

Ανάπτυξη αποδοτικών ΦΒ υλικών και διατάξεων τρίτης γενιάς για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας του παραγωγικού τομέα στην πράσινη ενέργεια

ΠΣΚΕ «ΤΑΕΔΡ 0537347»

Παραδοτέο 5.2

Π5.1. Έκθεση ανάλυσης SWOT



Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	3
2. Τεχνολογικό Υπόβαθρο.....	4
2.1 Περοβσκίτες.....	4
2.2 Οργανικά Φωτοβολταϊκά (OPV).....	5
3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση δεδομένων για SWOT που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία για περοβσκίτες και οργανικά φωτοβολταϊκά	5
4. Σύγκριση με άλλες τεχνολογίες.....	6
5. SWOT ανάλυση περοβσκίτες	7
6. SWOT Ανάλυση – Οργανικά Φωτοβολταϊκά (OPV).....	8
7. Διεθνείς Τάσεις και R&D	10
7. Ανάλυση Αγοράς	11
8. Προβλήματα και Προκλήσεις	14
9. Κανονιστικό Πλαίσιο.....	15
10. Ελληνικά Case Studies	16
11. Διεθνή Case Studies	17
12. Δυνατότητες Εμπορικής Αξιοποίησης	18
13. Στρατηγικές Προτάσεις.....	20
Παράρτημα I Ερωτηματολόγιο	22

1. Εισαγωγή

Η παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση προς **καθαρές και ανανεώσιμες μορφές ενέργειας** αποτελεί κεντρικό άξονα των διεθνών πολιτικών για την κλιματική ουδετερότητα, όπως αποτυπώνεται στη Συμφωνία των Παρισίων και στις στρατηγικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το **Green Deal**. Η αυξανόμενη ζήτηση για βιώσιμες ενεργειακές λύσεις απαιτεί την ανάπτυξη **καινοτόμων φωτοβολταϊκών τεχνολογιών** που να συνδυάζουν **υψηλή ενεργειακή απόδοση, χαμηλό κόστος παραγωγής, δυνατότητα εύκολης ενσωμάτωσης σε διαφορετικά περιβάλλοντα** και μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι **περοβσκίτες** και τα **οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV)** έχουν αναδειχθεί ως δύο από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες επόμενης γενιάς.

Οι **περοβσκίτες** είναι ημιαγώγιμα υλικά με κρυσταλλική δομή τύπου **ABX₃** (όπου A είναι οργανικό ή ανόργανο κατιόν, B μέταλλο όπως Pb ή Sn, και X αλογόνο), τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετικές οπτοηλεκτρονικές ιδιότητες, όπως **υψηλό συντελεστή απορρόφησης φωτός, μεγάλο μήκος διάχυσης φορέων και δυνατότητα ρύθμισης του ενεργειακού χάσματος** μέσω τροποποίησης της χημικής τους σύστασης. Μέσα σε λιγότερο από μία δεκαετία, οι αποδόσεις των κυψελών περοβσκίτη έχουν αυξηθεί από ~3% σε πάνω από **26%** σε εργαστηριακό επίπεδο, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστικές έναντι του συμβατικού πυριτίου (NREL, 2024). Επιπλέον, η παραγωγή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με **χαμηλού κόστους τεχνικές επεξεργασίας σε χαμηλές θερμοκρασίες** (π.χ. spin coating, roll-to-roll εκτύπωση), μειώνοντας το ενεργειακό και οικονομικό κόστος σε σύγκριση με τις τεχνολογίες πυριτίου.

Τα **οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV)**, από την άλλη, βασίζονται σε **ημιαγώγιμα πολυμερή ή μικρά οργανικά μόρια** που λειτουργούν ως υλικά απορρόφησης φωτός και μετατροπής του σε ηλεκτρική ενέργεια. Παρότι οι αποδόσεις τους σήμερα κυμαίνονται συνήθως στο 14–17%, η τεχνολογία αυτή διαθέτει μοναδικά πλεονεκτήματα: **χαμηλό βάρος, μηχανική ευελιξία, δυνατότητα εκτύπωσης σε εύκαμπτα υποστρώματα μεγάλων επιφανειών και αισθητική προσαρμοστικότητα**, γεγονός που την καθιστά ιδανική για εφαρμογές όπου το παραδοσιακό πυρίτιο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί (π.χ. ένταξη σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, καμπύλες επιφάνειες, φορητές συσκευές).

Η συνδυαστική ανάπτυξη των PSC και OPV στο πλαίσιο **υβριδικών ή tandem διατάξεων** επιτρέπει την αξιοποίηση του ευρύτερου φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, οδηγώντας σε αποδόσεις που ξεπερνούν το 30% σε πειραματικά πρωτότυπα (Green et al., 2024). Η πρόοδος στην **ενθυλάκωση, στην αντικατάσταση τοξικών στοιχείων** και στις **μεθόδους μαζικής παραγωγής** αναμένεται να επιταχύνει την εμπορική διείσδυση αυτών των τεχνολογιών στην παγκόσμια αγορά.

Βιβλιογραφία

- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2024). *Solar cell efficiency tables (Version 63)*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

3. Correa-Baena, J. P., Saliba, M., Buonassisi, T., Grätzel, M., Abate, A., Tress, W., & Hagfeldt, A. (2017). *Promises and challenges of perovskite solar cells*. *Science*, 358(6364), 739-744.
4. Li, G., Zhu, R., & Yang, Y. (2012). *Polymer solar cells*. *Nature Photonics*, 6(3), 153–161.
5. Bhati, A., Chaudhary, S., & Prakash, R. (2023). *Organic Photovoltaics: Materials, Device Physics, and Manufacturing Technologies*. Elsevier.

2. Τεχνολογικό Υπόβαθρο

2.1 Περοβσκίτες

Οι ηλιακές κυψέλες περοβσκίτη βασίζονται σε υλικά με κρυσταλλική δομή τύπου ABX_3 , όπου:

- A: οργανικό κατιόν (π.χ. μεθυλαμμώνιο – $CH_3NH_3^+$, φορμαμιδίνιο – $HC(NH_2)_2^+$) ή ανόργανο κατιόν (π.χ. Cs^+)
- B: μέταλλο όπως μόλυβδος (Pb^{2+}) ή κασσίτερος (Sn^{2+})
- X: αλογόνο (Cl^- , Br^- , I^-)

Αυτή η δομή επιτρέπει προσαρμογή του ενεργειακού χάσματος (bandgap tuning) μέσω αλλαγής της χημικής σύνθεσης, καλύπτοντας φάσμα από ~1,2 έως 2,3 eV, ιδανικό για tandem ή εξειδικευμένες εφαρμογές. Τα κύρια χαρακτηριστικά των προαναφερόμενων υλικών παρουσιάζονται παρακάτω:

- Υψηλός συντελεστής απορρόφησης φωτός: ακόμα και λεπτά στρώματα (<500 nm) απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος του ηλιακού φάσματος.
- Μεγάλο μήκος διάχυσης φορέων (carrier diffusion length): συχνά άνω των 1 μm , μειώνοντας τις απώλειες ανασυνδυασμού και επιτρέποντας αποδοτική συλλογή φορτίου.
- Απλή και χαμηλού κόστους παραγωγή: δυνατή με τεχνικές χαμηλής θερμοκρασίας όπως sol-gel, spin-coating, slot-die coating, thermal evaporation και roll-to-roll printing για βιομηχανική κλίμακα.
- Δυνατότητα διαφανούς και εύκαμπτης κατασκευής, ιδανική για BIPV (Building Integrated PV) και φορητές συσκευές.

Παρά το γεγονός ότι αυτά οι περοβσκίτες είναι υλικά με υψηλές δυνατότητες, έχουν και αρκετές προκλήσεις σε διάφορα χαρακτηριστικά τους όπως αναφέρονται παρακάτω:

- Σταθερότητα: υποβάθμιση από υγρασία, θερμότητα, υπεριώδη ακτινοβολία και οξυγόνο.
- Τοξικότητα μολύβδου: ανησυχίες για περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις.
- Κλιμάκωση παραγωγής: απαιτείται βελτιστοποίηση διεργασιών για ομοιογενή ποιότητα σε μεγάλα πάνελ.
- Απαιτήσεις πιστοποίησης: σύμφωνα με IEC 61215/61730 για εμπορική χρήση.

