμων με τη διεθνή βιβλιογραφία για συναφή υλικά.
 - Αρχικά mini-modules (π.χ. 5×5 cm²) για αξιολόγηση scale-up.
- **Σχεδίαση και ανάπτυξη ανθεκτικών πολυστρωματικών συστημάτων ενθυλάκωσης**
 - Ειδικά προσαρμοσμένα στις μεσογειακές κλιματικές συνθήκες, με έμφαση στην αντοχή σε υψηλή UV ακτινοβολία, θερμική καταπόνηση, κύκλους θερμοκρασίας και υγροθερμικά φορτία.
 - Στόχος η δραστική επιμήκυνση του χρόνου ζωής των διατάξεων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.
- **Εναρμόνιση και τυποποίηση ερευνητικών πρωτοκόλλων αξιολόγησης αξιοπιστίας και απόδοσης**
 - Ευθυγράμμιση με διεθνείς προδιαγραφές πιστοποίησης (προ-IEC δοκιμές).
 - Επιταχυνόμενες δοκιμές γήρανσης, θερμικοί κύκλοι, υγρασία και φωτισμός, ώστε να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ εργαστηριακής έρευνας και βιομηχανικής αξιοποίησης.
- **Ανάπτυξη πρώτων πιλοτικών πρωτοτύπων και demonstrators**
 - Για εφαρμογές φωτοβολταϊκών ενσωματωμένων σε κτίρια (BIPV), φορητές και ευέλικτες ενεργειακές λύσεις για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας.
 - Μικρής κλίμακας tandem διατάξεις, με στόχο την επίδειξη τεχνολογικής ωριμότητας και τη διερεύνηση δυνατοτήτων εμπορικής αξιοποίησης.

Αναμενόμενα Αποτελέσματα:

- Μετάβαση από TRL 3--4 σε TRL 4--5.
- Κατοχύρωση πρώτων πατεντών (υλικά, διεργασίες, ενθυλάκωση).
- Λειτουργικά πρωτότυπα μικρής κλίμακας.

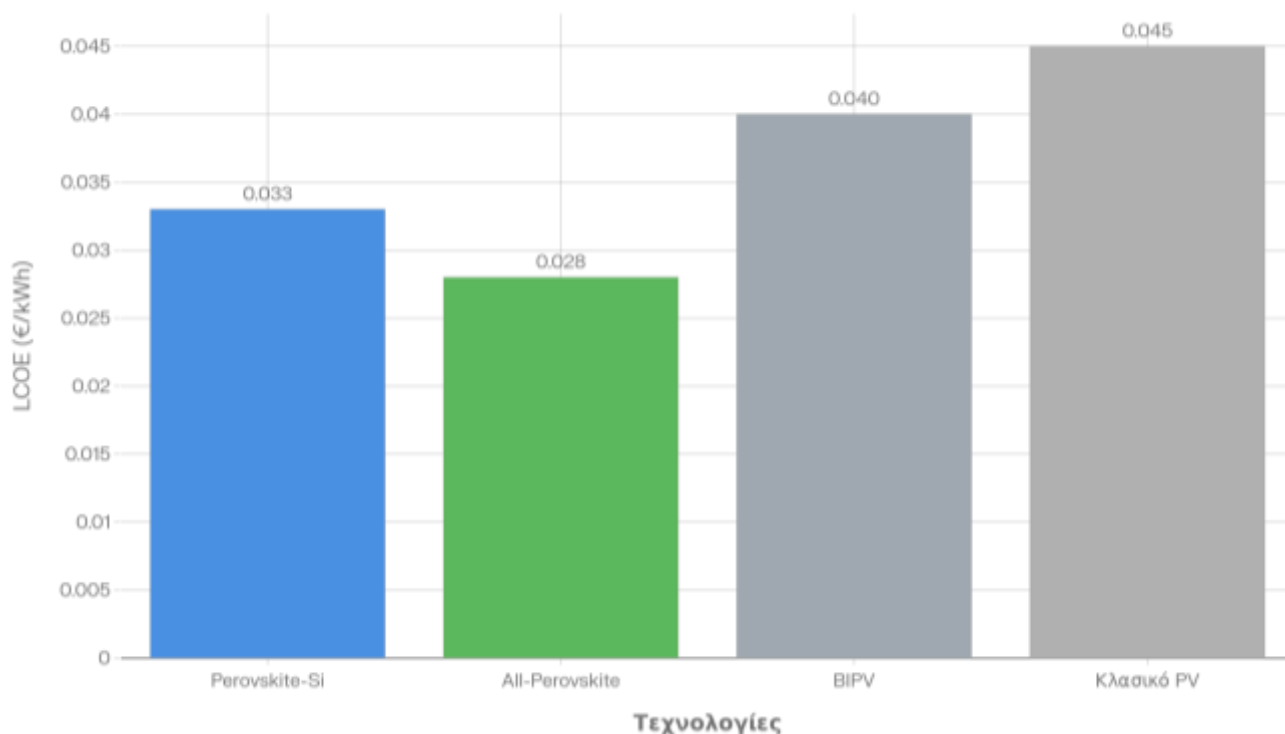
Η φάση αυτή ολοκληρώνεται με σαφή τεκμηρίωση TRL 4--5 για βασικά αποτελέσματα (υλικά, διαδικασίες, κυψέλες).

