

ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Εισαγωγή	3
1. Η εξέλιξη των αιολικών πάρκων	4
2. Τριπλή περιβαλλοντική κρίση και πλανητικά όρια.....	6
3. Περιβαλλοντικό αποτύπωμα και ανάλυση κύκλου ζωής ανεμογεννητριών	9
Παραγωγή	10
Μεταφορά υλικών και εγκατάσταση.....	11
Λειτουργία και συντήρηση	12
Τέλος Κύκλου Ζωής	12
Ενεργειακή απόδοση και αποτελεσματικότητα	13
4. Αβεβαιότητες της ΑΚΖ	17
5. Βιοποικιλότητα και ανεμογεννήτριες.....	19
6. Το πρόβλημα της ανακύκλωσης των ανεμογεννητριών	22
7. Συμπεράσματα	25

Εισαγωγή

Η συνεισφορά της αιολικής ενέργειας στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι καθοριστική, τόσο σε παγκόσμιο, όσο και σε εθνικό – τοπικό επίπεδο. Η ραγδαία αύξηση της αιολικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο τα τελευταία 20 χρόνια έχει συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην απανθρακοποίηση του ενεργειακού μίγματος και στην κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, ενώ ιδιαίτερα στην Ελλάδα συντέλεσε και στην απεξάρτηση της χώρας από το λιγνίτη.

Όπως όμως ισχύει για κάθε δραστηριότητα, έτσι και η αιολική ενέργεια προκαλεί περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες πρέπει να αποτιμώνται και να λαμβάνονται υπόψιν σε κάθε ενεργειακό, περιβαλλοντικό και χωροταξικό σχεδιασμό. Οι επιπτώσεις αυτές γίνονται όλο και μεγαλύτερες αλλά και πιο αισθητές όσο μεγαλώνει το ποσοστό της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα της χώρας και τα αιολικά πάρκα επεκτείνονται χωρικά σε κάθε άκρη της Ελλάδας, περιλαμβανομένων και περιοχών με ειδική περιβαλλοντική ευαισθησία και καθεστώς προστασίας. Παράλληλα, οι εν λόγω περιβαλλοντικές επιπτώσεις μελετώνται όλο και πιο συστηματικά σε διεθνές επίπεδο τα τελευταία 15 χρόνια με αποτέλεσμα να έχει συσσωρευτεί νέα γνώση και πολλά καινούρια επιστημονικά δεδομένα, τα οποία πρέπει να πλέον να συνηγορούνται στις σχετικές αδειοδοτήσεις και μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Σκοπός του παρόντος κειμένου είναι α. να καταγράψει και να σχολιάσει τις σημαντικές αλλαγές που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια στο σχεδιασμό και την κατασκευή των ανεμογεννητριών και των αιολικών πάρκων, και β. να αποτυπώσει τη συσσωρευμένη εμπειρία που πλέον υπάρχει σε σχέση με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και την αλληλεπίδραση των αιολικών πάρκων με το φυσικό περιβάλλον.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, το κείμενο περιλαμβάνει τα ακόλουθα κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εξέλιξη των αιολικών πάρκων στην Ελλάδα καθώς και οι βασικές αλλαγές στο σχεδιασμό και την κατασκευή των ανεμογεννητριών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς για όλα τα περιβαλλοντικά ζητήματα και εξηγούνται οι έννοιες της τριπλής περιβαλλοντικής κρίσης και των πλανητικών ορίων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των αιολικών πάρκων, με βάση αναλύσεις κύκλου ζωής, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σημαντικές αβεβαιότητες που εμπεριέχονται στις προσπάθειες υπολογισμού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται σε ορισμένα βασικά ζητήματα σε σχέση με τη βιοποικιλότητα και το έκτο στα προβλήματα ανακύκλωσης των ανεμογεννητριών, ενώ το κείμενο ολοκληρώνεται με μια σειρά συμπερασμάτων.

1. Η εξέλιξη των αιολικών πάρκων

Στην Ελλάδα η περίοδος 2010-2023 είναι μια περίοδος υπερεντατικής ανάπτυξης της βιομηχανίας των αιολικών πάρκων. Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΛΕΤΑΕΝ^a, κατά την περίοδο αυτή:

- Η εγκατεστημένη ισχύς τετραπλασιάστηκε, ξεκινώντας από τα 1.341 και φτάνοντας στα 5.226 MW.
- Τοποθετήθηκαν 1.827 νέες ανεμογεννήτριες (έναντι 1.155 την περίοδο 1992-2009), δηλαδή το 61,2% των ανεμογεννητριών που λειτουργούν στη χώρα.
- Η μέση διάμετρος του ρότορα των ανεμογεννητριών, στοιχείο που παίζει σημαντικό ρόλο στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη λειτουργία αιολικών πάρκων, αυξήθηκε από λίγο πάνω από τα 77 στα 117 μέτρα, δηλαδή σχεδόν κατά 50% σχεδόν.
- Η μέση ισχύς ανά ανεμογεννήτρια ανέβηκε από 1,6 στα 3,5 MW.

Πρόκειται κυριολεκτικά για μια περίοδο που μεταμόρφωσε ριζικά το τοπίο της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, και οδήγησε σε συνεισφορά του 21,5% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας για το 2022^b.

Ο πολλαπλασιασμός των αιολικών πάρκων, όπως δείχνουν τα παραπάνω στοιχεία, συμβαδίζει με μια σημαντική αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών αλλά και των αιολικών πάρκων.

Η σημαντική αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών αποτελεί παγκόσμια τάση, που συνοδεύεται και από μια σειρά επιμέρους αλλαγές στο σχεδιασμό τους. Οι τάσεις δείχνουν^c ότι οι ανεμογεννήτριες του μέλλοντος είναι πιθανό να είναι κάθετες και σύγχρονες, με το ύψος της τουρμπίνας μεγαλύτερο από 194 μέτρα και τη διάμετρο του ρότορα μεγαλύτερη από 164 μέτρα και ότι η ισχύς μιας ανεμογεννήτριας θα υπερβαίνει τα 10 MW. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στις λεπίδες θα είναι νανοϋλικά με χαρακτηριστικά χαμηλής πυκνότητας και υψηλής αντοχής όπως το γραφένιο. Οι πύργοι ανεμογεννητριών θα διαθέτουν ένα υβριδικό υλικό, που θα συνδυάζει χάλυβα και σκυρόδεμα.

Η σημαντική αύξηση του μεγέθους των πτερυγίων αναγκαστικά οδηγεί σε πρόσθετες δυσκολίες μεταφοράς και τροφοδοτεί μια τάση επανασχεδιασμού των πτερυγίων σε επιμέρους κομμάτια που θα ενώνονται επί τόπου στα αιολικά πάρκα. Ταυτόχρονα,

^a https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2024/01/2024-01-18-2023-HWEA_Statistics-Greece.pdf

^b Παναγιώτης Παπασταματίου. Αιολικά πάρκα - Το ψευτοδίλημμα: «Ενεργειακή ανεξαρτησία, φθινή ενέργεια και προστασία του κλίματος» vs «Ψηλά βουνά και Natura». *ENERGY PRESS* <https://energypress.gr/news/aiolika-parka-pseytodilimma-energeiaki-anexartisia-fthini-energeia-kai-prostasia-toy-klimatos> (2023).

^c De Falani, S. Y. A., González, M. O. A., Barreto, F. M., De Toledo, J. C. & Torkomian, A. L. V. Trends in the technological development of wind energy generation. *International Journal of Technology Management & Sustainable Development* **19**, 43–68 (2020)

δρομολογούνται περαιτέρω βελτιώσεις στην αεροδυναμική των πτερυγίων του ρότορα, τον ενεργό έλεγχο του συστήματος περιστροφής του πτερυγίου του ρότορα και τα αεροδυναμικά φρένα που θα οδηγήσουν σε αυξημένη απόδοση παραγωγής ενέργειας. Οι σχεδιαζόμενες βελτιώσεις στη συντήρηση του συστήματος και η έγκαιρη διάγνωση βλαβών που σχετίζονται με τη μετάδοση και την ισχύ και οι ζημιές στην επιφάνεια των πτερυγίων θα μειώσουν το χρόνο διακοπής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και θα αυξήσουν την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα του συστήματος^d.

Καθώς τα συστήματα ελέγχου γίνονται πιο εξελιγμένα, επιτρέποντας τον έλεγχο, την παρακολούθηση και τη διαχείριση των ανεμογεννητριών σε πραγματικό χρόνο, αναμένεται η αύξηση της ισχύος, οι διαστάσεις και οι βελτιώσεις, που περιλαμβάνουν έξυπνα πτερύγια ρότορα και βελτιώσεις στην αεροδυναμική των πτερυγίων, καθώς και η επέκταση του εύρους λειτουργίας του αιολικού πάρκου θα συμβάλλουν σε υψηλότερη απόδοση των αιολικών πάρκων. Κάτι τέτοιο θα καταστήσει επίσης δυνατή την οικονομική εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε περιοχές με κάπως χαμηλότερες μέσες ταχύτητες ανέμου.

Οι παραπάνω αλλαγές μειώνουν το μοναδιαίο περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ανεμογεννητριών (ανηγμένο ανά MW εγκατεστημένης ισχύος), σε αρκετές περιπτώσεις ως και 20%. Ωστόσο η μείωση του μοναδιαίου περιβαλλοντικού αποτυπώματος αντισταθμίζεται από την εκθετική αύξηση των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών^e. Έτσι για παράδειγμα, αν όλες οι νέες πρόσθετες ανεμογεννήτριες έχουν μοναδιαίο περιβαλλοντικό αποτύπωμα μειωμένο κατά 20% σε σχέση με τις παλιές (παραδοχή ευνοϊκή για τις ανεμογεννήτριες που τοποθετήθηκαν ως το 2014), ο τετραπλασιασμός της εγκατεστημένης ισχύος μεταξύ 2010-2023 σημαίνει ότι το νέο συνολικό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα αυξήθηκε κατά $4 \times 0,8 = 3,2$ δηλαδή 320%.

Το ίδιο ισχύει και για το εδαφικό αποτύπωμα των αιολικών πάρκων, το οποίο μεγαλώνει συστηματικά και σε μόνιμη βάση θέτοντας τις βάσεις για σοβαρές σωρευτικές επιπτώσεις και δημιουργώντας σημαντικό ανταγωνισμό με άλλες εναλλακτικές χρήσεις γης^f.