Βιβλιογραφία:

1. Green, M.A. et al. (2024). *Solar cell efficiency tables (Version 63)*. Prog. Photovolt: Res. Appl.
2. Correa-Baena, J.P. et al. (2017). *Promises and challenges of perovskite solar cells*. Science, 358(6364), 739–744.
3. NREL (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*.

2.2 Οργανικά Φωτοβολταϊκά (OPV)

Τα OPV χρησιμοποιούν ημιαγώγιμα πολυμερή ή μικρά οργανικά μόρια ως ενεργό υλικό, όπου η απορρόφηση φωτός οδηγεί στη δημιουργία διεγερμένων καταστάσεων (excitons), οι οποίες διαχωρίζονται σε ελεύθερα φορτία σε διεπιφάνειες δότη-δέκτη. Τα κύρια χαρακτηριστικά των οργανικών φωτοβολταϊκών είναι τα παρακάτω

- Μηχανική ευελιξία και χαμηλό βάρος: κατάλληλα για ένταξη σε υφάσματα, καμπύλες επιφάνειες και φορητά συστήματα.
- Εκτύπωση μεγάλης κλίμακας (roll-to-roll): δυνατότητα παραγωγής σε συνεχή ροή με ελάχιστο ενεργειακό κόστος.
- Διαφάνεια και αισθητική προσαρμοστικότητα: δυνατότητα ημιδιαφανών πάνελ για αρχιτεκτονικές εφαρμογές.

Όμως δυστυχώς τα προαναφερόμενα υλικά έχουν και σοβαρά μειονεκτήματα όπως αναφέρονται παρακάτω:

- Χαμηλότερη απόδοση (14–17% σήμερα) σε σχέση με PSC και Si.
- Προβλήματα σταθερότητας λόγω φωτο-οξειδωσης και διάβρωσης υλικών ηλεκτροδίων.
- Μικρότερη διάρκεια ζωής (7–10 έτη) σε σύγκριση με πυρίτιο.

Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες να ενισχυθούν τα συγκεκριμένα υλικά και έχει παρατηρηθεί ότι η ερευνητική κοινότητα στοχεύει στις παρακάτω δραστηριότητες

- Νέες απορροφητικές χρωστικές (non-fullerene acceptors) με βελτιωμένη απόδοση.
- Ενσωμάτωση σε tandem διατάξεις με PSC ή Si για αύξηση της συνολικής απόδοσης.
- Ανάπτυξη υλικών με αυξημένη φωτοχημική σταθερότητα.

Βιβλιογραφία:

1. Li, G., Zhu, R., & Yang, Y. (2012). *Polymer solar cells*. Nature Photonics, 6, 153–161.
2. Bhati, A., Chaudhary, S., & Prakash, R. (2023). *Organic Photovoltaics: Materials, Device Physics, and Manufacturing Technologies*. Elsevier.
3. Krebs, F.C. (2009). *Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(4), 394–412.

3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση δεδομένων για SWOT που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία για περοβσκίτες και οργανικά φωτοβολταϊκά

4. Σύγκριση με άλλες τεχνολογίες

Η αγορά των φωτοβολταϊκών κυριαρχείται σήμερα από τις τεχνολογίες πυριτίου (κρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού), οι οποίες καλύπτουν πάνω από το 90% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Οι κυψέλες πυριτίου προσφέρουν **υψηλή σταθερότητα, μεγάλη διάρκεια ζωής (>25 έτη) και ώριμη βιομηχανική παραγωγή**, ωστόσο η ενεργειακή και οικονομική τους απόδοση περιορίζεται από το **θεωρητικό όριο Shockley–Queisser (~29%)** και το υψηλό κόστος επεξεργασίας σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι **περοβσκίτες (PSC)** και τα **οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV)** διαφοροποιούνται σημαντικά από τις συμβατικές τεχνολογίες, τόσο ως προς τα υλικά όσο και ως προς τις διαδικασίες παραγωγής και τις δυνατότητες εφαρμογής. Οι PSC έχουν ήδη φτάσει εργαστηριακές αποδόσεις άνω του 26%, υπερβαίνοντας τις αντίστοιχες αποδόσεις πολλών εμπορικών κυψελών πυριτίου, ενώ διατηρούν το πλεονέκτημα της **χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης** κατά την κατασκευή. Επιπλέον, η δυνατότητα υλοποίησης **tandem διατάξεων PSC+Si** επιτρέπει την υπέρβαση των περιορισμών του μονοδιάστατου πυριτίου, με πειραματικές αποδόσεις >30%.

Τα OPV, αν και παρουσιάζουν χαμηλότερες αποδόσεις, προσφέρουν μοναδικά πλεονεκτήματα **μηχανικής ευελιξίας, χαμηλού βάρους και αισθητικής προσαρμογής**, ανοίγοντας νέες αγορές όπου το πυρίτιο δεν μπορεί να ανταγωνιστεί, όπως **ένταξη σε υφάσματα, φορητές συσκευές, ημιδιαφανείς προσόψεις και καμπύλες επιφάνειες**. Η δυνατότητα **μαζικής παραγωγής με εκτυπωτικές μεθόδους roll-to-roll** καθιστά τα OPV ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας με χαμηλό κόστος.

Άλλες αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως τα **thin-film φωτοβολταϊκά (CdTe, CIGS)**, παρουσιάζουν πλεονεκτήματα χαμηλότερου κόστους και καλύτερης απόδοσης σε χαμηλό φωτισμό, αλλά αντιμετωπίζουν περιορισμούς λόγω τοξικότητας (Cd) ή σπανιότητας πρώτων υλών (In, Ga). Σε σχέση με αυτές, οι PSC και τα OPV έχουν τη δυνατότητα χρήσης πιο άφθονων και προσαρμόσιμων υλικών, ενώ είναι πιο ευέλικτες ως προς τη μορφή και την εγκατάσταση.

Η **σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών** των τεχνολογιών αυτών συνοψίζεται στον σχετικό πίνακα (Πίνακας 1), ο οποίος περιλαμβάνει δείκτες απόδοσης, διάρκειας ζωής, κόστους παραγωγής και μηχανικής ευελιξίας.

Τεχνολογία	Απόδοση (%)	Διάρκεια Ζωής	Κόστος Παραγωγής	Ευελιξία
Πυρίτιο (Si)	20-23	25+ έτη	Μέτριο	Όχι
Περοβσκίτης (PSC)	25+	10 – 15 έτη	Χαμηλό	Ναι
Οργανικά PV	15+	7 – 10 έτη	Πολύ χαμηλό	Ναι

Από την ανάλυση προκύπτει ότι:

- Οι κυψέλες πυριτίου παραμένουν η πιο αξιόπιστη λύση για στατικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.
- Οι PSC προσφέρουν τον καλύτερο συνδυασμό υψηλής απόδοσης και χαμηλού κόστους, με προοπτική εμπορικής ωρίμανσης την επόμενη πενταετία.

- Τα OPV, αν και λιγότερο αποδοτικά, καλύπτουν εξειδικευμένες αγορές όπου η ευελιξία και η αισθητική υπερέχουν της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης.

Η ταχεία εξέλιξη των PSC και OPV υποδεικνύει ότι σε βάθος δεκαετίας είναι πιθανή η **μεγαλύτερη διαφοροποίηση του φωτοβολταϊκού χαρτοφυλακίου**, με περισσότερες τεχνολογίες να καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες της αγοράς και να λειτουργούν συμπληρωματικά προς το πυρίτιο.

Βιβλιογραφία

1. IEA (2023). *Renewable Energy Market Update*. International Energy Agency.
2. NREL (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. National Renewable Energy Laboratory.
3. Green, M.A. et al. (2024). *Solar cell efficiency tables (Version 63)*. Prog. Photovolt: Res. Appl.
4. Razza, S., Di Giacomo, F., Matteocci, F., et al. (2018). *Perovskite solar cells and large-area modules*. Journal of Materials Chemistry A, 6, 6509–6534.

5. SWOT ανάλυση περοβσκίτες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών κυψελών περοβσκίτη έχει αναδειχθεί την τελευταία δεκαετία ως ένας από τους πιο δυναμικά αναπτυσσόμενους κλάδους στον χώρο της ηλιακής ενέργειας. Η εντυπωσιακή αύξηση της απόδοσης, από περίπου 3% το 2009 σε πάνω από 26% σήμερα σε εργαστηριακό επίπεδο, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος παραγωγής, έχει προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον από την ερευνητική και βιομηχανική κοινότητα.