5.2 Μεσοπρόθεσμη Φάση (3–5 έτη): TRL 5–7

Στόχος: Προώθηση των τεχνολογιών σε πιλοτική κλίμακα, με demonstration σε συναφές και σταδιακά λειτουργικό περιβάλλον (TRL 6--7). Γεφύρωση του χάσματος μεταξύ εργαστηρίου και βιομηχανικής αξιοποίησης. Απόδειξη της δυνατότητας παραγωγής μεγάλης κλίμακας με επαναληψιμότητα και ελεγχόμενο κόστος.

Κύρια βήματα:

- **Πιλοτικές γραμμές επεξεργασίας και modules**
 - Δημιουργία και λειτουργία πιλοτικών γραμμών παραγωγής ημι-βιομηχανικής κλίμακας, αξιοποιώντας τεχνικές εκτύπωσης και επίστρωσης όπως slot-die coating και roll-to-roll επεξεργασία.
 - Ολοκληρωμένες διεργασίες ενθυλάκωσης, με στόχο τη διερεύνηση της κλιμάκωσης (scalability), της επαναληψιμότητας και της αναπαραγωγιμότητας των διεργασιών παραγωγής PSC/OPV.
 - Κατασκευή prototype modules (π.χ. 30×30 cm²) με στόχο αποδόσεις module >20% για advanced αρχιτεκτονικές.
- **Δοκιμές πεδίου και επιταχυνόμενη γήρανση**
 - Εξωτερική έκθεση modules σε ρεαλιστικές κλιματικές συνθήκες (π.χ. ημι-ξηρό κλίμα, υψηλή ηλιοφάνεια).
 - Εφαρμογή πρωτοκόλλων accelerated testing ειδικά στοχευμένων σε perovskite/OPV/tandem τεχνολογίες, όπως συστήνεται σε διεθνείς μελέτες.
- **Ολοκλήρωση σε εφαρμογές αγοράς**
 - Επίδειξη σε **βιομηχανικές στέγες**, μικρά BIPV έργα, αγρο-φωτοβολταϊκά πιλοτικά.
 - Συνεκτίμηση LCOE σε σύγκριση με state-of-the-art σιλικόνη, με αξιοποίηση διεθνών δεδομένων για κόστος και απόδοση.



Εικόνα 2. Σύγκριση LCOE (€/kWh) tandems vs άλλες PV τεχνολογίες.

5.3 Μακροπρόθεσμη Φάση (5–10 έτη): TRL 7–9

Στόχος: Πλήρης ωρίμανση τεχνολογίας, εμπορική ανάπτυξη προϊόντων και ενσωμάτωση στην αγορά ενέργειας (TRL 8--9).

Κύριες συνιστώσες:

- **Εμπορικά δοκιμαστικά έργα (pre-commercial deployments)**
 - Μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις ώστε να επιβεβαιωθεί η απόδοση, η αξιοπιστία και τα επιχειρηματικά μοντέλα (π.χ. PPA, leasing).
- **Κλιμάκωση παραγωγής και αλυσίδα αξίας**
 - Συνεργασίες με ευρωπαϊκούς/εθνικούς κατασκευαστές ΦΒ, γυαλιού, μεταλλικών υποσυστημάτων.
 - Πιστοποίηση προϊόντων (IEC standards) και banking-grade αξιολόγηση για πρόσβαση σε χρηματοδότηση έργων.
- **Διεθνής εξωστρέφεια και clusters καινοτομίας**

- Συμμετοχή σε ευρωπαϊκές πλατφόρμες για tandem και advanced PV, ενίσχυση της εικόνας του ελληνικού οικοσυστήματος ως παρόχου τεχνογνωσίας και προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας.