^d Bošnjaković, M., Katinić, M., Santa, R. & Marić, D. Wind Turbine Technology Trends. *Applied Sciences* **12**, 8653 (2022)

^e Besseau, R., Sacchi, R., Blanc, I. & Pérez-López, P. Past, present and future environmental footprint of the Danish wind turbine fleet with LCA_WIND_DK, an online interactive platform. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **108**, 274–288 (2019)

^f Harrison-Atlas, D., Lopez, A. & Lantz, E. Dynamic land use implications of rapidly expanding and evolving wind power deployment. *Environ. Res. Lett.* **17**, 044064 (2022)

2. Τριπλή περιβαλλοντική κρίση και πλανητικά όρια

Το ιστορικό πλαίσιο του αιώνα μας προσδιορίζεται από την τριπλή περιβαλλοντική κρίση^β, δηλαδή την κλιματική κρίση, την απώλεια βιοποικιλότητας και την αυξανόμενη ρύπανση. Αυτές οι τρεις διαστάσεις της τριπλής περιβαλλοντικής κρίσης είναι αλληλένδετες και αλληλοτροφοδοτούμενες και σε άμεση συσχέτιση με την διαρκή οικονομική μεγέθυνση και την εξάρτηση της οικονομίας από τα ορυκτά καύσιμα. Το πλαίσιο της τριπλής περιβαλλοντικής κρίσης έχει επίσημα υιοθετηθεί:

- από τον ΟΗΕ και ειδικότερα το Πρόγραμμα Περιβάλλον του ΟΗΕ (UNEP)^h.
- από την ΕΕⁱ.
- από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας^j.

Παρά την ευρεία συμφωνία για την τριπλή περιβαλλοντική κρίση, σε πολλές περιπτώσεις η τρέχουσα συζήτηση σε πολιτικό και οικονομικό επίπεδο εστιάζει, σχεδόν αποκλειστικά, στη διάσταση της κλιματικής κρίσης, για μια σειρά από λόγους. Ωστόσο η τριπλή περιβαλλοντική κρίση πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ενιαία και αδιάσπαστη πρόκληση για τη βιωσιμότητα των κοινωνιών μας. Στη δημόσια συζήτηση, η σημασία της απώλειας βιοποικιλότητας και της ρύπανσης είναι σημαντικά υποβαθμισμένες σε σχέση με την κλιματική αλλαγή.

Ας δούμε μερικά στοιχεία σχετικά με την απώλεια της βιοποικιλότητας και τη ρύπανση, σε παγκόσμια κλίμακα. Ως βιοποικιλότητα ορίζεται η ποικιλία των έμβιων όντων στον πλανήτη γη. Περιλαμβάνει τον αριθμό των ειδών, τη γενετική ποικιλότητα και την αλληλεπίδραση αυτών των μορφών ζωής μέσα σε σύνθετα οικοσυστήματα. Ορισμένα στοιχεία είναι αποκαλυπτικά για το βάθος του προβλήματος που αντιμετωπίζουμε. Σύμφωνα με τη σχετική έκθεση^k του ΟΗΕ που δημοσιεύτηκε το 2019, έως και ένα εκατομμύριο είδη πανίδας και χλωρίδας αναμένεται να απειληθούν με εξαφάνιση, από τα 8 εκατομμύρια που υπολογίζεται ότι υπάρχουν στον πλανήτη, πολλά εκ των οποίων εντός των επόμενων δεκαετιών. Τα είδη που απειλούνται με αφανισμό περιλαμβάνουν το 40% των αμφίβιων ειδών, το 35% των θαλάσσιων θηλαστικών και το ένα τρίτο όλων των κοραλλιογενών υφάλων. Πάνω από ένα τρίτο (1/3) των αλιευμάτων έχουν πέσει κάτω από τα ελάχιστα επίπεδα αναπαραγωγής λόγω υπεραλίευσης και βρίσκονται σε πορεία εξάλειψης. Τα τρία τέταρτα (3/4) του χερσαίου περιβάλλοντος και σχεδόν τα δύο τρίτα (2/3) του θαλάσσιου έχουν υποστεί σοβαρές αλλαγές από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Το ένα τρίτο (1/3) της γης και τα τρία τέταρτα (3/4) του καθαρού νερού χρησιμοποιούνται ήδη για αγροτικές καλλιέργειες και κτηνοτροφία. Οι αστικές περιοχές έχουν υπερδιπλασιαστεί σε σχέση με το 1992. Η χρήση αγροχημικών στις καλλιέργειες έχει δημιουργήσει πάνω από 400 νεκρές παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο με συνολική έκταση 245.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων, σχεδόν διπλάσια της Ελλάδας.

^β What is the Triple Planetary Crisis? 1.5 Degrees A Climate Action Blog <https://unfccc.int/blog/what-is-the-triple-planetary-crisis> (2022)

^h <https://www.unep.org/news-and-stories/speech/towards-unea-6-multilateral-solutions-triple-planetary-crisis>

ⁱ https://environment.ec.europa.eu/international-cooperation_en

^j <https://www.who.int/poland/multi-media/details/tackling-the--triple-environmental-crisis--and-building-forward-from-the-covid-19-pandemic>

^k IPBES. *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2019/05/nature-decline-unprecedented-report/> (2019)

Αναφορικά με τη ρύπανση, στην πλέον έγκυρη πρόσφατη σχετική μελέτη¹, οι συνολικές απώλειες ζώων από τη ρύπανση όλων των μορφών στον κόσμο εκτιμώνται σε 9 εκατομμύρια πρόωρους θανάτους το 2019, με τους θανάτους που οφείλονται στις επιπτώσεις της εκβιομηχάνισης και της αστικοποίησης να έχουν αυξηθεί κατά 66% σε σχέση με το 2000. Σχεδόν 6,5 εκατομμύρια θάνατοι οφείλονται στην αέρια ρύπανση και 1,8 εκατομμύρια θάνατοι σε διάφορες μορφές χημικής ρύπανσης, ενώ το 90% όλων των θανάτων εντοπίζεται σε φτωχές και αναπτυσσόμενες χώρες. Επιπλέον, οι απώλειες ζώων λόγω ρύπανσης είναι 3 φορές περισσότερες από τις απώλειες που οφείλονται στην πείνα και τα ναρκωτικά, και λίγο μεγαλύτερες από τις απώλειες που σχετίζονται με το κάπνισμα.

Η σταδιακή συνειδητοποίηση του ενιαίου και αδιάσπαστου της τριπλής περιβαλλοντικής κρίσης, οδήγησε σε νέες επιστημονικές προσεγγίσεις σχετικά με τον τρόπο προσέγγισης της βιωσιμότητας των κοινωνιών μας. Η πλέον ολοκληρωμένη προσέγγιση θεωρείται η προσέγγιση των πλανητικών ορίων.

Τι είναι με απλά λόγια τα πλανητικά όρια (planetary boundaries)^m; Τα πλανητικά όρια είναι μια έννοια που δημιουργήθηκε από μια ομάδα επιστημόνων του περίφημου Ινστιτούτου Ανθεκτικότητας της Στοκχόλμης το 2009 και αναφέρονται σε μια σειρά από παραμέτρους που η υπέρβαση τους οδηγεί σε αναντίστροφες αλλαγές στον πλανήτη και εκθέτει σε αναντίστροφους κινδύνους τη βιωσιμότητα των ανθρώπινων κοινωνιών. Αυτά τα όρια αναφέρονται και υπολογίζονται σε παγκόσμια αλλά και τοπική κλίμακα και περιλαμβάνουν παραμέτρους που αναφέρονται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπων, της τεχνολογίας και του περιβάλλοντος. Θα μπορούσε κάποιος να πει με απλά λόγια ότι τα πλανητικά όρια (ή πλανητικοί περιορισμοί) δημιουργούν μια ζώνη εντός της οποίας είναι εφικτή η ανθρώπινη ευημερία χωρίς την καταστροφή των οικοσυστημάτων στα οποία στηρίζεται η ζωή.

Τα Πλανητικά Όρια αναφέρονται στις ακόλουθες διεργασίες του πλανητικού οικοσυστήματος:

- Κλιματική Αλλαγή
- Ακεραιότητα Βιόσφαιρας που περιλαμβάνει τη γενετική ποικιλότητα-βιοποικιλότητα και τη λειτουργική ποικιλότητα
- Βιογεωχημικές Ροές που αφορούν τον κύκλο του αζώτου (N) και του φωσφόρου (P)ⁿ
- Αλλαγή Χρήσεων Γης
- Οξίνιση Ωκεανών
- Ατμοσφαιρικό Φορτίο Αερολυμάτων
- Καταστροφή της στοιβάδας του Όζοντος
- Χρήση Γλυκού Νερού
- Χημική Ρύπανση

¹ Fuller, R. *et al.* Pollution and health: a progress update. *The Lancet Planetary Health* **6**, e535–e547 (2022)

^m Rockström, J. *et al.* Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society* **14**, (2009)

ⁿ Το συγκεκριμένο όριο σχετίζεται άμεσα με τη ρύπανση που προκαλεί η εντατική χρήση λιπασμάτων

Σύμφωνα με τα πλέον πρόσφατα στοιχεία^ο, οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν ήδη παραβιάσει έξι από τα εννιά πλανητικά όρια, σε παγκόσμια κλίμακα και πιο συγκεκριμένα τα όρια της Κλιματικής Αλλαγής, της Απώλειας της Ακεραιότητας της Βιόσφαιρας, της Αλλαγής Χρήσεων Γης, της χρήσης Γλυκού Νερού, της Χημικής Ρύπανσης και των Βιογεωχημικών Ροών αζώτου και φωσφόρου. Τα πρώτα δύο θεωρούνται τα πλέον θεμελιώδη για τη διατήρηση της ζωής στη γη όπως την ξέρουμε και οποιαδήποτε σημαντική αλλαγή σε αυτά θα οδηγήσει το γήινο οικοσύστημα σε μία νέα κατάσταση ισορροπίας.

Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος εκτιμά^ρ ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση από μόνη της έχει ξεπεράσει τρία από αυτά τα όρια και πιο συγκεκριμένα τα δύο όρια των βιογεωχημικών ροών αζώτου και φωσφόρου αλλά και το όριο των χρήσεων γης.

Σύμφωνα με μια σημαντική επιστημονική μελέτη^ρ του 2018, που δημοσιεύτηκε στο πολύ έγκυρο Nature, η Ελλάδα έχει ξεπεράσει επτά πλανητικά όρια, και πιο συγκεκριμένα τα ακόλουθα:

ΠΛΑΝΗΤΙΚΑ ΟΡΙΑ	ΟΡΙΟ	ΕΠΙΔΟΣΗ ΕΛΛΑΔΑΣ
Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα	1,6 τόνοι διοξειδίου ανά κεφαλή ετησίως	13,3 τόνοι
Παραγωγή φωσφόρου	0,9 κιλά ανά κεφαλή ετησίως	4,4 κιλά
Παραγωγή αζώτου	8,9 κιλά ανά κεφαλή ετησίως	51,6 κιλά
Κατανάλωση γλυκού νερού επιφανειακού και υπόγειου	574 κυβικά μέτρα ανά κεφαλή ετησίως	884 κυβικά μέτρα
Αλλαγές στη χρήση της γης	2,6 τόνοι ισοδυνάμου άνθρακα ανά κεφαλή ετησίως	2,9 τόνοι
Οικολογικό απότύπωμα	1,7 εκτάρια ανά κεφαλή ετησίως	3,9 εκτάρια
Αποτύπωμα υλικών	7,2 τόνοι ανά άτομο ετησίως	35,6 τόνοι

Οι αλλαγές στις χρήσεις γης συνεισφέρουν άμεσα στη μείωση της βιοποικιλότητας και τον περιορισμό των δυνατοτήτων φυσικής αναπαραγωγής των οικοσυστημάτων. Σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή που συνεισφέρει δραστικά στην απώλεια της βιοποικιλότητας, και ειδικά στην Ελλάδα που θεωρείται μια από τις πλέον ευάλωτες περιοχές της Ευρώπης^ρ, οι αλλαγές των χρήσεων γης και οι απώλειες ενδιαιτημάτων μειώνουν καθοριστικά την ικανότητα των οργανισμών να μετατοπίσουν την εξάπλωση τους και έτσι να αποκριθούν στις μεταβολές της κλιματικής αλλαγής.