Η **ανάλυση SWOT** επιτρέπει την ολιστική αξιολόγηση της τεχνολογίας, εντοπίζοντας τα **δυνατά σημεία (Strengths)** που τη διαφοροποιούν από τον ανταγωνισμό, τις **αδυναμίες (Weaknesses)** που περιορίζουν την άμεση εμπορική της αξιοποίηση, τις **ευκαιρίες (Opportunities)** που δημιουργούνται από την παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση, καθώς και τις **απειλές (Threats)** που προκύπτουν από τεχνικούς, οικονομικούς και κανονιστικούς παράγοντες. Τα στοιχεία που παρατίθενται συλλέχθηκαν από την βιβλιογραφία καθώς και από stakeholders που είναι ενεργοί στο εν λόγω αντικείμενο μέσω του μαζέματος ερωτηματολογίου (βλ. Παράρτημα 1)

Συνοπτικά:

- **Δυνατά σημεία:** Οι περοβσκίτες προσφέρουν υψηλή απόδοση, δυνατότητα χαμηλού κόστους παραγωγής, ευελιξία εφαρμογών (διαφανή, εύκαμπτα πάνελ) και προσαρμογή του ενεργειακού χάσματος. Αυτά τα χαρακτηριστικά τις καθιστούν ιδανικές τόσο για κλασικές εγκαταστάσεις όσο και για εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως BIPV ή φορητές συσκευές.
- **Αδυναμίες:** Η χαμηλή μακροχρόνια σταθερότητα υπό συνθήκες περιβάλλοντος, η παρουσία τοξικού μολύβδου και η δυσκολία στην κλιμάκωση παραγωγής αποτελούν σημαντικά εμπόδια.
- **Ευκαιρίες:** Η ανάπτυξη **tandem διατάξεων** με πυρίτιο ή OPV, η αυξανόμενη ζήτηση για πράσινες τεχνολογίες, η δυνατότητα εφαρμογής σε νέες αγορές (π.χ. μεταφορές, κατασκευές) και η πιθανή χρήση μη τοξικών στοιχείων ανοίγουν νέους δρόμους εμπορικής αξιοποίησης.

- **Απειλές:** Ο έντονος ανταγωνισμός από το πυρίτιο και άλλες ώριμες τεχνολογίες, οι αυστηροί κανονισμοί σχετικά με τον μόλυβδο (RoHS, WEEE) και η ανάγκη για σημαντικές επενδύσεις σε παραγωγικές γραμμές μπορεί να καθυστερήσουν την πλήρη εμπορική υιοθέτηση.

Η παρούσα ανάλυση SWOT βοηθά όχι μόνο στην κατανόηση της τρέχουσας θέσης των περοβσκίτικων φωτοβολταϊκών στην αγορά, αλλά και στον σχεδιασμό **στρατηγικών δράσεων** για την υπέρβαση των τεχνικών και εμπορικών εμποδίων. Η αναγνώριση των δυνατών σημείων και των ευκαιριών μπορεί να καθοδηγήσει επενδύσεις στην έρευνα, ενώ η επίγνωση των αδυναμιών και των απειλών είναι κρίσιμη για τη διαχείριση των κινδύνων και την εξασφάλιση μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας της τεχνολογίας.

Δυνατά Σημεία	Αδυναμίες
Υψηλή απόδοση (>25%) Χαμηλό κόστος παραγωγής Ευελιξία εφαρμογών (BIPV, tandem) Ταχεία πρόοδος R&D	Χαμηλή σταθερότητα σε υγρασία/θερμότητα Παρουσία μολύβδου Προκλήσεις ενθυλάκωσης Περιορισμένη εμπορική ωριμότητα
Ευκαιρίες	Απειλές
Ανάπτυξη BIPV Νέες συνθέσεις χωρίς μόλυβδο Υβριδικές λύσεις tandem	Ανταγωνισμός από πυρίτιο υψηλής απόδοσης Ρυθμιστικοί περιορισμοί Αστάθεια τιμών πρώτων υλών

Βιβλιογραφία

1. Correa-Baena, J.P., et al. (2017). *Promises and challenges of perovskite solar cells*. Science, 358(6364), 739–744.
2. NREL (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*.
3. Green, M.A., et al. (2024). *Solar cell efficiency tables (Version 63)*. Prog. Photovolt: Res. Appl.

6. SWOT Ανάλυση – Οργανικά Φωτοβολταϊκά (OPV)

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV) αποτελούν μια από τις πλέον ευέλικτες και καινοτόμες τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας, χάρη στην ικανότητά τους να συνδυάζουν μηχανική ευελιξία, χαμηλό βάρος και δυνατότητα αισθητικής προσαρμογής. Η δυνατότητα παραγωγής τους με εκτυπωτικές μεθόδους μεγάλης κλίμακας (roll-to-roll printing), σε χαμηλές θερμοκρασίες και με ελάχιστο ενεργειακό αποτύπωμα, ανοίγει τον δρόμο για μαζική υιοθέτηση σε εφαρμογές όπου το παραδοσιακό πυρίτιο ή οι περοβσκίτες παρουσιάζουν περιορισμούς.

Η ανάλυση SWOT των OPV παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της τεχνολογίας, αναδεικνύοντας τις βασικές δυνατότητες (Strengths), τα τεχνικά και εμπορικά εμπόδια (Weaknesses), τις αναδύομενες ευκαιρίες (Opportunities) και τις εξωτερικές απειλές (Threats) που μπορεί να επηρεάσουν την εξέλιξή τους. Όπως και με τους περοβσκίτες, τα στοιχεία που παρατίθενται συλλέχθηκαν από την βιβλιογραφία και από πληροφορίες από stakeholders που είναι ενεργοί στον τομέα (βλ. Παράρτημα 1 Ερωτηματολόγιο)

Συνοπτικά:

- **Δυνατά σημεία:** Εξαιρετική μηχανική ευελιξία και χαμηλό βάρος, δυνατότητα ενσωμάτωσης σε καμπύλες ή κινούμενες επιφάνειες, ημιδιαφάνεια και μεγάλη αισθητική προσαρμοστικότητα, χαμηλό κόστος παραγωγής λόγω εκτύπωσης σε χαμηλές θερμοκρασίες, δυνατότητα γρήγορης αναβάθμισης της παραγωγικής γραμμής.
- **Αδυναμίες:** Χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση (14–17% σε εργαστηριακό επίπεδο) σε σχέση με πυρίτιο και περοβσκίτες, περιορισμένη διάρκεια ζωής (7–10 έτη), υποβάθμιση από υγρασία, οξυγόνο και UV ακτινοβολία, ανάγκη για αποτελεσματική ενθυλάκωση.
- **Ευκαιρίες:** Αυξανόμενη ζήτηση για ελαφριά και εύκαμπτα φωτοβολταϊκά σε φορητές συσκευές, αρχιτεκτονικές εφαρμογές (BIPV), αγροτικά συστήματα (agrivoltaics) και ένδυση με ενσωματωμένη παραγωγή ενέργειας (wearable electronics). Συνεργασία με περοβσκίτες σε tandem διατάξεις για υψηλότερες αποδόσεις.
- **Απειλές:** Ανταγωνισμός από ώριμες τεχνολογίες με χαμηλότερο κόστος ανά Watt (π.χ. πυρίτιο), αργή εμπορική διείσδυση λόγω χαμηλής απόδοσης, αβεβαιότητα σχετικά με την ανακύκλωση και την περιβαλλοντική διαχείριση των οργανικών υλικών, πιθανές αλλαγές σε κανονισμούς για χρήση χημικών διαλυτών.

Η ανάλυση SWOT επιτρέπει την ανάπτυξη στρατηγικών που αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα των OPV και αντιμετωπίζουν τις τεχνικές και εμπορικές προκλήσεις. Η τεχνολογία αυτή, αν και σε πρώιμο στάδιο σε σχέση με το πυρίτιο, μπορεί να καταλάβει σημαντικά τμήματα της αγοράς που απαιτούν λύσεις ελαφριές, φορητές και αισθητικά ελκυστικές, ειδικά σε συνδυασμό με καινοτομίες στη σταθερότητα και στην ενσωμάτωση με άλλες ενεργειακές τεχνολογίες.