5.4 Συνοπτικός Πίνακας Οδικού Χάρτη

Άξονας	Ορίζοντας	TRL Στόχος	Ενδεικτικές Δράσεις
Υλικά & διεπιφάνειες	0–2 έτη	4–5	Βελτιστοποίηση συνθέσεων, διεπιφανειακή μηχανική, σταθερότητα
Κύτταρα & mini-modules	0–2 έτη	4–5	Single-junction & wide-bandgap perovskites, TMD-based layers
Πιλοτικά modules	3–5 έτη	6–7	Pilot lines, 30×30 cm ² modules, accelerated & outdoor testing
Εφαρμογές επίδειξης	3–5 έτη	6–7	Βιομηχανικές στέγες, BIPV, agro-PV πιλοτικά
Εμπορικά προϊόντα	5–10 έτη	8–9	Πιστοποιημένα modules, εμπορικά έργα, διεθνείς συνεργασίες

6 Στρατηγική Καινοτομίας & Θέσης στην Αγορά

6.1 Στόχευση βασικών αγορών

Οι ώριμες και αναδυόμενες αγορές για ΦΒ τρίτης γενιάς περιλαμβάνουν:

- **Υφιστάμενες εγκαταστάσεις στέγης/εδάφους:** Αντικατάσταση/αναβάθμιση με υψηλότερης απόδοσης modules (π.χ. perovskite/Si tandems) σε χώρες με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο.
- **Κτιριακά ολοκληρωμένα ΦΒ (BIPV):** Χρήση ημιδιαφανών/ελαφρών modules, όπου η αναλογία βάρους/ισχύος και η αισθητική δίνουν πλεονέκτημα.
- **Ελαφρές και εύκαμπτες λύσεις:** Για βιομηχανικές στέγες με χαμηλό φέροντα οργανισμό και ειδικές εφαρμογές (logistics, αγροτικές δομές).
- **Agro-PV και ειδικές εφαρμογές:** Συνδυασμός γεωργικής χρήσης με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η ελαφριά και ευέλικτη τεχνολογία παρέχει πλεονέκτημα.

6.2 Ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα

Η τεχνολογική πλατφόρμα του έργου μπορεί να προσφέρει:

- **Υψηλότερη απόδοση ανά επιφάνεια:** Ιδιαίτερα μέσω tandem αρχιτεκτονικών, που υπερβαίνουν τα πρακτικά όρια της κλασικής σιλικόνης.
- **Μικρότερο LCOE σε συγκεκριμένα σενάρια:** Μεγα-αποδόσεις και αυξημένο ενεργειακό yield σε πραγματικές συνθήκες οδηγούν σε χαμηλότερο κόστος/kWh.
- **Τοπική αλυσίδα αξίας:** Ενίσχυση της εγχώριας βιομηχανίας κατασκευών, υλικών και μηχανολογικών υπηρεσιών, μείωση εξάρτησης από εισαγωγές modules.

6.3 Στρατηγικές διαφοροποίησης

- **Τεχνολογική διαφοροποίηση:** Υιοθέτηση συνδυασμών perovskite/TMD/προηγμένων διεπιφανειών, προσφέροντας υψηλή απόδοση και σταθερότητα.
- **Βιομηχανική διαφοροποίηση:** Εστίαση σε niche αγορές (BIPV, αγρο-ΦΒ, ειδικές βιομηχανικές εφαρμογές) όπου οι λύσεις τρίτης γενιάς υπερέχουν σε βάρος, αισθητική, ενσωμάτωση.
- **Υπηρεσίες “technology-as-a-service”:** Προσφορά τεχνικών υπηρεσιών, μετρήσεων, συμβουλευτικής για βιομηχανικούς πελάτες που επιθυμούν να ενσωματώσουν την τεχνολογία στα δικά τους προϊόντα.