^ο Richardson, K. *et al.* Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci. Adv.* **9**, eadh2458 (2023)

^ρ European Environment Agency. & Federal Office for the Environment FOEN. *Is Europe Living within the Limits of Our Planet?: An Assessment of Europe's Environmental Footprints in Relation to Planetary Boundaries.* (Publications Office, LU, 2020)

^ρ O'Neill, D. W., Fanning, A. L., Lamb, W. F. & Steinberger, J. K. A good life for all within planetary boundaries. *Nat Sustain* **1**, 88–95 (2018)

^ρ Μουσείο Γουλανδρή – Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων, 2011, Η βιοποικιλότητα της Ελλάδας – οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής <http://repository.biodiversity-info.gr/handle/11340/1959>

3. Περιβαλλοντικό αποτύπωμα και ανάλυση κύκλου ζωής ανεμογεννητριών

Όλες οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας επηρεάζουν το περιβάλλον και τα οικοσυστήματα στη Γη. Πιο συγκεκριμένα, τα αιολικά πάρκα δεν περιορίζονται πλέον σε παράκτιες, ορεινές, ερημικές ή άνυδρες περιοχές, αντίθετα σε πολλές περιπτώσεις βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση και αλληλεπίδραση με κοινότητες και οικισμούς. Έτσι η σημασία της συστηματικής και ενδελεχούς μελέτης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι κρίσιμος όρος για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των αιολικών πάρκων, αλλά και των τοπικών οικοσυστημάτων και κοινοτήτων. Η επίδραση των αιολικών πάρκων ποικίλλει ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, τον τύπο και το μέγεθος του αιολικού πάρκου, τα τοπικά οικοσυστήματα, την πρότερη κατάσταση τοπικά, την ύπαρξη δικτύων υποδομών και διασύνδεσης, αλλά και από τις συγκεκριμένες συνθήκες ανέμου που καθορίζουν τη συνολική απόδοση του αιολικού πάρκου.

Η αυξημένη περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση των κοινωνιών και των κυβερνήσεων καθώς οι αυξανόμενες ανησυχίες τους για την κλιματική αλλαγή διευκόλυναν αποφασιστικά την πρόοδο στην αιολική ενέργεια και την εξάπλωση των αιολικών πάρκων. **Με τη μαζική επέκταση όμως των ΑΠΕ, τόσο με τα φωτοβολταϊκά όσο και με τα αιολικά πάρκα, η Ελλάδα φτάνει σταδιακά σε ένα σημείο καμπής. Αφενός είναι απαραίτητο να προχωρήσει η μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και να μειωθούν δραστικά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αφετέρου, όμως, είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί προσεκτικά το πλαίσιο των ΑΠΕ και ο βαθμός επέκτασης αυτών έτσι ώστε να μην προκαλέσουν επιπρόσθετη ζημιά στα οικοσυστήματα που ήδη απειλούνται σοβαρά από την κλιματική αλλαγή.**

Κατά την εξέταση της σκοπιμότητας εγκατάστασης ανεμογεννητριών, η συντριπτική πλειοψηφία των δημόσιων τοποθετήσεων περιορίζεται αποκλειστικά στα αναμενόμενα ενεργειακά οφέλη και ειδικότερα στα οφέλη που θα προκύψουν σε σχέση με την κλιματική αλλαγή και την αναμενόμενη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (σε σχέση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων). **Ωστόσο, αυτός ο περιορισμός της συζήτησης στο θέμα της κλιματικής αλλαγής είναι εμπόδιο σε μια ολοκληρωμένη αποτίμηση του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος (ΠΑ) και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ανεμογεννητριών διότι υποβαθμίζει τις δύο άλλες συνιστώσες της τριπλής περιβαλλοντικής κρίσης, δηλαδή την απώλεια βιοποικιλότητας και την πάσης μορφής ρύπανση. Με τη συσσώρευση εμπειριών από τις πραγματικές επιπτώσεις αιολικών πάρκων κατά την τελευταία δεκαετία και την πρόοδο της επιστήμης σε σχέση με την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) και τον υπολογισμό του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος, είμαστε πλέον σε πολύ καλύτερη θέση και μπορούμε να έχουμε μια ολοκληρωμένη αποτίμηση.**

Η ΑΚΖ χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση του ΠΑ της παραγωγής αιολικής ενέργειας. Τα βασικά στάδια στα οποία μπορεί να αναλυθεί ο κύκλος ζωής μιας ανεμογεννήτριας, λαμβάνοντας υπόψη και τις θεωρήσεις μελετών ΑΚΖ που έχουν εκπονηθεί, είναι η εξόρυξη πρώτων υλών, η κατεργασία πρώτων υλών, η παραγωγή υλικών και προϊόντων, η κατασκευή της ανεμογεννήτριας, η κυρίως λειτουργία και συντήρηση της ανεμογεννήτριας και το τέλος του κύκλου ζωής, ενώ μεταξύ των σταδίων αυτών πραγματοποιείται η μεταφορά των κάθε φορά απαιτούμενων πόρων. Ανάλογα με τον σκοπό, τη μεθοδολογία και τα διαθέσιμα δεδομένα διαφορετικών μελετών, παρατηρούνται διαφορές ως προς τα στάδια κύκλου ζωής που συνθέτουν τελικά το εξεταζόμενο κάθε φορά

σύστημα, κυρίως μέσω σύμπτυξης των προαναφερθέντων σταδίων ή παράληψης κάποιων από αυτά. Σε κάθε περίπτωση, η κατασκευή της ανεμογεννήτριας είναι το πλέον κοινό μελετώμενο στάδιο, ενώ στην πλειοψηφία των μελετών συμπεριλαμβάνονται και τα στάδια λειτουργίας-συντήρησης και μεταφοράς. Αντιθέτως, αρκετές διαφορές παρατηρούνται στην προσέγγιση του τέλους ζωής των ανεμογεννητριών, ιδίως όσον αφορά στην τελική διαχείριση των υλικών και αποβλήτων⁵.

Η σύνοψη και, συνεπώς, αξιολόγηση της ποιοτικής και ποσοτικής συμμετοχής των διαφορετικών σταδίων του κύκλου ζωής μιας ανεμογεννήτριας στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα αυτής δυσχεραίνεται από την προαναφερθείσα έλλειψη ενιαίας μοντελοποίησης των σταδίων μεταξύ των μελετών ή ακόμα και της ελλιπούς περιγραφής των διαδικασιών που περιλαμβάνονται σε κάθε στάδιο από ορισμένες μελέτες. Για τις ανάγκες τις παρούσας ενότητας, ο κύκλος ζωής μιας ανεμογεννήτριας διακρίνεται σε τέσσερις φάσεις: 1) την παραγωγή υλικών και δομικών στοιχείων, 2) τη μεταφορά υλικών και την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας, 3) τη λειτουργία και συντήρηση της μονάδας, 4) το τέλος κύκλου ζωής της ανεμογεννήτριας.

Παραγωγή

Το στάδιο της παραγωγής συνήθως περιλαμβάνει τις εργασίες από την εξόρυξη και κατεργασία των πρώτων υλών, μέχρι και την παραγωγή των ενδιάμεσων προϊόντων και των δομικών μερών που αποτελούν μια ανεμογεννήτρια και αποτελεί το στάδιο με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σε μια σημαντική μελέτη αναφοράς[†], εφαρμόστηκε AKZ για ένα αιολικό πάρκο αποτελούμενο από 200 ανεμογεννήτριες GAMEESA, των 2 MW, διερευνώντας την επίπτωσή τους σε 12 κατηγορίες επιπτώσεων και κατέληξαν πως το στάδιο της παραγωγής είχε το δυσμενέστερο αποτύπωμα σε όλες τις κατηγορίες με ποσοστό άνω του 60% στο σύνολο των κατηγοριών και άνω του 90% σε 7 από τις 12 κατηγορίες. Σε μια άλλη μελέτη[‡] διερευνήθηκε το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αιολικών πάρκων σε 15 κατηγορίες επιπτώσεων, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές θέσεις εγκατάστασης και διαφορετικές τιμές ισχύος ανεμογεννήτριας. Στην εν λόγω μελέτη, το στάδιο εξόρυξης και κατεργασίας των πρώτων υλών, το οποίο διαχωρίζεται από την παραγωγή των δομικών μερών της ανεμογεννήτριας, αναδεικνύεται ως το πλέον δυσμενές, με συμμετοχή 71,9% στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ενώ αν συνυπολογιστεί και το στάδιο της παραγωγής των στοιχείων της ανεμογεννήτριας, η συνολική συμμετοχή φτάνει στο 80,9%. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από την AKZ που εφαρμόστηκε[‡] για την αξιολόγηση του αποτυπώματος μιας εγκατάστασης αιολικής ενέργειας των 50MW, αποτελούμενης από ανεμογεννήτριες Vestas V100 των 2MW, αφού η φάση της παραγωγής υλικών και δομικών μερών βρέθηκε να έχει τις δυσμενέστερες επιπτώσεις στο σύνολο των 14 κατηγοριών επιπτώσεων που ελήφθησαν υπόψη.