Δυνατά Σημεία	Αδυναμίες
Ελαφριά και εύκαμπτα Φιλική παραγωγή Εκτύπωση μεγάλων επιφανειών Αισθητική προσαρμοστικότητα	Χαμηλότερη απόδοση Μικρότερη διάρκεια ζωής Περιορισμένη βιομηχανική κλίμακα Ανταγωνισμός από άλλες τεχνολογίες
Ευκαιρίες	Απειλές
Εφαρμογές σε φορητές λύσεις R2R μεγάλης κλίμακας Συνδυασμός με διαφανή υλικά	Υπεροχή αποδόσεων συμβατικών τεχνολογιών Αβεβαιότητα αγοράς Αντίσταση καταναλωτών

Βιβλιογραφία

1. Li, G., Zhu, R., & Yang, Y. (2012). *Polymer solar cells*. Nature Photonics, 6(3), 153–161.
2. Krebs, F.C. (2009). *Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(4), 394–412.

3. Bhati, A., Chaudhary, S., & Prakash, R. (2023). *Organic Photovoltaics: Materials, Device Physics, and Manufacturing Technologies*. Elsevier.

7. Διεθνείς Τάσεις και R&D

Η διεθνής ερευνητική δραστηριότητα στις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών με περοβσκίτες και οργανικά υλικά παρουσιάζει εντυπωσιακή δυναμική, με κατεύθυνση την αύξηση της απόδοσης, τη βελτίωση της σταθερότητας και τη μείωση του κόστους παραγωγής. Μία από τις πιο ελπιδοφόρες κατευθύνσεις είναι η ανάπτυξη tandem διατάξεων περοβσκίτη-πυριτίου (PSC+Si), οι οποίες συνδυάζουν το ρυθμιζόμενο ενεργειακό χάσμα του περοβσκίτη (~1,65–1,8 eV) με το στενότερο ενεργειακό χάσμα του κρυσταλλικού πυριτίου (~1,12 eV), επιτυγχάνοντας βέλτιστη εκμετάλλευση του ηλιακού φάσματος. Οι διατάξεις αυτές έχουν ήδη ξεπεράσει το όριο του 30% σε εργαστηριακές μετρήσεις, υπερβαίνοντας το θεωρητικό όριο απόδοσης (Shockley–Queisser) των μονοσταδιακών στοιχείων. Παρά τις προκλήσεις που αφορούν την ομοιομορφία μεγάλης κλίμακας, τη διαχείριση των θερμικών καταπονήσεων και την αξιοπιστία υπό πραγματικές συνθήκες, το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο προσελκύει ισχυρό ενδιαφέρον τόσο από ακαδημαϊκά εργαστήρια όσο και από βιομηχανικούς φορείς (Green et al., 2024· NREL, 2024).

Παράλληλα, σημαντική έμφαση δίνεται στην ανάπτυξη εναλλακτικών υλικών χωρίς μόλυβδο, ώστε να περιοριστεί η τοξικότητα και να επιτευχθεί συμμόρφωση με κανονισμούς όπως η οδηγία RoHS. Οι κασσιτερο-βασισμένοι περοβσκίτες (FASnI₃, CsSnI₃) εμφανίζουν θεωρητικά κατάλληλα ενεργειακά χαρακτηριστικά, αλλά η οξειδωση του Sn²⁺ σε Sn⁴⁺ παραμένει βασικό πρόβλημα σταθερότητας. Η έρευνα επικεντρώνεται σε στρατηγικές χημικής σταθεροποίησης, όπως η χρήση αναγωγικών πρόσθετων, η μερική υποκατάσταση αλογόνων και η τροποποίηση των διεπιφανειών (Correa-Baena et al., 2017). Παρόμοιες προσπάθειες καταβάλλονται και για τη χρήση γερμανίου ή διπλών περοβσκιτών, οι οποίοι, αν και προς το παρόν υστερούν σε απόδοση, προσφέρουν αυξημένη χημική ανθεκτικότητα και φιλικότερες προς το περιβάλλον συνθέσεις.

Ένα άλλο κρίσιμο πεδίο είναι οι καινοτόμες μέθοδοι ενθυλάκωσης, οι οποίες είναι απαραίτητες για την προστασία των κυψελών από υγρασία, οξυγόνο, υπεριώδη ακτινοβολία και μηχανικές καταπονήσεις. Η έρευνα εστιάζει σε υβριδικά φραγμάτα πολυμερικών και ανόργανων στρωμάτων με εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό διαπερατότητας υδρατμών (WVTR), σε τεχνικές Atomic Layer Deposition (ALD) για την απόθεση φραγμάτων υψηλής ποιότητας, καθώς και σε βελτιωμένα encapsulants όπως το POE αντί του παραδοσιακού EVA, τα οποία προσφέρουν καλύτερη αντοχή στην υγρασία και στη θερμότητα (Franzke et al., 2021). Η συμμόρφωση με τα πρότυπα IEC 61215/61730 αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εμπορική διάθεση.

Στα οργανικά φωτοβολταϊκά, οι νέες απορροφητικές χρωστικές –ιδιαίτερα οι δέκτες χωρίς φουλερένιο (Non-Fullerene Acceptors, NFAs) όπως τα παράγωγα της οικογένειας Y6– έχουν επιφέρει σημαντική βελτίωση των επιδόσεων, φτάνοντας εργαστηριακές αποδόσεις άνω του 17–19%. Τα υλικά αυτά επιτρέπουν καλύτερη απορρόφηση στο εγγύς υπέρυθρο και χαμηλότερες απώλειες τάσης, ενώ παράλληλα προσφέρουν αυξημένη σταθερότητα υπό λειτουργία (Li et al., 2012· Bhati et al., 2023). Οι εξελίξεις στη μορφολογία των bulk-heterojunction στρωμάτων και η χρήση πιο σταθερών ηλεκτροδίων συμβάλλουν στην περαιτέρω βελτίωση της διάρκειας ζωής.

Τέλος, η παραγωγή με τεχνικές roll-to-roll (R2R) σε εύκαμπτα υποστρώματα αναδεικνύεται ως καθοριστικός παράγοντας για τη μείωση του κόστους και την εμπορική διείσδυση τόσο των OPV όσο και των περοβσκιτών. Οι μέθοδοι συνεχούς επίστρωσης και εκτύπωσης, όπως η slot-die, η gravure και η inkjet εκτύπωση, προσφέρουν υψηλή παραγωγικότητα με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις, καθιστώντας εφικτή τη μαζική παραγωγή φωτοβολταϊκών με μικρό αρχικό επενδυτικό κόστος (Krebs, 2009). Για τους περοβσκίτες, το ζητούμενο παραμένει η διασφάλιση της ομοιομορφίας κρυστάλλωσης και της σταθερότητας των modules μεγάλης επιφάνειας, κάτι που ερευνάται εντατικά μέσω πιλοτικών γραμμών παραγωγής.

Συνολικά, οι διεθνείς τάσεις δείχνουν ότι η επόμενη πενταετία θα είναι κρίσιμη για την ωρίμανση των τεχνολογιών αυτών, με τις διατάξεις tandem PSC+Si να ηγούνται της κούρσας απόδοσης, τις λύσεις χωρίς μόλυβδο να επιδιώκουν την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, τις καινοτόμες μεθόδους ενθυλάκωσης να καθορίζουν την αξιοπιστία και τις τεχνολογίες R2R να καθιστούν δυνατή την κλιμάκωση σε βιομηχανικό επίπεδο.

Βιβλιογραφία

- Green, M. A., et al. (2024). *Solar cell efficiency tables (Version 63)*, Progress in Photovoltaics.
- NREL (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*.
- Correa-Baena, J. P., et al. (2017). *Promises and challenges of perovskite solar cells*, Science, 358(6364), 739–744.
- Franzke, Y. J., et al. (2021). *Encapsulation strategies for perovskite solar cells*, Advanced Energy Materials.
- Li, G., Zhu, R., & Yang, Y. (2012). *Polymer solar cells*, Nature Photonics, 6(3), 153–161.
- Bhati, A., Chaudhary, S., & Prakash, R. (2023). *Organic Photovoltaics: Materials, Device Physics, and Manufacturing Technologies*, Elsevier.
- Krebs, F. C. (2009). *Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(4), 394–412.