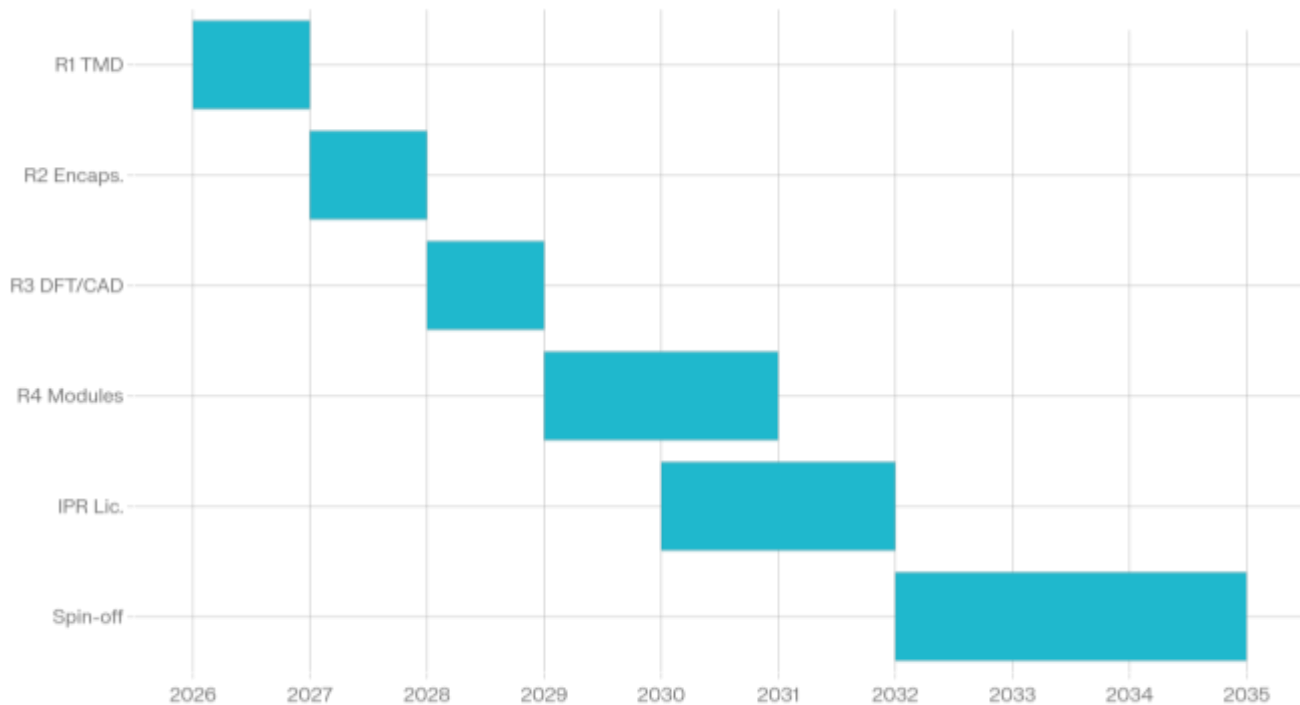
7 Εκμετάλλευση Ερευνητικών Αποτελεσμάτων

7.1 Χαρτογράφηση αποτελεσμάτων (foreground)

Τα κύρια κατηγοριοποιησιμα αποτελέσματα του έργου μπορούν ενδεικτικά να οργανωθούν ως:

- **R1 – Νέα υλικά & αρχιτεκτονικές περοβσκήτη / TMD:** Συνθέσεις, διεπιφανειακά στρώματα, multi-layer δομές.
- **R2 – Διεργασίες επεξεργασίας & κλιμάκωσης:** Πρωτόκολλα deposition, ανόπτησης, encapsulation, πράσινοι διαλύτες.
- **R3 – Μοντέλα & λογισμικό προσομοίωσης:** DFT/TCAD εργαλεία, βιβλιοθήκες υλικών, predictive μοντέλα αξιοπιστίας.
- **R4 – Πρωτότυπες διατάξεις & modules:** Single-junction, tandem, BIPV modules.

Για κάθε κατηγορία αποτελέσματος διαμορφώνεται ξεχωριστή στρατηγική IP & exploitation.