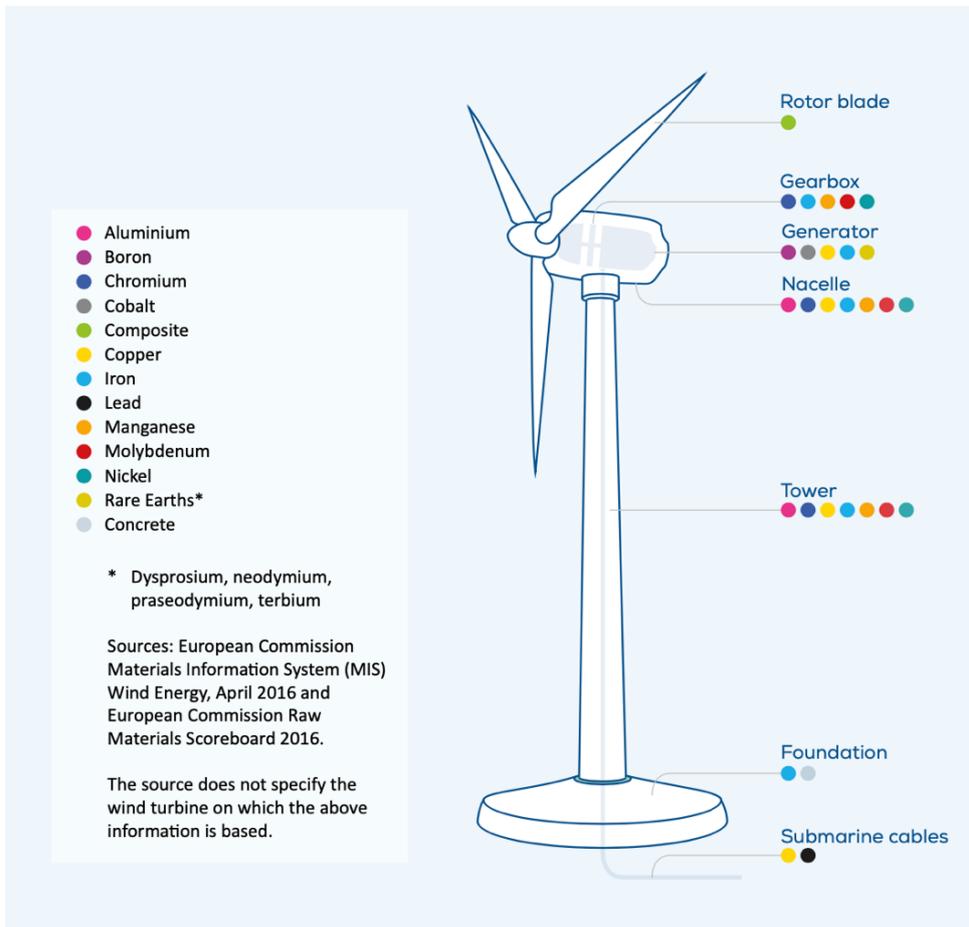
⁵ Arvesen, A. & Hertwich, E. G. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**, 5994–6006 (2012)

[†] Alsaleh, A. & Sattler, M. Comprehensive life cycle assessment of large wind turbines in the US. *Clean Techn Environ Policy* **21**, 887–903 (2019)

[‡] Chipindula, J., Botlaguduru, V., Du, H., Kommalapati, R. & Huque, Z. Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas. *Sustainability* **10**, 2022 (2018)

[‡] Garrett Peter & Priyanka Razdan. LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ELECTRICITY PRODUCTION FROM AN ONSHORE V112-3.3 MW WIND PLANT. VESTAS 129 (2015)

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα υλικά κατασκευής των ανεμογεννητριών που εξηγούν το μεγάλο περιβαλλοντικό αποτύπωμα που έχουν κατά τη διαδικασία παραγωγής αυτών^W.



Μεταφορά υλικών και εγκατάσταση

Αναφορικά με το επίπεδο συμμετοχής των σταδίων μεταφοράς προϊόντων, υλικών, εξοπλισμού και εγκατάστασης στο περιβαλλοντικό της αποτύπωμα μιας ανεμογεννήτριας εντοπίζονται αρκετές διαφοροποιήσεις. Η συγκριτική αξιολόγηση ως προς τις περιβαλλοντικές πιέσεις που ασκούν δεν εμφανίζει το βαθμό σύγκλισης που εντοπίζεται σχετικά με την περίπτωση του σταδίου της παραγωγής, γεγονός που πιθανώς συνδέεται, μεταξύ άλλων, με το είδος και τον αριθμό επιπτώσεων που λαμβάνονται υπόψη.

Το στάδιο της μεταφοράς φαίνεται πως αξιολογείται ως μικρής ή και αμελητέας σημασίας σε αρκετές περιπτώσεις, ως προς το μέγεθος περιβαλλοντικού του αποτυπώματος. Σε μια προσέγγιση[†] η μεταφορά κατατάσσεται προτελευταία μεταξύ όλων των εξεταζόμενων σταδίων με κριτήριο τη συμμετοχή της συνολικά στις μελετώμενες κατηγορίες επιπτώσεων, ενώ η κατηγορία που επηρέασε περισσότερο ήταν η δημιουργία αιθαλομίχλης, σε ποσοστό 5.9%. Αντιθέτως, σε μια άλλη μελέτη^ν η συμμετοχή του σταδίου της μεταφοράς αξιολογείται ως αρκετά σημαντική, καθώς το αντίστοιχα ποσοστά συνεισφοράς κυμαίνονται από 1% έως και 40%, ανάλογα με την εξεταζόμενη κατηγορία επίπτωσης.

^W Από τη μελέτη «Decommissioning of Onshore Wind Turbines», WIND EUROPE, 2021

Είναι πάντως σαφές ότι τα καθοριστικά στοιχεία, σχετικά με τη συνεισφορά της μεταφοράς, είναι:

- η απόσταση μεταφοράς των βασικών υλικών και εξαρτημάτων
- ο τρόπος μεταφοράς
- ειδικότερα για την Ελλάδα, καθοριστικής σημασίας είναι η πρότερη ύπαρξη ή η επί σκοπού διάνοιξη κατάλληλων οδικών δικτύων καθώς και η έκταση αυτών

Σε αρκετές περιπτώσεις, ήσσονος σημασίας φαίνεται να θεωρείται και ο βαθμός επίδρασης της εγκατάστασης. Μια πιο πρόσφατη μελέτη^u προσδιορίζει το ποσοστό συμμετοχής της εγκατάστασης στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα μεταξύ 1% και 6%, υποστηρίζοντας το εν λόγω επιχείρημα. Σε άλλη μελέτη εντοπίζεται σημαντική διαφωνία^t καθώς η εγκατάσταση κατατάσσεται δεύτερη ως προς τη συνολική της συμμετοχή στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του εξεταζόμενου συστήματος, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα στάδια.

Λειτουργία και συντήρηση

Παρόμοιες είναι και οι παρατηρήσεις σχετικά με τη λειτουργία και συντήρηση μιας μονάδας παραγωγής αιολικής ενέργειας. Σε πολλές περιπτώσεις αυτή η φάση του κύκλου ζωής αξιολογείται ως αμελητέα. Σε άλλη περίπτωση κατατάσσεται τρίτη μεταξύ των πέντε σταδίων ζωής που εξετάζονται και προσδιορίζεται ως μέγιστο ποσοστό συμμετοχής το 6,8% στην κατηγορία των μη καρκινογόνων επιπτώσεων. Αντίθετα με τα προαναφερθέντα, **άλλοι επιστήμονες υπολογίζουν ένα κατά μέσο όρο περιβαλλοντικό αποτύπωμα λειτουργίας και συντήρησης ίσο με 13,8%, δηλαδή, το δεύτερο μεγαλύτερο μετά το στάδιο παραγωγής^u.**

Τέλος Κύκλου Ζωής

Το τέλος κύκλου ζωής, ως επί το πλείστον, διερευνάται από τη σκοπιά οφέλους που δύναται να προκύψει, μέσω της εναλλακτικής διαχείρισης υλικών κατά την παύση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, με συνηθέστερη μέθοδο την ανακύκλωση. Συνεπώς, οι μελέτες αφορούν κατά κύριο λόγο στο βαθμό μείωσης που επέρχεται στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα μιας μονάδας, στην περίπτωση που υιοθετηθεί η μέθοδος της ανακύκλωσης. Μάλιστα, από αυτή τη σκοπιά, το τέλος κύκλου ζωής φαίνεται να αξιολογείται ως ένα από τα σημαντικότερα στάδια του συνολικού κύκλου ζωής, καθώς μπορεί να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που κατά περίπτωση υπολογίζονται σε ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό.

Πολλές μελέτες υπολογίζουν σημαντική καθαρή μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ανεμογεννητριών^t (από 53 ως και 97%) αλλά και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου^x (κατά 55%), σε περίπτωση πλήρους ανακύκλωσης της ανεμογεννήτριας. Σημαντικό στοιχείο που πρέπει να κρατήσουμε είναι ότι τα παραπάνω προκύπτουν με την εξαιρετικά αμφίβολη, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, παραδοχή υψηλών ποσοστών ανακύκλωσης των υλικών των ανεμογεννητριών και με την προϋπόθεση ότι τα θεμέλια της ανεμογεννήτριας καλύπτονται με χώμα και παραμένουν εντός του εδάφους. Ενδεικτικά, η προβλεπόμενη διαχείριση ανά υλικό έχει ως εξής^u:

^x Ghenai, C. Life Cycle Analysis of Wind Turbine. in *Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment* (ed. Ghenai, C.) (InTech, 2012). doi:10.5772/29184

ΥΛΙΚΟ	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
Σίδηρος	90% ανακύκλωση
Fiberglass	100% ταφή
Λάδια	100% καύση
PVC	100% ταφή
Αλουμίνιο	55.1% ανακύκλωση
Χάλυβας	90% ανακύκλωση
Χαλκός	90% ανακύκλωση
Μπετόν	100% ταφή

Ωστόσο στην πραγματική ζωή, οι αποφάσεις σχετικά με τη διαχείριση των αιολικών πάρκων και των ανεμογεννητριών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους είναι πολύ πιο σύνθετες και οι πρακτικές που ακολουθούνται ποικίλλουν. Μια πρόσφατη εκτενής μελέτη^Υ εντόπισε σημαντική έλλειψη πληροφοριών και συστηματοποίησης των πρακτικών που ακολουθούνται στο τέλος του κύκλου ζωής των αιολικών πάρκων. Είναι χαρακτηριστικό ότι εκ των 2767 άρθρων που μελετήθηκαν, μόνο τα 26 κάλυπταν το φάσμα των απαιτούμενων πληροφοριών. **Οι μελετητές συμπέραναν ότι υπάρχει ένας σοβαρός περιορισμός στα πραγματικά δεδομένα σχετικά με τη διαχείριση των αιολικών πάρκων στο τέλος του κύκλου ζωής αυτών και ότι οι περισσότερες σχετικές μελέτες γίνονται σε αμιγώς θεωρητικό επίπεδο.**

Το στοιχείο αυτό αναμφίβολα ενισχύεται από:

- Τη μηδαμινή σημασία που δίνεται από τις ΜΠΕ στο κομμάτι της διαχείρισης των αιολικών πάρκων μετά το τέλος του κύκλου ζωής αυτών (στην πράξη 1-2 σελίδες με γενικότητες και χωρίς καμία δέσμευση)
- Τη μετατόπιση στο μέλλον των δεσμευτικών απαιτήσεων σχετικά με τη διαχείριση των αιολικών πάρκων μετά το τέλος του κύκλου ζωής αυτών και στο επίπεδο της έκδοσης ΑΕΠΟ. Χαρακτηριστικά, οι φράσεις που χρησιμοποιούνται είναι ότι «τα σχετικά με τις εργασίες κατά την παύση λειτουργίας θέματα θα συγκεκριμενοποιούνται σε Τεχνική Περιβαλλοντική Μελέτη (ΤΕΠΕΜ) την οποία ο κύριος του έργου οφείλει να εκπονήσει και να υποβάλλει αυτή προς έγκριση, το αργότερο ένα εξάμηνο προ της παύσης λειτουργίας του συνόλου ή μέρους του έργου, στην αρμόδια για την περιβαλλοντική αδειοδότησή του Υπηρεσία». Άλλο παράδειγμα είναι ότι «για την αποκατάσταση του περιβάλλοντος θα συνταχθεί ειδική μελέτη αποκατάστασης η οποία θα θεωρηθεί και θα εγκριθεί από τις αρμόδιες Δασικές Υπηρεσίες».