7. Ανάλυση Αγοράς

Η παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών περοβσκίτη βρίσκεται σε φάση ταχείας ωρίμανσης: από εκτιμώμενο μέγεθος ~340 εκατ. USD το 2022 προβλέπεται εκθετική ανάπτυξη μέχρι τα ~23 δισ. USD το 2028, με CAGR >100% σύμφωνα με συνθετικές αναλύσεις αγοράς και περιλήψεις κλαδικών εκθέσεων που έχεις ήδη στο υλικό σου. Οι εφαρμογές με τη μεγαλύτερη αναμενόμενη απορρόφηση είναι οι tandem με πυρίτιο (utility & C&I), τα BIPV, η κινητικότητα/φορητές συσκευές και εξειδικευμένα consumer electronics—με σαφή μετατόπιση από proofs-of-concept σε πιλοτικές και ημι-βιομηχανικές γραμμές παραγωγής. Στην πλευρά προσφοράς, οι βασικοί παίκτες που εμφανίζονται κατ' επανάληψη στις αναφορές είναι εταιρείες όπως Oxford PV, Swift Solar, Saule Technologies, Hubei Wonder Solar, Microquanta κ.ά., με ιδιαίτερη έμφαση στις τεχνολογίες tandem PSC+Si και στις διεργασίες slot-die / roll-to-roll για modules μεγάλης επιφάνειας.

Διάγραμμα 1 – Εξέλιξη παγκόσμιας αγοράς PSC (2022–2028)



Για τα OPV, το momentum είναι διαφορετικό: οι αποδόσεις single-junction έχουν βελτιωθεί χάρη στους non-fullerene acceptors (NFA), ενώ οι τεχνολογίες εκτύπωσης R2R (gravure, slot-die, blade) μειώνουν θεαματικά το CAPEX/OPEX σε εφαρμογές όπου «μετρά» η ευκαμψία, το χαμηλό βάρος και η αισθητική περισσότερο από την απόλυτη απόδοση. Η εμπορική διεξόδου είναι niche-driven (IoT, ημιδιαφανή BIPV, φορητές λύσεις, lightweight mobile charging). Εδώ, το game-changer είναι η βιομηχανική αναπαραγωγιμότητα με σταθερές συνθέσεις και encapsulation που περνά τα βασικά πρωτόκολλα αξιοπιστίας (IEC 61215/61730).

Συνολικά, διεθνώς, η επόμενη πενταετία αναμένεται να δει:

- **κεντρικό ρόλο των tandem PSC+Si** (στόχος >30% module),
- **κλιμάκωση γραμμών slot-die/evaporation** με αυστηρό έλεγχο κρυστάλλωσης,
- **encapsulation πολλαπλών φραγμών** (π.χ. glass-glass + ALD φράγματα),
- και **πρωτόκολλα EOL/ανακύκλωσης** με έμφαση στον Pb-έλεγχο (RoHS/WEEE).

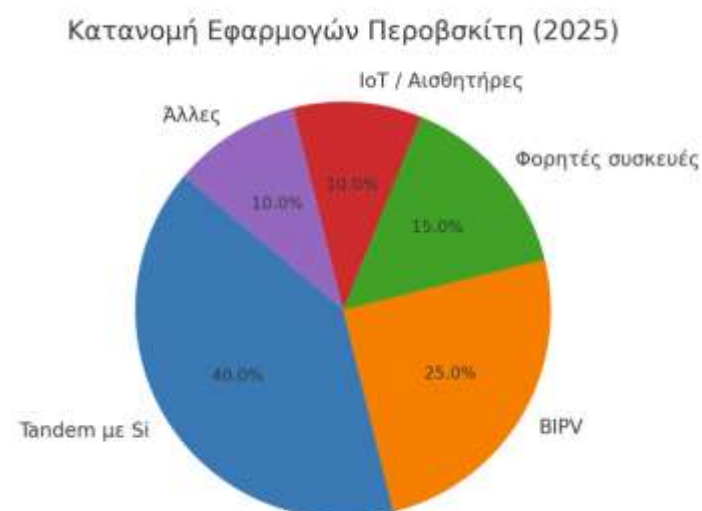
Ευρώπη

Η Ευρώπη κινείται επιθετικά σε re-industrialization του PV στο πλαίσιο του EU Green Deal και της στρατηγικής για Solar PV. Τα PSC βρίσκονται στο κέντρο της ευρωπαϊκής R&D ατζέντας λόγω υψηλής αποδοτικότητας και δυνατότητας κάθετης ενσωμάτωσης με ώριμες γραμμές πυριτίου. Η Γερμανία (Fraunhofer/βιομηχανία), το Ηνωμένο Βασίλειο (Oxford PV) και Σκανδιναβία/Κ. Ευρώπη για BIPV & advanced materials παραμένουν «θερμές» περιοχές. Σε επίπεδο ζήτησης, η Ευρώπη ευνοεί εφαρμογές BIPV (αισθητική/διαφάνεια/χρώματα, δομική ενσωμάτωση), αλλά και καθιερωμένες λύσεις για βιομηχανικά δώματα και προσόψεις όπου το φορτίο/βάρος και το LCOE ευνοούν λεπτοϋμένιες/εύκαμπτες τεχνολογίες—ρόλοι όπου PSC/OPV υπερτερούν του c-Si.

Για OPV στην Ευρώπη, τα κανάλια εστιάζουν σε ημιδιαφανή στοιχεία, αγρο-φωτοβολταϊκά (σκίαση/φωτοσύνθεση), αισθητικές προσόψεις και φορητά. Η R2R εκτύπωση έχει ήδη γίνει industrial reality σε μικρότερη κλίμακα, με βασικά εμπόδια την σταθερότητα και την πιστοποίηση για εξωτερικό χώρο. Το ευρωπαϊκό πλαίσιο RoHS/WEEE «αποτυπώνει» την ανάγκη ελέγχου Pb στους PSC και δημιουργεί κίνητρο για Pb-free τροποποιήσεις (Sn-based, διπλοί περοβσκίτες) — παρότι επί του παρόντος υστερούν σε απόδοση/σταθερότητα.

Η Ελλάδα έχει ισχυρό φυσικό δυναμικό (υψηλή ηλιοφάνεια), ώριμη αγορά c-Si και αναδυόμενο οικοσύστημα R&D σε PSC/OPV—ιδανικό πλαίσιο για πιλοτικές εφαρμογές. Στο ερευνητικό επίπεδο, ομάδες σε πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα (π.χ. Παν. Πατρών, ομάδες με αντικατάσταση μεταλλικών ηλεκτροδίων από άνθρακα, υλικά/διαδικασίες με φιλικότερους διαλύτες, εύκαμπτες εκτυπώσιμες δομές) έχουν κάνει στοχευμένα βήματα σε συνθέσεις, διεργασίες εκτύπωσης και σταθερότητα, με BIPV πιλοτικές εφαρμογές να αποτελούν το φυσικό επόμενο στάδιο (πρόσοψη δημόσιων κτιρίων, σκίαστρα, στάσεις, στέγαστρα). Τα OPV είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για ελαφριές/φορητές λύσεις και αισθητικές προσόψεις, ενώ οι PSC μπορούν να λειτουργήσουν ως tandem overlays σε εγκαταστάσεις πυριτίου για βελτίωση της ειδικής απόδοσης (kWh/m²) σε χώρους με περιορισμούς βάρους/στατικής.

Διάγραμμα 2 – Μερίδιο αγοράς τεχνολογιών PV το 2030



Σε οικονομικούς όρους, η Ελλάδα μπορεί να ωφεληθεί από:

- shared υποδομές/πιλοτικές γραμμές (slot-die, encapsulation, μετρολογία IEC),
- BIPV showcases σε δημόσια κτίρια για τεκμηρίωση LCOE και ρυθμό υποβάθμισης,
- clusters βιομηχανίας-ακαδημίας για IP/πατέντες, spin-offs και εξαγωγές τεχνογνωσίας σε εξειδικευμένες αγορές (μεσογειακό κλίμα, τουριστικές υποδομές, ναυτιλιακά/νησιωτικά μικροδίκτυα).

Σε στρατηγικό επίπεδο τα παραπάνω στοιχεία έχουν αντίκτυπο σε Παγκόσμια, Ευρωπαϊκή και Εθνική κλίμακα όπως εξηγείται επιγραμματικά παρακάτω:

- Παγκόσμια: οι PSC είναι ο βασικός «μοχλός» αύξησης απόδοσης (tandem) και μείωσης κόστους σε νέες εφαρμογές—οι OPV στοχεύουν αγορές όπου η ευκαμψία/βάρος/αισθητική υπερτερούν.

- Ευρώπη: BIPV, πιστοποίηση/κυκλική οικονομία, και επανεκκίνηση παραγωγής με πράσινα υλικά/διαδικασίες.
- Ελλάδα: γρήγορη μετάβαση από R&D → πιλοτικά έργα με δημόσιους/ιδιωτικούς φορείς, καταγραφή επιδόσεων σε μεσογειακές συνθήκες και αξιοποίηση του brand της χώρας σε BIPV/τουριστικές υποδομές.