Εικόνα 3. Χρονοδιάγραμμα RDI & Exploitation Roadmap (2026-2035): Από R1 (TMD deposition) έως spin-off και IPR licensing

7.2 Μοντέλα εκμετάλλευσης

Πιθανά μοντέλα εκμετάλλευσης:

- **Αδειοδότηση (Licensing) προς βιομηχανικούς εταίρους:**
 - Non-exclusive ή exclusive licenses για συγκεκριμένες αγορές/γεωγραφικές περιοχές.
 - Συμφωνίες co-development για συν-βελτιστοποίηση τεχνολογίας και παραγωγικών γραμμών.
- **Δημιουργία spin-off / start-up:**
 - Ιδίως για λογισμικό και πλατφόρμες μοντελοποίησης (R3), αλλά και για εξειδικευμένα BIPV προϊόντα.
 - Συνδυασμός δημόσιας και ιδιωτικής χρηματοδότησης (EIC Accelerator, seed & VC).

- **Open innovation & standardization:**
 - Ανοικτή διάθεση επιλεγμένων εργαλείων/μοντέλων (open-source ή με ελεγχόμενες άδειες) για ενίσχυση οικοσυστήματος.
 - Συμμετοχή στη διαμόρφωση τεχνικών προδιαγραφών και standards για tandem και advanced PV.

7.3 Στρατηγική Πνευματικής Ιδιοκτησίας (IPR)

Η στρατηγική IPR εναρμονίζεται με ευρωπαϊκές πρακτικές exploitation:

- **Early IP screening:** Συστηματική καταγραφή αποτελεσμάτων, εκτίμηση πατενταρισιμότητας και ανάλυση freedom-to-operate.
- **Ισορροπία προστασίας / διάχυσης:**
 - Προτεραιότητα σε κατοχύρωση (provisional applications) πριν από δημοσιεύσεις υψηλού impact.
 - Επιλεκτική διάχυση know-how για ενίσχυση συνεργειών με βιομηχανία.
- **Διακυβέρνηση IP μεταξύ εταιρών:**
 - Συμφωνίες Consortium/Joint Ownership για κοινά αποτελέσματα.
 - Clear rules για exploitation δικαιωμάτων από τρίτους και από κάθε εταίρο.

7.4 Στάδια χρηματοδότησης & ωρίμανσης

Η εξέλιξη των αποτελεσμάτων σε υψηλά TRL συνδέεται με κλιμακωτή χρηματοδότηση:

- **Horizon Europe / EIC Pathfinder & Transition:** Για ώριμη βασική έρευνα (TRL 1–4) και μεταφορά σε πιλοτικό επίπεδο (TRL 3–6).
- **EIC Accelerator & InnovFin, InvestEU:** Για υποστήριξη κλιμάκωσης πρωτοτύπων και εμπορευματοποίηση (TRL 5–8).
- **Εθνικά προγράμματα & ιδιωτικά κεφάλαια:** Για υποστήριξη εγχώριων pilot lines, spin-off και μεγάλων επίδειξης.

8 Σύνδεση με τον Παραγωγικό Ιστό & Πολιτικές Πράσινης Μετάβασης

8.1 Συνεργασία με ελληνική βιομηχανία

Ο οδικός χάρτης προβλέπει:

- **Συμπράξεις με εταιρείες ΑΠΕ & ΕΡC:** Για πιλοτικές εφαρμογές και co-design λύσεων ανά έργο.
- **Συνεργασία με βιομηχανίες υλικών (γυαλί, μέταλλο, πολυμερή):** Ανάπτυξη ολοκληρωμένων BIPV & βιομηχανικών δομών.
- **Δίκτυα με MME τεχνολογίας:** Για ανάπτυξη εξειδικευμένων υποσυστημάτων, monitoring, AI-based diagnostics.

Αυτές οι δράσεις ευθυγραμμίζονται με ευρύτερους ευρωπαϊκούς RDI roadmap για ενίσχυση του ενεργειακού συστήματος και των δικτύων.

8.2 Συνάφεια με ευρωπαϊκές πολιτικές

Η τεχνολογία που αναπτύσσεται στο έργο υποστηρίζει:

- **European Green Deal & REPowerEU:** Μέσω αύξησης διείσδυσης ΑΠΕ, αποκέντρωσης παραγωγής και βελτίωσης ενεργειακής ασφάλειας.
- **Βιομηχανική στρατηγική ΕΕ για καθαρές τεχνολογίες:** Ανάπτυξη εγχώριας παραγωγικής βάσης για προηγμένα ΦΒ, μείωση εξάρτησης από εισαγωγές και ενίσχυση της ευρωπαϊκής ανταγωνιστικότητας.