Ενεργειακή απόδοση και αποτελεσματικότητα

Η επισκόπηση υφιστάμενων μελετών ΑΚΖ μονάδων αιολικής ενέργειας εντοπίζει καταναλώσεις ενέργειας και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους) που κινούνται σε ένα ευρύ φάσμα τιμών, αφενός λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών κάθε εξεταζόμενου συστήματος, όπως ο Συντελεστής Αποτελεσματικότητας (ΣΑ), οι συνθήκες ανέμου, η διάρκεια ζωής και η τοποθεσία και αφετέρου εξαιτίας διαφορετικών προσεγγίσεων ή και αβεβαιοτήτων της εφαρμοζόμενης

^Υ Agra Neto, J. *et al.* Factors Influencing the Decision-Making Process at the End-of-Life Cycle of Onshore Wind Farms: A Systematic Review. *Energies* **17**, 848 (2024)

μεθοδολογίας, όπως τα στάδια κύκλου ζωής που λαμβάνονται υπόψη και το βάθος ανάλυσης. Σε πρόσφατη μελέτη εκτιμήθηκε ότι σε παγκόσμια κλίμακα 80% των ανεμογεννητριών έχουν σωστή χωροθέτηση σε σχέση με τον ΣΑ^z, επομένως το 20% (1 στις 5 ανεμογεννήτριες) έχει χωροθετηθεί σε ακατάλληλες τοποθεσίες.

Ο ΣΑ είναι καθοριστικό στοιχείο. Ο ΣΑ ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικά παραγόμενης ενέργειας στη διάρκεια μιας περιόδου (μήνας, έτος κλπ) προς τη θεωρητικά δυνάμενη να παραχθεί ενέργεια σε ποσοστό % (αγγλικά CF - Capacity Factor).

Όσο μικρότερος είναι αυτός, τόσο περισσότερο διάστημα απαιτείται για να αποσβεστεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μιας ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, ο ΣΑ προσδιορίζει και πόσο μεγάλη, σε εδαφική έκταση, πρέπει να είναι μια εγκατάσταση. **Επειδή ο ΣΑ είναι πάντα μικρότερος της μονάδας και συνήθως κινείται μεταξύ 25-45%, η ονομαστική δυναμικότητα των αιολικών πάρκων είναι πάντα πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μονάδων παραγωγής ενέργειας, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει και το εδαφικό τους αποτύπωμα.** Ειδικά στην Ελλάδα, ο ΣΑ είναι ακόμα μικρότερος και υπολογίζεται σε 25% για την ηπειρωτική χώρα και 30% για τα νησιά^{aa}.

Στα αιολικά πάρκα, για να επιτευχθεί ΣΑ που να προσεγγίζει τη μονάδα, για μια αιολική εγκατάσταση και ανάλογα και με τον σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας, θα έπρεπε να φυσάει άνεμος με ταχύτητες από 15 έως 25 m/sec συνεχώς για όλη τη διάρκεια του έτους, ημέρα και νύχτα. Ο πραγματικός ΣΑ όμως δεν εξαρτάται μόνο από το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό ή και από την ποιότητα της εγκατάστασης. Σε ένα δίκτυο με χαμηλή ευστάθεια ή και μέσα ελέγχου της ευστάθειας του, όπως το ελληνικό δίκτυο, σε περιπτώσεις υψηλής παραγωγής, αναντίστοιχης με τη ζήτηση και που η προσαρμογή στη ζήτηση δεν μπορεί να γίνει με τις μονάδες βάσης πρώτης ή και δεύτερης εφεδρείας, μια αιολική μονάδα θα βγει εκτός σύνδεσης από το δίκτυο και η ενέργεια που παράγει θα απορριφθεί (curtailment). Αντίθετα για να ξαναμπεί η αιολική μονάδα στο δίκτυο απαιτείται να απορροφήσει ενέργεια από το δίκτυο για να ενεργοποιηθούν τα κυκλώματα της και να συντονισθεί με τη συχνότητα του δικτύου. Συνοψίζοντας, ο ΣΑ για τα αιολικά συστήματα εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Από το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης της μονάδας, όπως μπορεί να εκφραστεί από τη μέση ταχύτητα ανέμου
- Από την ποιότητα της εγκατάστασης, όπως μπορεί να εκφραστεί από τον συντελεστή απωλειών
- Από το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένη και το ποσοστό απορριπτόμενης ενέργειας

Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΛΕΑΤΕΝ, το 2022 η πραγματική συνεισφορά των αιολικών πάρκων ήταν 10,7 TWh ή 10,7 εκατομμύρια KWh^a. Επίσης σύμφωνα με τα στατιστικά της ΕΛΕΑΤΕΝ, το 2022 η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων ήταν 4,683 TW. Επομένως, η θεωρητικά δυνάμενη παραγωγή ενέργειας ήταν $4.683 \times 365 \times 24 = 41.023$ TWh. Η

^z Vhristopher Jung & Dirk Schindler. Efficiency and effectiveness of global onshore wind energy utilization. *Energy Conversion and Management* **280**, 116803 (2023)

^{aa} *Country Overview | Greece Renewable Energy 2020-2030*. 46 <https://greendealflow.com/wp-content/uploads/2020/07/Greece.pdf> (2020)

πραγματική όμως παραγωγή ήταν 10,7 TWh, επομένως ο ΣΑ είναι $10,7/41,023 = 26\%$. Ο συγκεκριμένος ΣΑ είναι πολύ κοντά στον ευρωπαϊκό μέσο όρο του ΣΑ (μόνο για χερσαία αιολικά, χωρίς τα υπεράκτια), που σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της Wind Europe κινείται μεταξύ 22,5 και 25%.

Επομένως, με βάση τα στοιχεία του 2022, η πραγματική συνεισφορά των αιολικών πάρκων είναι:

- Σχεδόν το ένα τέταρτο (26%) της ονομαστικής εγκατεστημένης δυναμικότητας όλων των αιολικών πάρκων της χώρας
- Σχεδόν το ένα πέμπτο (21,5%) της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής.

Μια πρόσφατη ερευνητική μελέτη^{bb}, με δεδομένα ελληνικών αιολικών πάρκων, εντόπισε μια σειρά από σοβαρές δυσκολίες στον ακριβή υπολογισμό της απόδοσης των αιολικών πάρκων, τόσο όσον αφορά τη φάση υλοποίησης της επένδυσης όσο και σχετικά με τη λειτουργία τους. Η εν λόγω μελέτη συμπεραίνει ότι από τα εξεταζόμενα 13 αιολικά πάρκα στην Ελλάδα, μόνο 7 θεωρούνται αποδοτικά και μόνο 2 λειτουργούν στη βέλτιστη κλίμακα παραγωγής ενέργειας.

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν εκατοντάδες έρευνες και μελέτες που συγκρίνουν την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ σε σχέση με την παραγωγή από ορυκτά καύσιμα, λείπει ακόμη μια καλά καθορισμένη συγκριτική ανάλυση μεταξύ των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ΑΠΕ και των ορυκτών καυσίμων υπό παρόμοιες συνθήκες. **Μια πρόσφατη σημαντική σχετική μελέτη^{cc} απέδειξε ότι υπό ορισμένες προϋποθέσεις, οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις αιολικών πάρκων, όπως ποσοτικοποιούνται από ΑΚΖ, μπορεί και να είναι δυσμενέστερες από τις αντίστοιχες επιπτώσεις από σύγχρονες μονάδες παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Και αυτό διότι, με δεδομένο ΣΑ της τάξης του 25% για τα αιολικά πάρκα, μια εγκατάσταση αιολικής ενέργειας ονομαστικής ισχύος 1250 MW θα παράγει σχεδόν την ίδια ποσότητα ρεύματος με μια μονάδα 500 MW που καίει ορυκτά καύσιμα με ΣΑ της τάξης του 85%. Με τα λόγια των συγγραφέων «Διαπιστώθηκε ότι παρόλο που οι ανανεώσιμες μονάδες έχουν σχεδόν μηδενικές άμεσες εκπομπές, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας δεν είναι αμελητέος και, σε ορισμένες περιπτώσεις, (είναι) συγκρίσιμος ή και υψηλότερος από εκείνον των μονάδων ορυκτών καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Μεταξύ των παραγόντων που μπορούν να μειώσουν τις επιπτώσεις των αιολικών και ηλιακών εγκαταστάσεων είναι η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, η μεγαλύτερη ισχύς ισχύος και τα υψηλότερα ποσοστά ανακύκλωσης. Μια μονάδα με μεγαλύτερη δυναμικότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής παράγει μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας με χαμηλότερες σχετικές εκπομπές».**

Επιπλέον, πυκνώνουν οι ενδείξεις ότι, αν ληφθεί υπόψη η συνύπαρξη της αιολικής ενέργειας στα δίκτυα με ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, η πραγματική μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου λόγω των αιολικών πάρκων είναι σαφώς μικρότερη από την εκτιμώμενη σε τυπικές ΑΚΖ, σε σημείο που διακεκριμένοι ερευνητές διερωτώνται για

^{bb} Tsolas, I. E. Benchmarking Wind Farm Projects by Means of Series Two-Stage DEA. *Clean Technol.* **2**, 365–376 (2020)

^{cc} Torres, J. F. & Petrakopoulou, F. A Closer Look at the Environmental Impact of Solar and Wind Energy. *Global Challenges* **6**, 2200016 (2022)

τη βιωσιμότητα της συνύπαρξης^{dd}. Το πρόβλημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι η διαλείπουσα, μεταβλητή και χρονικά αβέβαιη παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες κάνει την ολοκλήρωση της στο ηλεκτρικό δίκτυο προβληματική και αυτόν επηρεάζει τόσο το πραγματικό κόστος της ενέργειας από τα αιολικά πάρκα, όσο και τις πραγματικές εκπομπές.