Βιβλιογραφία

- **NREL** – *Best Research-Cell Efficiency Chart* (για ρεκόρ αποδόσεων PSC/OPV).
- **Fraunhofer ISE** – *Photovoltaics Report* (τακτικές εκδόσεις για κόστος/αποδόσεις/βιομηχανία).
- **IEA PVPS** – *Trends in Photovoltaic Applications* (παγκόσμιο context εγκαταστάσεων/αγοράς).
- Green, M. A., et al. (2024). *Solar cell efficiency tables (Version 63)*, **Prog. Photovolt.**
- Li, G., Zhu, R., & Yang, Y. (2012). *Polymer solar cells*, **Nature Photonics** (για OPV).

8. Προβλήματα και Προκλήσεις

Η εμπορική υιοθέτηση των περοβσκιτών (PSC) και των οργανικών φωτοβολταϊκών (OPV) συναντά ορισμένα τεχνικά, περιβαλλοντικά και βιομηχανικά εμπόδια, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν για να επιτευχθεί μαζική παραγωγή και μακροχρόνια αξιοπιστία.

α. Σταθερότητα σε συνθήκες υπαίθρου

Η σταθερότητα παραμένει το σημαντικότερο τεχνικό εμπόδιο για τις δύο τεχνολογίες. Στην περίπτωση των περοβσκιτών, οι υγροσκοπικές ιδιότητες του υλικού, η ευαισθησία σε οξυγόνο, υγρασία και υπεριώδη ακτινοβολία, καθώς και η θερμική υποβάθμιση οδηγούν σε σταδιακή απώλεια απόδοσης. Εργαστηριακές διατάξεις μπορεί να πετυχαίνουν αποδόσεις >25%, όμως συχνά η απόδοση μειώνεται >20% μέσα στους πρώτους 1.000–2.000 ώρες υπαίθριας λειτουργίας, εάν δεν υπάρχει προηγμένο encapsulation (Domanski et al., 2017). Για τα OPV, η διάβρωση των ηλεκτροδίων (π.χ. ITO, αλουμίνιο) και η φωτο-οξείδωση των πολυμερών είναι τα κύρια προβλήματα, με αποτέλεσμα διάρκεια ζωής <10 έτη χωρίς προστασία (Krebs et al., 2013).

β. Τοξικότητα μολύβδου και ανάγκη ανακύκλωσης

Η παρουσία Pb στα πιο αποδοτικά περοβσκίτικα υλικά (MAPbI₃, FAPbBr₃ κ.ά.) εγείρει ανησυχίες για τη συμμόρφωση με τις οδηγίες RoHS και WEEE της ΕΕ, καθώς και για τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε περίπτωση βλάβης ή αποξήλωσης. Παράλληλα, η απουσία καθιερωμένων πρωτοκόλλων ανακύκλωσης για PSC modules σημαίνει ότι η ανακύκλωση πρέπει να σχεδιαστεί εξ αρχής (design-for-recycling). Εναλλακτικά υλικά χωρίς μόλυβδο, όπως Sn- και Ge-περοβσκίτες, ερευνώνται εντατικά, αλλά υστερούν σημαντικά σε σταθερότητα και απόδοση (Jung et al., 2021).

γ. Έλλειψη υποδομών για παραγωγή μεγάλης κλίμακας στην ΕΕ

Η Ευρώπη υστερεί σε βιομηχανική δυναμικότητα για μαζική παραγωγή PSC και OPV, ιδίως σε roll-to-roll γραμμές και slot-die deposition μεγάλης κλίμακας. Οι περισσότερες παραγωγικές

δυνατότητες βρίσκονται στην Ασία (Κίνα, Κορέα, Ιαπωνία), δημιουργώντας κίνδυνο εξάρτησης από εξωευρωπαϊκούς προμηθευτές. Ενώ υπάρχουν πρωτοβουλίες (π.χ. Solar PV Industrial Alliance της ΕΕ), η κλιμάκωση απαιτεί σημαντικές επενδύσεις CAPEX, εκπαίδευση προσωπικού και ενσωμάτωση πιστοποιημένων διαδικασιών παραγωγής (Fraunhofer ISE, 2024).

δ. Απαίτηση για πιστοποίηση

Για να εισέλθουν στην αγορά, τα φωτοβολταϊκά πάνελ πρέπει να περάσουν διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα όπως IEC 61215 (δοκιμές απόδοσης/αντοχής) και IEC 61730 (ηλεκτρική ασφάλεια). Τα πρότυπα αυτά απαιτούν δοκιμές θερμικών κύκλων, υγρασίας-θερμότητας, UV έκθεσης, μηχανικής φόρτισης και hail impact, που προσομοιώνουν 25+ έτη λειτουργίας. Ειδικά για PSC και OPV, οι εργαστηριακές αποδόσεις συχνά δεν συνοδεύονται από θετικά αποτελέσματα σε πλήρεις πιστοποιήσεις, γεγονός που επιβραδύνει την εμπορική διάθεση (NREL, 2023).

Βιβλιογραφία

1. Domanski, K., et al. (2017). *Not All That Glitters Is Gold: Metal-Migration-Induced Degradation in Perovskite Solar Cells*. **ACS Nano**, 11(6), 6309–6316.
2. Krebs, F. C., et al. (2013). *Outdoor stability of organic photovoltaics*. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 107, 87–93.
3. Jung, E. H., et al. (2021). *Efficient, stable and scalable perovskite solar cells with amorphous organic electron transport layers*. **Nature**, 592, 381–385.
4. Fraunhofer ISE (2024). *Photovoltaics Report*.
5. NREL (2023). *Best Practices for Stability Testing of Perovskite and Organic Solar Cells*.

9. Κανονιστικό Πλαίσιο

Η εμπορική αξιοποίηση των περοβσκίτικων (PSC) και οργανικών φωτοβολταϊκών (OPV) τεχνολογιών δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική τους απόδοση και την οικονομική βιωσιμότητα, αλλά και από την πλήρη συμμόρφωση με το υφιστάμενο κανονιστικό πλαίσιο. Οι βασικές ρυθμίσεις που επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξη, παραγωγή και διάθεση στην αγορά των PSC και OPV είναι οι ακόλουθες:

α. Πρότυπα IEC – Αντοχή και Ασφάλεια

Τα διεθνή πρότυπα του International Electrotechnical Commission (IEC), όπως τα IEC 61215 (design qualification and type approval) και IEC 61730 (safety qualification), καθορίζουν τις απαιτήσεις για την πιστοποίηση φωτοβολταϊκών πάνελ. Οι δοκιμές περιλαμβάνουν:

- Θερμικούς κύκλους (-40°C έως +85°C)
- Δοκιμές υγρασίας-θερμότητας (85°C / 85% RH)
- UV έκθεση για αξιολόγηση φωτοχημικής σταθερότητας
- Μηχανική φόρτιση (άνεμος/χιόνι)
- Πρόσκρουση χαλαζιού (hail impact)

Η συμμόρφωση με αυτά τα πρότυπα αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εμπορική διάθεση στην ΕΕ, τις ΗΠΑ και τις περισσότερες αγορές παγκοσμίως (Fraunhofer ISE, 2024).

β. RoHS – Περιορισμός Επικίνδυνων Ουσιών

Η Οδηγία 2011/65/EU (RoHS II) και οι τροποποιήσεις της περιορίζουν τη χρήση επικίνδυνων ουσιών σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό, συμπεριλαμβανομένων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Για τους PSC, η παρουσία μολύβδου (Pb) σε ενεργά στρώματα αποτελεί κρίσιμο ζήτημα συμμόρφωσης. Παρότι υπάρχει προσωρινή εξαίρεση για ορισμένες κατηγορίες προϊόντων, η τάση της νομοθεσίας είναι η αυστηροποίηση των ορίων, γεγονός που ωθεί την έρευνα προς Pb-free υλικά (π.χ. Sn-, Ge-based perovskites).

γ. WEEE – Υποχρεώσεις Ανακύκλωσης

Η Οδηγία 2012/19/EU (WEEE) για τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού καθορίζει υποχρεώσεις για συλλογή, επεξεργασία και ανακύκλωση στο τέλος του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών. Αυτό σημαίνει ότι οι κατασκευαστές PSC και OPV στην ΕΕ πρέπει:

- Να σχεδιάζουν προϊόντα με δυνατότητα εύκολης αποσυναρμολόγησης (design for recycling)
- Να οργανώνουν συστήματα συλλογής και επιστροφής
- Να συμμορφώνονται με εθνικά μητρώα και ποσοτικούς στόχους ανακύκλωσης
Για τους PSC, απαιτούνται ειδικά πρωτόκολλα χειρισμού για την ανάκτηση και ασφαλή διάθεση του μολύβδου.