9 Κίνδυνοι & Μέτρα Μετριασμού

9.1 Τεχνολογικοί κίνδυνοι

- **Μακροχρόνια σταθερότητα περοβοκίτη & TMDs:**
 - Μέτρο: Επένδυση σε διεπιφανειακή μηχανική, ανθεκτικό encapsulation, και συστηματικά accelerated tests, όπως προτείνουν διεθνείς οδικοί χάρτες για tandems.
- **Κλιμάκωση διεργασιών εργαστηρίου σε βιομηχανική κλίμακα:**
 - Μέτρο: Συνεργασίες με βιομηχανικούς εταίρους ήδη από TRL 4–5, πιλοτικές γραμμές και κοινά προγράμματα ανάπτυξης.

9.2 Αγορικοί & οικονομικοί κίνδυνοι

- **Αβεβαιότητα κόστους / LCOE σε σχέση με σιλικόνη:**
 - Μέτρο: Στοχευμένες αγορές όπου τα μοναδικά χαρακτηριστικά (π.χ. βάρος, ευελιξία, υψηλή απόδοση σε χαμηλό φωτισμό) υπερκαλύπτουν τυχόν διαφορές κόστους.

- **Τραπεζική αποδοχή & χρηματοδότηση έργων:**

- Μέτρο: Μακροχρόνιες δοκιμές πεδίου, ανεξάρτητα certification & bankability studies, συμμετοχή σε διεθνείς πρωτοβουλίες αξιολόγησης emerging PV.

9.3 Ρυθμιστικοί & περιβαλλοντικοί κίνδυνοι

- **Ρυθμιστικά ζητήματα σχετικά με χρήση Pb σε περοβσκίτες:**

- Μέτρο: Ερευνητικές δραστηριότητες προς μείωση Pb, ανάπτυξη Pb-lean ή Pb-free ιδιομορφών, και ολοκληρωμένες στρατηγικές διαχείρισης/ανακύκλωσης, σύμφωνα με διεθνείς πρακτικές.

10 Κανονιστική Συμμόρφωση και Βιωσιμότητα

Η ενσωμάτωση αρχών κυκλικής οικονομίας και κανονιστικής συμμόρφωσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας:

- **RoHS (Restriction of Hazardous Substances):** Περιορισμός επικίνδυνων ουσιών στα ΦΒ υλικά, με ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση μολύβδου στους περοβσκίτες.
- **WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment):** Σχεδιασμός για ανακύκλωση και ασφαλή διάθεση στο τέλος του κύκλου ζωής των προϊόντων.
- **LCA (Life Cycle Assessment):** Συστηματική αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος από την παραγωγή έως την ανακύκλωση των διατάξεων.
- **Κυκλική οικονομία:** Ανάπτυξη στρατηγικών για την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση υλικών, ελαχιστοποίηση αποβλήτων και μέγιστη αξιοποίηση πόρων.

11 Δείκτες Απόδοσης (KPIs)

Η παρακολούθηση της προόδου του οδικού χάρτη βασίζεται σε μετρήσιμους δείκτες απόδοσης:

Κατηγορία	KPI	Στόχος (2035)
Τεχνολογική απόδοση	Απόδοση κελιού (%)	>25% (PSC), >20% (OPV)
Τεχνολογική απόδοση	Απόδοση module (%)	>20% (tandem)
Σταθερότητα	T80 (χρόνος για 80% αρχικής απόδοσης)	>10,000 ώρες (εργαστήριο)
Σταθερότητα	Διάρκεια ζωής πεδίου	>20 έτη (με εγγύηση)
Οικονομική βιωσιμότητα	LCOE (€/kWh)	Ανταγωνιστικό με Si
Παραγωγική ικανότητα	Πιλοτική γραμμή	>100 m ² /έτος (2028)