Υπάρχει επίσης ένα θέμα «κατάχρησης» των αιολικών πάρκων, όπως φαίνεται από τα στατιστικά της Γερμανίας. Το 2000, η Γερμανία είχε εγκατεστημένη ισχύ αιολικών πάρκων 121 GW και παράγαγε 577 TWh ενέργειας, ποσοστό 54% της θεωρητικής δυναμικότητας των αιολικών πάρκων. Το 2019, η εγκατεστημένη ισχύς του ήταν 80% υψηλότερη (218,1 GW) και η ηλεκτροπαραγωγή ήταν μόλις 5% περισσότερο (607 TWh). Αυτό προφανώς σημαίνει ότι η τεράστια αύξηση της εγκατεστημένης δυναμικότητας είναι περιττή. Το αποτέλεσμα είναι όταν όλα τα αιολικά πάρκα παράγουν με υψηλή απόδοση, να μεταφέρουν αυτή την υπερπαραγωγή στο δίκτυο σε βάρος άλλων πηγών ενέργειας, με αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερο κόστος για τους πολίτες. Η οικονομική επιβάρυνση είναι πραγματική. Για παράδειγμα, από το 2010, το κόστος λειτουργίας του συστήματος αυξήθηκε κατά 62% στη Βρετανία.

^{dd} Emblemsvåg, J. Wind energy is not sustainable when balanced by fossil energy. *Applied Energy* **305**, 117748 (2022)

4. Αβεβαιότητες της AKZ

Από τα προηγούμενα, γίνεται σαφές ότι υπάρχει ένα σοβαρό ερώτημα σε σχέση με το κατά πόσο η AKZ αιολικών πάρκων, όπως εφαρμόζεται μέχρι σήμερα, μπορεί να οδηγήσει σε επαρκώς τεκμηριωμένα και κατ' επέκταση ασφαλή συμπεράσματα, ώστε να διαδραματίζει βασικό ρόλο στη λήψη σχετικών αποφάσεων.

Βάσει της ανωτέρω ανάλυσης, μια πρώτη απάντηση είναι ότι **εντοπίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις και μεγάλες αβεβαιότητες σε σχέση με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των αιολικών πάρκων, όπως αποδεικνύεται από τρεις παρατηρήσεις:**

- Την ανισομερή βαρύτητα που δίνουν οι ερευνητικές προσπάθειες στην ανάλυση των διαφορετικών σταδίων κύκλου ζωής και στις μελετώμενες κατηγορίες επιπτώσεων.
- Τις κατά περιπτώσεις εξαγωγή αντικρουόμενων, μεταξύ διαφορετικών μελετών, συμπερασμάτων.
- Την υπέρμετρη έμφαση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στον ενεργειακό χρόνο ανταπόδοσης για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, ελλείψει αντίστοιχης προσπάθειας για τις υπόλοιπες εξεταζόμενες επιπτώσεις, που υπολογίζονται μεν αριθμητικά, αλλά φαίνεται να λείπουν αναφορές σε παραμέτρους όπως η σύγκριση με άλλες μορφές ενέργειας, η αναστρεψιμότητα αυτών ή μη, κλπ.

Ειδικότερα, τα δύο κύρια προβλήματα που εντοπίζονται ως προς την εκτίμηση περιβαλλοντικού αποτυπώματος μιας μονάδας αιολικής ενέργειας μέσω AKZ είναι α) η έμφαση που δίνεται στην ενέργεια, τα αέρια του θερμοκηπίου και ορισμένες ακόμα εκπομπές, σε βάρος πλήθους άλλων κατηγοριών που δύνανται και έχει αξία να μελετηθούν και β) στην εξάρτηση των υπολογισμών από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο προσδιορισμού του αποτυπώματος. Όσον αφορά στον ολοκληρωμένο προσδιορισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, εντοπίζονται σημαντικά μεθοδολογικά ζητήματα και αβεβαιότητες σε σχέση με παραμέτρους, όπως:

- Η κατανάλωση φυσικών πόρων και, ιδίως, μη ανανεώσιμων, όπως οι σπάνιες γαίες, αφού μπορεί να αποτελέσουν περιοριστικό παράγοντα κατά την περίοδο αλματώδους ανάπτυξης εναλλακτικών συστημάτων ενέργειας, με ενδεικτικό παράδειγμα το νεοδύμιο^{ee}.
- Η έκλυση τοξικών ουσιών κατά τη φάση παραγωγής υλικών καθώς και το αποτύπωμα σε σχετικές με την κάθε μελέτη περίπτωσης παραμέτρους, όπως η βιοποικιλότητα, η οπτική όχληση, κλπ.

Αναφορικά με την εξάρτηση από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο προσδιορισμού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, εκτός του ότι καθιστά δύσκολη τη σύγκριση διαφορετικών μελετών, επηρεάζει και το αποτέλεσμα αξιολόγησης μεμονωμένων περιπτώσεων μελέτης, όπως φαίνεται και από το παράδειγμα που παρατίθεται σε εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση, σύμφωνα με το οποίο, η μελέτη της ίδιας εγκατάστασης, από

^{ee} Davidsson S., Hook M., & Wall G. A review of life cycle assessments on wind energy systems. *Int. J. Energy Res.* 17, 729–742 (2012)

τους ίδιους μελετητές, με τη χρήση δύο διαφορετικών μεθοδολογιών, οδήγησε σε διαφορά της τάξης του 45% στον υπολογισμό του ενεργειακού χρόνου ανταπόδοσης^{ee}.

Αναφορικά με το στάδιο τέλους κύκλου ζωής και, πιο συγκεκριμένα, τη θεώρηση ότι μεγάλο μέρος των χρησιμοποιούμενων υλικών κατασκευής θα ανακυκλωθούν στη φάση αυτή, τις περισσότερες φορές υπάρχουν ασάφειες ή εκτιμήσεις που δεν αντιστοιχούν στην πραγματικότητα των υιοθετούμενων πρακτικών παύσης λειτουργίας αιολικών εγκαταστάσεων και εναλλακτικής διαχείρισης των υλικών που προκύπτουν^{ff}, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικότερα στη συνέχεια. Οι τρέχουσες ΑΚΖ για τα αιολικά πάρκα κριτικάρονται επίσης σε σημαντικό βαθμό διότι αγνοούν τις έμμεσες επιπτώσεις, όπως για παράδειγμα α. τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις για τη σύνδεση των αιολικών πάρκων με το ηλεκτρικό δίκτυο, ιδιαίτερα δε στις περιπτώσεις που το ηλεκτρικό δίκτυο δεν είναι πλησίον νέων αιολικών πάρκων και απαιτείται σημαντική επέκταση του, και β. τις επιπτώσεις στο ηλεκτρικό δίκτυο και τη διαθεσιμότητα ρεύματος από ορυκτά καύσιμα για τη σταθεροποίηση του.

Βασική έλλειψη πολλών μελετών είναι και το γεγονός ότι δεν υπολογίζεται η απώλεια της εδαφικής αποθήκευσης άνθρακα αλλά και οι εκπομπές λόγω αλλαγής χρήσεων γης οι οποίες είναι πολύ σημαντικές. Το όφελος των αιολικών πάρκων είναι η σημαντική εξοικονόμηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένου του διοξειδίου του άνθρακα. Η δέσμευση άνθρακα είναι η διαδικασία μέσω της οποίας το έδαφος και τα φυτά αφαιρούν το διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα και το αποθηκεύουν, ως αποτέλεσμα της φωτοσύνθεσης, ρυθμίζοντας έτσι τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα, και επηρεάζοντας θετικά το παγκόσμιο κλίμα. Σύμφωνα με μια εμπεριστατωμένη μελέτη^{gg}, η αντικατάσταση της βλάστησης και του επιφανειακού εδάφους από αδιαπέραστες επιφάνειες που σχετίζονται με τα αιολικά πάρκα μειώνει την δέσμευση άνθρακα και αυξάνει τις εκπομπές άνθρακα μέσω της απώλειας βιομάζας και της αύξησης της διάβρωσης του εδάφους. Ο βαθμός στον οποίο τα αιολικά πάρκα επηρεάζουν τη δέσμευση άνθρακα από τη βλάστηση και τα εδάφη δεν είναι ξεκάθαρος και συνήθως δεν υπολογίζεται. Σε μια σχετική μελέτη που αναφέρεται στη Σκωτία, η εγκατάσταση 3.848 ανεμογεννητριών οδήγησε σε επιπρόσθετες εκπομπές 4,9 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα, ακριβώς λόγω της αλλαγής των χρήσεων γης και της μη εδαφικής αποθήκευσης^{hh}. Εξίσου σημαντική έλλειψη, είναι και ο μη υπολογισμός της απώλειας του ζωτικής σημασίας οργανικού άνθρακα από το έδαφοςⁱⁱ, λόγω των αλλαγών των χρήσεων γης.

Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στα θέματα της βιοποικιλότητας, καθώς αυτά αποτελούν επίσης άλλο ένα αδύνατο σημείο των ΑΚΖ και του υπολογισμού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

^{ff} Mello, G., Ferreira Dias, M. & Robaina, M. Wind farms life cycle assessment review: CO2 emissions and climate change. *Energy Reports* 6, 214–219 (2020)

^{gg} Jones, N. F., Pejchar, L. & Kiesecker, J. M. The Energy Footprint: How Oil, Natural Gas, and Wind Energy Affect Land for Biodiversity and the Flow of Ecosystem Services. *BioScience* 65, 290–301 (2015)

^{hh} Albanito, F., Roberts, S., Shepherd, A. & Hastings, A. Quantifying the land-based opportunity carbon costs of onshore wind farms. *Journal of Cleaner Production* 363, 132480 (2022)

ⁱⁱ Pekkan, O. I. *et al.* Assessing the effects of wind farms on soil organic carbon. *Environ Sci Pollut Res* 28, 18216–18233 (2021)

5. Βιοποικιλότητα και ανεμογεννήτριες

Το πρόβλημα της απώλειας της βιοποικιλότητας είναι γενικότερα υποτιμημένο, σε σχέση με την κλιματική αλλαγή, αλλά και με τη ρύπανση. Ο βασικός λόγος για αυτό είναι ότι η απώλεια της βιοποικιλότητας δεν αντιμετωπίζεται με τεχνολογικές λύσεις, επομένως δεν είναι ελκυστική για επενδύσεις και δεν συνεισφέρει άμεσα στην οικονομική ανάπτυξη με όρους ΑΕΠ. Αντίθετα, η προστασία της βιοποικιλότητας προϋποθέτει διατήρηση σημαντικών περιοχών χωρίς ανθρωπογενείς δραστηριότητες και επεμβάσεις. Η απώλεια της βιοποικιλότητας συνδέεται άμεσα και καθοριστικά με την ανθεκτικότητα και την βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων, του συστήματος παραγωγής τροφών και τροφίμων, αλλά και με τις ζωτικές υπηρεσίες υποστήριξης των ανθρώπινων κοινωνιών.