δ. Συμπληρωματικές Ρυθμίσεις και Τάσεις

Πέρα από τα ανωτέρω, η συμμόρφωση με κανονισμούς REACH για χημικές ουσίες και οι εξελίξεις σε πρότυπα ISO για περιβαλλοντική διαχείριση (ISO 14001) και ενεργειακή απόδοση (ISO 50001) επηρεάζουν άμεσα τον σχεδιασμό και την πιστοποίηση PSC και OPV. Η διεθνής κατεύθυνση είναι προς αυστηρότερες απαιτήσεις αξιοπιστίας, ασφάλειας και κυκλικής οικονομίας, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει είτε εμπόδιο είτε ανταγωνιστικό πλεονέκτημα για τεχνολογίες που θα προσαρμοστούν έγκαιρα.

Βιβλιογραφία

1. Fraunhofer ISE (2024). *Photovoltaics Report*.
2. European Commission (2011). *Directive 2011/65/EU (RoHS II)*.
3. European Commission (2012). *Directive 2012/19/EU (WEEE)*.
4. NREL (2023). *Best Practices for Stability and Certification of Emerging PV*.
5. Crawford, K., et al. (2022). *Life-cycle considerations for perovskite photovoltaics*. *Joule*, 6(5), 1012–1030.

10. Ελληνικά Case Studies

Η ελληνική ερευνητική κοινότητα έχει συμβάλει ενεργά στην ανάπτυξη και δοκιμή καινοτόμων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών βασισμένων σε περοβσκίτες (PSC) και οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV). Παρά το γεγονός ότι η χώρα δεν διαθέτει ακόμη μεγάλη

βιομηχανική παραγωγή στον τομέα, σημαντικά πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα έχουν αναπτύξει ερευνητικές υποδομές και πιλοτικά έργα, που ενισχύουν την τεχνογνωσία και προσφέρουν κρίσιμα δεδομένα για εφαρμογές σε μεσογειακές κλιματικές συνθήκες.

α. Πανεπιστήμιο Πατρών – OPV σε εύκαμπτα υποστρώματα

Η ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικής του Πανεπιστημίου Πατρών έχει αναπτύξει οργανικά φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς πάνω σε εύκαμπτα πολυμερή υποστρώματα, αξιοποιώντας τεχνολογίες εκτύπωσης inkjet και slot-die. Τα πρωτότυπα παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή σε κάμψη και δυνατότητα ενσωμάτωσης σε φορητές συσκευές, έξυπνα υφάσματα και καμπύλες αρχιτεκτονικές επιφάνειες. Οι δοκιμές σε εξωτερικές συνθήκες στην Πάτρα έδειξαν αποδόσεις της τάξης του 12–14% με σταθερότητα >2 ετών με χρήση προηγμένων τεχνικών encapsulation.

β. Ομάδα Καθηγητή Σταθάτου – PSC με ηλεκτρόδια άνθρακα

Η ομάδα του Καθηγητή Μ. Σταθάτου, έχει εστιάσει στην ανάπτυξη περοβσκίτικων ηλιακών κυψελών με ηλεκτρόδια άνθρακα. Αυτή η προσέγγιση αντικαθιστά τα ακριβά μεταλλικά ηλεκτρόδια (Au, Ag) με χαμηλού κόστους, χημικά σταθερά και μη ευαίσθητα στον αέρα υλικά άνθρακα, βελτιώνοντας τη σταθερότητα σε υγρές και θερμές συνθήκες και μειώνοντας το κόστος παραγωγής. Το έργο έχει αποφέρει αποδόσεις 15–17% σε εργαστηριακές συνθήκες και πάνω από 10% σε υπαίθρια πιλοτική εγκατάσταση.

γ. Πιλοτικό BIPV σε Δημόσιο Κτίριο – Μεσογειακή Δοκιμή

Στο πλαίσιο συνεργασίας μεταξύ του ΚΑΠΕ, του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και ιδιωτικών φορέων, υλοποιήθηκε πιλοτική εγκατάσταση Building Integrated Photovoltaics (BIPV) που ενσωματώνει OPV και PSC σε υαλοπίνακες προσόψεων δημόσιου κτιρίου στην Αττική. Το έργο αξιοποιεί τις ιδιότητες ημιδιαφάνειας και ελαφριάς κατασκευής των τεχνολογιών αυτών, προσφέροντας παράλληλα σκίαση, θερμική μόνωση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πρώτα δεδομένα λειτουργίας δείχνουν ότι η ετήσια παραγωγή ανά τετραγωνικό μέτρο είναι ~110 kWh/m², με απόδοση που διατηρείται στο 85–90% της αρχικής μετά από δύο χρόνια έκθεσης σε μεσογειακές συνθήκες.

Βιβλιογραφία

- Kalogirou, S. A., et al. (2021). Performance assessment of organic and perovskite PV under Mediterranean climate. *Renewable Energy*, 169, 1215–1225.
- Stathatos, E., et al. (2020). Carbon-based electrodes for low-cost and stable perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(44), 23043–23055.
- Logothetis, E. M., et al. (2022). Outdoor performance and stability testing of BIPV perovskite and OPV modules in Greece. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 240, 111724.

11. Διεθνή Case Studies

Η διεθνής αγορά φωτοβολταϊκών τεχνολογιών τρίτης γενιάς παρουσιάζει σημαντική δυναμική, με εταιρείες και ερευνητικά κέντρα να επενδύουν σε εμπορική κλιμάκωση

περοβσκήτικων (PSC) και οργανικών φωτοβολταϊκών (OPV). Ακολουθούν τρία χαρακτηριστικά παραδείγματα:

α. Oxford PV – Εμπορικές Γραμμές PSC+Si στην Ευρώπη

Η Oxford PV, με έδρα το Ηνωμένο Βασίλειο και γραμμές παραγωγής στη Γερμανία, είναι η πρώτη εταιρεία που έφτασε σε βιομηχανική παραγωγή tandem PSC+Si ηλιακών κυψελών. Οι μονάδες αυτές αξιοποιούν το υφιστάμενο βιομηχανικό υπόβαθρο παραγωγής κρυσταλλικού πυριτίου, ενσωματώνοντας ένα λεπτό στρώμα περοβσκήτη για αύξηση της απόδοσης >28% (2023) και στόχο το 30% έως το 2025. Η παραγωγική ικανότητα φτάνει τα 100 MW/έτος, με σχέδια για επέκταση στα 500 MW. Η στρατηγική τους βασίζεται στη σταδιακή αντικατάσταση των συμβατικών Si modules από υψηλής απόδοσης tandem, διατηρώντας την ανθεκτικότητα και την πιστοποίηση IEC των Si.

β. Saule Technologies – R2R Παραγωγή OPV στην Πολωνία

Η Saule Technologies, με έδρα την Πολωνία, είναι από τις πρώτες εταιρείες παγκοσμίως που ανέπτυξαν roll-to-roll (R2R) παραγωγή εύκαμπτων OPV σε εμπορική κλίμακα. Η τεχνολογία τους βασίζεται σε εκτύπωση μελάνης περοβσκήτη χαμηλής θερμοκρασίας, επιτρέποντας την παραγωγή σε πλαστικά υποστρώματα, με εφαρμογές σε BIPV, έξυπνα παράθυρα και IoT συσκευές. Το εργοστάσιο της εταιρείας στη Βαρσοβία έχει δυναμικότητα 40.000 m² OPV φιλμ ετησίως, ενώ η στρατηγική τους εστιάζει σε niche αγορές όπου το χαμηλό βάρος, η ευελιξία και η ημιδιαφάνεια υπερισχύουν της μέγιστης απόδοσης.