Εμπορική αξιοποίηση	Πιστοποιημένα προϊόντα	IEC 61215, IEC 61646
Πνευματική ιδιοκτησία	Πατέντες	>10 κατοχυρώσεις
Επιστημονική παραγωγή	Δημοσιεύσεις	>50 άρθρα υψηλού impact
Βιομηχανικές συνεργασίες	Συμφωνίες R&D	>5 συμβάσεις

12 Συμπεράσματα – Συστάσεις για το Έργο

- Διαδοχική ωρίμανση μέσω TRL:** Η σαφής χαρτογράφηση των αποτελεσμάτων του έργου σε TRL 1-9 παρέχει διαφάνεια και επιτρέπει στοχευμένη μετάβαση από εργαστηριακή έρευνα σε πιλοτικές εφαρμογές και τελικά σε εμπορικά προϊόντα, σε ευθυγράμμιση με πρακτικές Horizon Europe.
- Εστίαση σε perovskite/OPV/tandem και προηγμένα υλικά:** Οι διεθνείς αναλύσεις για perovskite/silicon, all-perovskite tandems και οργανικά φωτοβολταϊκά τεκμηριώνουν ότι η περαιτέρω αύξηση της αποδοτικότητας ΦΒ και η μείωση του LCOE θα περάσει μέσα από αυτά τα υλικά και τις διεπιφάνειες τους, καθιστώντας την ερευνητική κατεύθυνση του έργου τεχνολογικά και στρατηγικά εύστοχη.
- Ολοκληρωμένος οδικός χάρτης 0-10 ετών:** Η τριφασική προσέγγιση (0-2, 3-5, 5-10 έτη) διασφαλίζει ρεαλιστικά στάδια ωρίμανσης, με σαφείς στόχους για υλικά, διεργασίες, πρωτότυπα και εμπορικά έργα, και παρέχει ένα πρακτικό εργαλείο προγραμματισμού για ερευνητικούς και βιομηχανικούς εταίρους.
- Σχέδιο εκμετάλλευσης με έμφαση σε IPR και βιομηχανικές συνέργειες:** Η συνδυασμένη χρήση licensing, spin-offs, open innovation και standardization ενισχύει την πιθανότητα ουσιαστικής εισόδου στην αγορά και μεγιστοποίησης της οικονομικής αξίας των αποτελεσμάτων. Η έγκαιρη στρατηγική IPR είναι κρίσιμη για την προστασία και αξιοποίηση της γνώσης.
- Ισχυρή σύνδεση με τον παραγωγικό ιστό και τις ευρωπαϊκές πολιτικές:** Η κατεύθυνση του έργου ευθυγραμμίζεται με τις ευρωπαϊκές προτεραιότητες για καθαρές τεχνολογίες, ενεργειακή ασφάλεια και βιομηχανική ανταγωνιστικότητα, δημιουργώντας προϋποθέσεις για περαιτέρω χρηματοδότηση, κλιμάκωση και διεθνή δικτύωση.
- Αντιμετώπιση προκλήσεων σταθερότητας και κλιμάκωσης:** Οι βασικές αδυναμίες που αναδείχθηκαν (χαμηλή μακροχρόνια σταθερότητα, ζητήματα ενθυλάκωσης, τοξικότητα Pb στους περοβσκίτες, περιορισμένη διάρκεια ζωής στα OPV) απαιτούν συστηματική προσέγγιση μέσω προηγμένων υλικών, βελτιωμένης ενθυλάκωσης και τυποποιημένων πρωτοκόλλων αξιολόγησης.

7. **Έμφαση σε εξειδικευμένες αγορές:** Η στόχευση σε niche εφαρμογές όπου οι τεχνολογίες τρίτης γενιάς υπερέχουν (BIPV, εύκαμπτα/ελαφριά ΦΒ, tandem) μειώνει την άμεση ανταγωνιστική πίεση από την κυρίαρχη τεχνολογία σιλικόνης και επιτρέπει την οικοδόμηση τεχνογνωσίας και αγοραστικής παρουσίας.

Το παρόν παραδοτέο μπορεί να λειτουργήσει ως **στρατηγικός οδηγός** για τη συνέχεια του έργου, αλλά και ως βάση για τον σχεδιασμό μελλοντικών προτάσεων, βιομηχανικών συμπράξεων και επενδυτικών πρωτοβουλιών γύρω από τα ΦΒ τρίτης γενιάς στην Ελλάδα και την Ευρώπη.