Οποιαδήποτε εγκατάσταση αιολικής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα μια απώλεια οικοτόπων, τόσο άμεσα μέσω της κατάληψης γης από τις ανεμογεννήτριες, όσο και έμμεσα λόγω της αποφυγής ειδών από τις περιοχές γύρω από τις εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας.

Όσον αφορά την απώλεια οικοτόπων, έχει αναφερθεί ότι διαφορετικά είδη πτηνών και νυχτερίδων ενδέχεται να αποφεύγουν περιοχές που περιέχουν ανεμογεννήτριες. Όσον αφορά τις αλλαγές που επέρχονται στους οικοτόπους, δεν αποτελεί έκπληξη ότι η κύρια απειλή για τη βιοποικιλότητα προκύπτει από τη σύγκρουση των πτηνών (ειδικά των αρπακτικών) και των νυχτερίδων με τις γεννήτριες ανέμου, καθώς και από το ρεύμα του αέρα που δημιουργείται από τις περιστρεφόμενες λεπίδες. Γενικά, τα πουλιά που είναι σπάνια/απειλούμενα ή έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και καθυστερούν να αναπαραχθούν, αντιμετωπίζουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο από την ανάπτυξη ανεμογεννητριών. Το ίδιο ισχύει και για τα μεγαλύτερα και λιγότερο ευκίνητα πουλιά^{jj}.

Σχετικά πρόσφατα έχουν ξεκινήσει συστηματικές μελέτες για τον προσδιορισμό των αλυσιδωτών επιπτώσεων που επιφέρει η απώλεια οικοτόπων από τα αιολικά πάρκα σε παγκόσμια και τοπική κλίμακα. Οι μελέτες αυτές αναγνωρίζουν την αδυναμία της ΑΚΖ να προσεγγίσει το θέμα της απώλειας βιοποικιλότητας και προτείνουν εναλλακτικές μεθόδους^{kk}. Σε μια σχετική μελέτη διαπιστώθηκε ότι σε αποστάσεις που έφταναν έως και 674 m μακριά από τις ανεμογεννήτριες, τα πουλιά απέφευγαν να περνάνε. Με βάση αυτό το αποτέλεσμα, υπολογίστηκε ότι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ανεμογεννητριών επηρεάζει από 3% ως και 14% των περιοχών που χρησιμοποιούν τα πουλιά για ξεκούραση στις περιοχές μελέτης, ενώ σημαντικά προβλήματα και απώλειες εντοπίζονται και στους αεροδιαδρόμους μετακίνησης των πουλιών^{ll}.

Σε μια άλλη σχετική επιστημονική μελέτη, διαπιστώθηκε ότι οι ευρωπαϊκές συστάσεις (για απόσταση ανεμογεννητριών τουλάχιστον 200 μέτρα από οποιαδήποτε δασώδη άκρη) είναι έντονα ανεπαρκείς σε σχέση με απώλεια δραστηριότητας νυχτερίδων, ενώ το 89% των

^{jj} Gasparatos, A., Doll, C. N. H., Esteban, M., Ahmed, A. & Olang, T. A. Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **70**, 161–184 (2017)

^{kk} May, R., Middel, H., Stokke, B. G., Jackson, C. & Veronesi, F. Global life-cycle impacts of onshore wind-power plants on bird richness. *Environmental and Sustainability Indicators* **8**, 100080 (2020)

^{ll} Marques, A. T. *et al.* Wind turbines cause functional habitat loss for migratory soaring birds. *Journal of Animal Ecology* **89**, 93–103 (2020)

ανεμογεννητριών είναι εγκατεστημένες σε περιοχές που δεν συμμορφώνονται ούτε καν με αυτή την ανεπαρκή σύσταση.

Μια συστηματική μελέτη^{mm} για τις επιπτώσεις των ανεμογεννητριών στη ζωή των ταράνδων, στη Σουηδία, διαπίστωσε ότι η απόσταση μεταξύ του τόπου τοκετού ταράνδων και των ανεμογεννητριών αυξήθηκε κατά τη φάση λειτουργίας, σε σύγκριση με πριν από την κατασκευή. Εντοπίστηκε σημαντική μείωση στην επιλογή οικοτόπων των περιοχών κοντά στα αιολικά πάρκα. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν επίσης μια μετατόπιση στην επιλογή καταφυγίου μακριά από τους οικοτόπους όπου οι ανεμογεννήτριες ήταν ορατές, προς ενδιαίτηματα όπου οι ανεμογεννήτριες ήταν κρυμμένες από την τοπογραφία (αύξηση χρήσης κατά 79% στα 5 km).

Σε μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα μελέτη που δημοσιεύτηκε το Δεκέμβριο του 2023, από την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Διατήρησης Βιοποικιλότητας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, ποσοτικοποιήθηκαν, για πρώτη φορά στην Ελλάδα, οι επιπτώσεις των αιολικών πάρκων όσον αφορά τις απώλειες γηςⁿⁿ. Αναλύοντας 90 αιολικά πάρκα, προέκυψε ότι ενώ η γενική τάση στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι να τοποθετούνται λιγότεροι σταθμοί αιολικής ενέργειας σε ορεινές και δασικές εκτάσεις, το πρότυπο αυτό αντιστρέφεται στην Ελλάδα. Οι νέοι αιολικοί σταθμοί στην Ελλάδα εγκαθίστανται σε μεγαλύτερα υψόμετρα και σε εδάφη που αντιμετωπίζουν μεγαλύτερους κινδύνους για τη διάβρωση του εδάφους και την εδαφική βιοποικιλότητα.

Η δέσμευση γης, δηλαδή η δημιουργία τεχνητής γης, από την κατασκευή αιολικών σταθμών παραγωγής ενέργειας είναι ιδιαίτερα μεγάλη (3.53 τ.μ. /MWh) – σχεδόν 3.5 φορές μεγαλύτερη από τον παγκόσμιο μέσο όρο, κυρίως λόγω των έντονων κλίσεων. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι για κάθε εγκατεστημένο MW, διανοίγονται 148 μέτρα νέων δρόμων και διαπλατώνονται 170 μέτρα υφιστάμενων δρόμων.

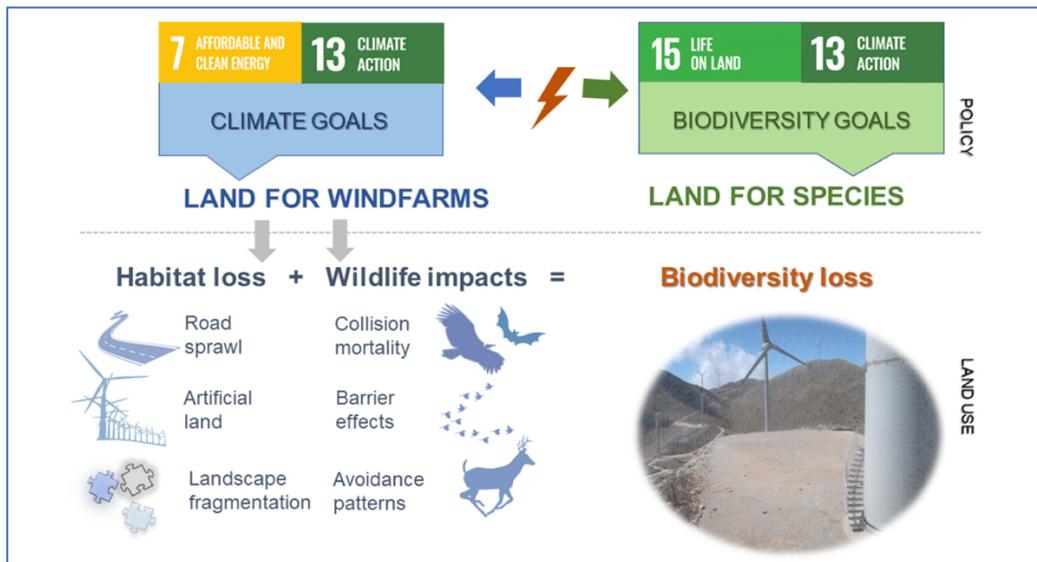
Σε μια άλλη μελέτη του ίδιου εργαστηρίου^{oo}, τεκμηριώθηκε ότι με την εγκατάσταση αιολικών πάρκων στη ζώνη με το μεγαλύτερο βαθμό κατακερματισμού, δρόμων και τεχνητών επιφανειών, εκτός του δικτύου Natura 2000, η χώρα θα ξεπερνούσε κατά πολύ τον πρότερο εθνικό στόχο του ΕΣΕΚ για την παραγωγή αιολικής ενέργειας.

^{mm} Skarin, A., Sandström, P. & Alam, M. Out of sight of wind turbines—Reindeer response to wind farms in operation. *Ecology and Evolution* **8**, 9906–9919 (2018)

ⁿⁿ Kati, V. et al. The overlooked threat of land take from wind energy infrastructures: Quantification, drivers and policy gaps. *Journal of Environmental Management* **348**, 119340 (2023)

^{oo} Kati, V., Kassara, C., Vrontisi, Z. & Moustakas, A. The biodiversity-wind energy-land use nexus in a global biodiversity hotspot. *Science of The Total Environment* **768**, 144471 (2021)

Το επόμενο σχήμα, από την εν λόγω μελέτη συμπυκνώνει γραφικά την αναδυόμενη ανταγωνιστική σχέση μεταξύ αιολικής ενέργειας και διατήρησης της βιοποικιλότητας.



Το ίδιο εργαστήριο έχει προχωρήσει και σε ανοικτή επιστολή προς την πολιτική ηγεσία σχετικά με την ορθή χωροθέτηση των αιολικών πάρκων^{PP}.

Επιπλέον, μια συστηματική ανάλυση^{QA} των περιβαλλοντικών όρων από 101 ΑΕΠΟ αιολικών πάρκων της περιόδου 2014-2020 εξέτασε κατά πόσο οι όροι που τίθενται στις ΑΕΠΟ των αιολικών πάρκων επιτελούν τον ρόλο τους ως προς την προστασία της ορνιθοπανίδας και πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στη συστηματική παρακολούθηση των επιπτώσεων των έργων και στην άμβλυνση των επιπτώσεων τους. **Η μελέτη συμπεραίνει ότι καταγράφεται απουσία εναρμονισμένης προσέγγισης των περιβαλλοντικών όρων που τίθενται στους ΑΣΠΗΕ. Οι διαφοροποιήσεις αφορούν στην αδειοδοτούσα αρχή της εκάστοτε ΑΕΠΟ καθώς και στην περιοχή εγκατάστασης των ΑΣΠΗΕ, δηλαδή αν πρόκειται για εγκαταστάσεις εντός ή εκτός περιοχών Natura 2000. Επίσης, διαπιστώνονται διαφοροποιήσεις ως προς τους περιβαλλοντικούς όρους που επιβάλλονται και για έργα που εγκαθίστανται σε παρόμοιες -από οικολογικής άποψης- περιοχές και επομένως αναμένεται να έχουν παρόμοιας κλίμακας περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρήθηκαν έχουν σημαντικές αρνητικές προεκτάσεις:**

- αποδυναμώνουν το πλαίσιο προστασίας περιοχών και ειδών που θεσμικά προστατεύονται,
- δύναται οδηγήσουν σε απαξίωση των κανόνων προστασίας και πιθανώς τη δημιουργία αμφιβολιών ή και πιέσεων για την αναγκαιότητά τους και
- δημιουργούν ανισότητες ως προς την αντιμετώπιση επενδυτών και επενδυτικών προτάσεων αλλά και διαφοροποιήσεις στο κόστος κατασκευής και λειτουργίας παρά τις ομοιότητες των επενδύσεων.