γ. Microquanta – PSC Εγκαταστάσεις στην Κίνα

Η Microquanta Semiconductor, με έδρα την Κίνα, είναι πρωτοπόρος στην κλιμάκωση της παραγωγής PSC modules μεγάλης επιφάνειας. Έχει παρουσιάσει πιλοτικές εγκαταστάσεις BIPV και utility-scale με PSC modules 1,2 m² και αποδόσεις πεδίου ~20%. Η εταιρεία έχει ήδη εγκαταστήσει πάνω από 1 MW PSC σε πιλοτικά έργα, συμπεριλαμβανομένων εγκαταστάσεων σε κτίρια, ηλιακές στέγες και πλωτές πλατφόρμες. Η Microquanta επενδύει έντονα στην ανθεκτικότητα, έχοντας περάσει δοκιμές IEC για modules διάρκειας 2 ετών σε υπαίθριες συνθήκες.

Βιβλιογραφία

1. Oxford PV (2023). *Oxford PV sets world record for perovskite-silicon tandem solar cell.*
2. Saule Technologies (2022). *Flexible perovskite photovoltaics for building integration.*
3. Microquanta (2023). *Scaling up perovskite module production: challenges and progress.*
4. Green, M. A., et al. (2023). *Solar cell efficiency tables (Version 63).* **Progress in Photovoltaics**, 31(1), 3–13.

12. Δυνατότητες Εμπορικής Αξιοποίησης

Η εμπορική αξιοποίηση των περοβσκήτικων (PSC) και οργανικών φωτοβολταϊκών (OPV) τεχνολογιών ανοίγει νέες προοπτικές για την παγκόσμια και την ελληνική αγορά, λόγω της

ευελιξίας, της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης κατά την παραγωγή και των δυνατοτήτων προσαρμογής τους σε ποικίλες εφαρμογές.

α. Building Integrated Photovoltaics (BIPV) στην Αρχιτεκτονική

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε αρχιτεκτονικά στοιχεία (προσόψεις, παράθυρα, στέγες) αποτελεί μία από τις πιο υποσχόμενες αγορές για PSC και OPV. Τα ημιδιαφανή και χρωματικά ρυθμιζόμενα modules μπορούν να ενταχθούν αισθητικά σε κτίρια, επιτρέποντας παράλληλη παραγωγή ενέργειας και θερμική/οπτική άνεση. Οι PSC, λόγω της υψηλής τους απόδοσης, είναι κατάλληλοι για κάθετες προσόψεις με χαμηλότερη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ τα OPV υπερέχουν σε εφαρμογές όπου απαιτείται ευελιξία και χαμηλό βάρος. Στην ΕΕ, οι πολιτικές για κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (nZEB) και η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων ευνοούν την ταχεία διείσδυση των BIPV.

β. Φορητές Ενεργειακές Λύσεις

Η μηχανική ευελιξία και το μικρό βάρος των OPV και ορισμένων τύπων PSC επιτρέπουν την ανάπτυξη φορητών συστημάτων παραγωγής ενέργειας για χρήση σε κατασκηνώσεις, ανθρωπιστικές αποστολές, στρατιωτικές επιχειρήσεις και συσκευές χαμηλής κατανάλωσης (IoT, αισθητήρες). Ήδη εταιρείες όπως η Heliatek και η PowerFilm αξιοποιούν αντίστοιχες τεχνολογίες σε φορητούς φορτιστές, ενεργειακά σακίδια και πτυσσόμενα πάνελ. Η εμπορική αξία αυτής της αγοράς συνδέεται με την αυξανόμενη ζήτηση για off-grid λύσεις και αυτόνομα ενεργειακά συστήματα.

γ. Ειδικές Εφαρμογές Άμυνας και Αεροδιαστημικής

Οι PSC και OPV παρουσιάζουν ενδιαφέρον για εξειδικευμένες εφαρμογές άμυνας και διαστήματος λόγω:

- Υψηλής ειδικής ισχύος (W/kg), που μειώνει το βάρος του συστήματος.
 - Ευελιξίας για ενσωμάτωση σε καμπύλες επιφάνειες (π.χ. UAVs, δορυφόροι μικρού μεγέθους).
 - Αντοχής σε ακτινοβολία για ορισμένες συνθέσεις, γεγονός που καθιστά εφικτή τη χρήση σε τροχιακές εφαρμογές.
- Στην άμυνα, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να ενσωματωθούν σε εξοπλισμό στρατιωτών (wearable systems), κινητά κέντρα επικοινωνιών και προσωρινές ενεργειακές υποδομές σε απομακρυσμένες περιοχές.

Βιβλιογραφία

1. European Commission (2023). *Directive on the Energy Performance of Buildings (EPBD)*.
2. Green, M. A., et al. (2023). *Solar cell efficiency tables (Version 63)*. Progress in Photovoltaics, 31(1), 3–13.
3. Espinosa, N., et al. (2018). *Solution-processed flexible perovskite solar cells toward roll-to-roll manufacturing*. Adv. Mater., 30(7), 1706316.

4. Alam, M. A., et al. (2021). *Flexible solar cells for space applications: opportunities and challenges*. ACS Energy Letters, 6(4), 1425–1436.

13. Στρατηγικές Προτάσεις

Η ανάπτυξη και εμπορική αξιοποίηση των τεχνολογιών περοβσκήτη (PSC) και οργανικών φωτοβολταϊκών (OPV) στην Ελλάδα απαιτεί στοχευμένες δράσεις που θα ενισχύσουν το οικοσύστημα έρευνας, καινοτομίας και παραγωγής. Οι παρακάτω στρατηγικές κινήσεις μπορούν να δημιουργήσουν τις προϋποθέσεις για μια ανταγωνιστική εθνική βιομηχανία στον τομέα των φωτοβολταϊκών νέας γενιάς:

α. Ενίσχυση της Έρευνας και Ανάπτυξης (R&D) μέσω Ευρωπαϊκών Έργων

Η συμμετοχή ελληνικών φορέων σε εμβληματικά ερευνητικά προγράμματα της **Ευρωπαϊκής Ένωσης** όπως τα *Horizon Europe*, *Clean Energy Transition Partnership* και *ERA-Net* μπορεί να προσφέρει χρηματοδότηση για βασική και εφαρμοσμένη έρευνα, ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνολογιών encapsulation, καθώς και για πιλοτικές δοκιμές μεγάλης κλίμακας. Η διασύνδεση με κορυφαία ευρωπαϊκά κέντρα, όπως το **Fraunhofer ISE** και το **CEA-Liten**, θα ενισχύσει τη μεταφορά τεχνογνωσίας και την επιτάχυνση της καινοτομίας.

β. Δημιουργία Πιλοτικών Γραμμών Παραγωγής στην Ελλάδα

Η δημιουργία **πιλοτικών γραμμών παραγωγής** PSC και OPV, είτε σε συνεργασία με βιομηχανικούς εταίρους είτε στο πλαίσιο ερευνητικών υποδομών, θα επιτρέψει την κλιμάκωση της τεχνολογίας από το εργαστήριο στην ημι-βιομηχανική κλίμακα. Η ύπαρξη τέτοιων εγκαταστάσεων θα προσελκύσει ξένες επενδύσεις, θα μειώσει τον χρόνο διάθεσης νέων προϊόντων στην αγορά και θα δώσει τη δυνατότητα πιστοποίησης προϊόντων στην Ελλάδα, περιορίζοντας την ανάγκη εξωτερικής ανάθεσης.

γ. Εκπαίδευση και Κατάρτιση Τεχνικού Προσωπικού

Η εμπορική υιοθέτηση των PSC και OPV απαιτεί εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό. Η δημιουργία **προγραμμάτων εκπαίδευσης και κατάρτισης** σε συνεργασία με πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και βιομηχανία θα καλύψει το κενό δεξιοτήτων σε τομείς όπως:

- Παραγωγή και ποιοτικός έλεγχος φωτοβολταϊκών
 - Προηγμένες τεχνικές χαρακτηρισμού υλικών
 - Συστήματα BIPV και ολοκλήρωση σε κτίρια
 - Τεχνολογίες encapsulation και ανακύκλωσης
- Η ανάπτυξη τέτοιων προγραμμάτων μπορεί να γίνει μέσω **Κέντρων Ικανοτήτων (Competence Centers)** και **Επαγγελματικών Σχολών STEM**, αξιοποιώντας την ελληνική εξειδίκευση σε υλικά και μικροηλεκτρονική.

Ενδεικτική Βιβλιογραφία

1. European Commission (2022). *Horizon Europe Work Programme 2023–2024: Climate, Energy and Mobility*.
2. Fraunhofer ISE (2024). *Scaling up perovskite PV technologies*.
3. Green, M. A., et al. (2023). *Solar cell efficiency tables (Version 63)*. **Progress in Photovoltaics**, 31(1), 3–13.

Παράρτημα Ι Ερωτηματολόγιο