^{PP} <https://bc.lab.uoi.gr/el/science-for-society/epistoli-stin-politiki-igesia-gia-tin-orthi-chorothesis-ton-aiolikon-stathmon-paragogis-ilektrikis-energeias-gia-tin-antimetopisi-tis-klimatikis-kai-oikologikis-krisis/>

^{QA} Περιβαλλοντικοί Όροι Αιολικών Πάρκων: αξιολόγηση προσεγγίσεων και προτάσεις βελτίωσης, Μάρτιος 2021 https://thegreentank.gr/wp-content/uploads/2021/06/202103_GreenTankNCC_Oroi_Aioliika_AEPO.pdf

6. Το πρόβλημα της ανακύκλωσης των ανεμογεννητριών

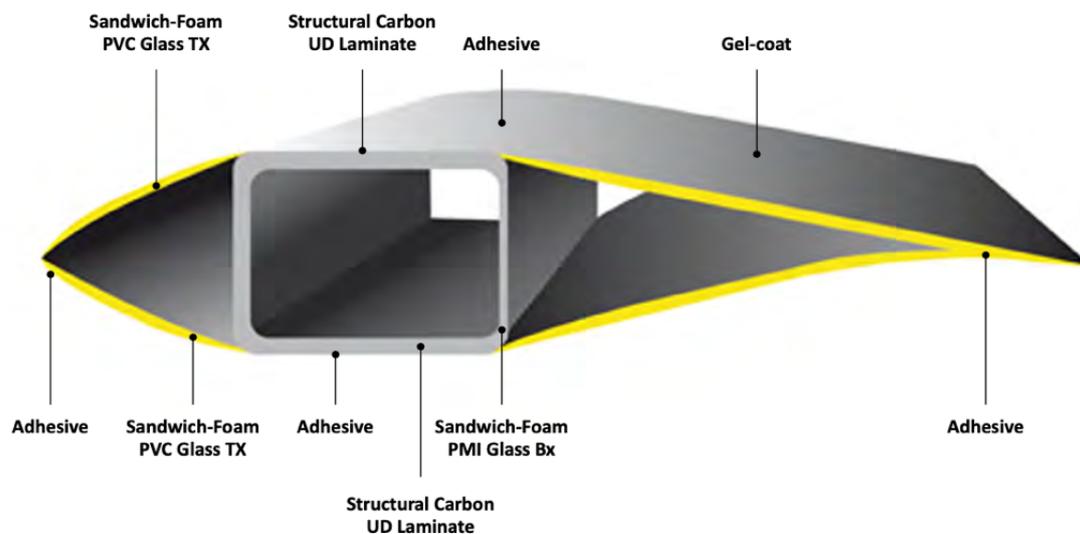
Ο οργανωμένος παροπλισμός των αιολικών πάρκων, δηλαδή η κατάργηση μετά την οριστική παύση λειτουργίας, είναι απαραίτητος όταν λήγουν οι άδειες ή καθώς τα αιολικά πάρκα με παλαιότερη τεχνολογία δεν είναι πλέον οικονομικά βιώσιμα για περαιτέρω λειτουργία υπό τις τρέχουσες συνθήκες της αγοράς. Σε ορισμένα σημεία όπου θα μπορούσαν να ληφθούν νέες άδειες, εγκαθίσταται μειωμένος αριθμός νέων ανεμογεννητριών με τεχνολογία αιχμής με μεγαλύτερους ρότορες και ψηλότερους πύργους, πρακτική που ονομάζεται *repowering*. Στις περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις η ενέργεια που παράγεται από τη νέα εγκατάσταση υπερβαίνει το αρχικό αιολικό πάρκο. Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι τα εύκολα ανακυκλώσιμα υλικά από τις ανεμογεννήτριες (χάλυβας, σίδηρος, αλουμίνιο, χαλκός) **θα ανακυκλωθούν υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:**

- A. Θα γίνει μια οργανωμένη αποσυναρμολόγηση των ανεμογεννητριών που ολοκληρώνουν τον κύκλο τους.**
- B. Θα μεταφερθούν τα ανακυκλώσιμα υλικά προς κέντρα υποδοχής και περαιτέρω επεξεργασίας αυτών.**

Η πρώτη προϋπόθεση απαιτεί την αυστηρή τήρηση των διαδικασιών αποσυναρμολόγησης από τους ιδιοκτήτες της ανεμογεννήτριας. Η δεύτερη προϋπόθεση υλοποιείται ευκολότερα όταν οι αποστάσεις και το μεταφορικό κόστος δεν είναι απαγορευτικές. **Επομένως, ο συνήθης ισχυρισμός της βιομηχανίας αιολικών πάρκων ότι το 85-90% των υλικών είναι ανακυκλώσιμα, ισχυρισμός που αναφέρεται στα εύκολα ανακυκλώσιμα υλικά που αναφέρθηκαν καθώς και στο τσιμέντο, είναι εν μέρει παραπλανητικός. Το γεγονός ότι τα εν λόγω υλικά είναι ανακυκλώσιμα δεν συνεπάγεται αυτόματα ότι όντως θα ανακυκλωθούν – για να γίνει αυτό απαιτείται η αυστηρή τήρηση των υποχρεώσεων των ιδιοκτητών καθώς και ευνοϊκοί όροι της αγοράς.**

Ωστόσο το μεγάλο πρόβλημα εμφανίζεται στην διαχείριση των πτερυγίων, τα οποία αποτελούνται από σύνθετα υλικά, με μεγάλη ανθεκτικότητα και περιορισμένες δυνατότητες ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης^{rr}. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται εποπτικά μια τυπική διατομή πτερυγίου που αναδεικνύει πόσο σύνθετο υλικό είναι.

^{rr} Juntikka, M., Tränkle, T., Mattsson, C. & Sott, R. Circular economy and the management of end-of-life wind turbine blades. *RISE Research Institutes of Sweden, Sweden* 20 (2018)



Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια είναι σύνθετα υλικά, όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πλοιαρίων και σκαφών αναψυχής. Πιο συγκεκριμένα, εξωτερικά, τα πτερύγια αποτελούνται συνήθως από υαλονήματα, ενώ η επικάλυψή τους κατασκευάζεται με επιστρώσεις από πολυεστερικά υλικά. Εσωτερικά, περιέχουν πολυμερή υλικά, όπως πολυεστέρα, PVC και εποξικά ή θερμοπλαστικά υλικά, και συνήθως χρησιμοποιείται ξύλο balsa ή αφρός πολυουρεθάνης. Επίσης, περιέχουν μεταλλικά μέρη από σίδηρο, κυρίως στο σημείο σύνδεσης των πτερυγίων στην πλήμνη (hub), καθώς επίσης και αγωγούς χαλκού ή σιδήρου για την αντικεραυνική προστασία. Σύμφωνα με εκτιμήσεις της ΕΛΕΤΑΕΝ, το 2025 το μερίδιο των αποβλήτων συνθετικών υλικών από ανεμογεννήτριες θα φτάσει το 10% σε παγκόσμια κλίμακα. Πέραν της φύσης του υλικού, σημαντικό μέρος του προβλήματος είναι και το τεράστιο μέγεθος των πτερυγίων που απαιτεί εξειδικευμένα μηχανήματα επί τόπου για το σωστό χειρισμό τους, και σημαντικά μεταφορικά κόστη.

Οι σημερινές πρακτικές χαρακτηρίζονται από α. περιορισμένες και μάλλον συμβολικές προσπάθειες επαναχρησιμοποίησης κάποιων κομματιών των πτερυγίων είτε για την ίδια χρήση είτε για χρήσεις όπως έπιπλα, παγκάκια, τοπόσημα και παιδικές χάρες, και β. μικρό αριθμό εταιριών, μικρής δυναμικότητας, που τεχνολογικά επεξεργάζεται τα πτερύγια και παράγει κάποιου είδους νέα προϊόντα⁵⁵. Ταυτόχρονα, βρίσκονται σε εξέλιξη προσπάθειες τεχνολογικής καινοτομίας και επανασχεδιασμού των πτερυγίων με στόχο τη βελτίωση της εν δυνάμει ανακυκλωσιμότητας αυτών. Στην πραγματική ζωή όμως, τα αποτελέσματα είναι απογοητευτικά: ένα μεγάλο μέρος των πτερυγίων καταλήγει σε χώρους ταφής και μόνο 4 χώρες στην ΕΕ έχουν απαγορεύσει την ταφή των πτερυγίων (Γερμανία, Αυστρία, Ολλανδία και Φιλανδία). Χαρακτηριστικό του προβλήματος που υπάρχει είναι ότι δεν αναφέρονται πουθενά στατιστικά στοιχεία για τα ποσοστά ανακύκλωσης η επαναχρησιμοποίησης των πτερυγίων.

Οι αναμενόμενες ποσότητες πτερυγίων στην ΕΕ εκτιμώνται μεταξύ 50 και 100 χιλιάδων τόνων για το 2020. Σε μακροπρόθεσμες προβλέψεις, αναμένεται η συσσώρευση σχεδόν 43

⁵⁵ Psomopoulos, C., Kalkanis, K., Kaminaris, S., Ioannidis, G. & Pachos, P. A Review of the Potential for the Recovery of Wind Turbine Blade Waste Materials. *Recycling* 4, 7 (2019)

εκατομμυρίων τόνων πτερυγίων ως το 2050 σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ γύρω στο 2050 η Ευρώπη αναμένεται να έχει συσσωρεύσει 325 – 500 χιλιάδες τόνους απόβλητα πτερυγίων ανά έτος^{tt}. Στην Ελλάδα, σύμφωνα με μια παρουσίαση της ΡΑΕ^{uu}, το 2022 υπήρχαν 148 ανεμογεννήτριες άνω των 24 ετών και 431 ανεμογεννήτριες μεταξύ 20 και 24 ετών, σύνολο 579 προς απόσυρση ή σχεδόν 20% των εγκατεστημένων το 2022 ανεμογεννητριών. **Λεπτομέρειες για το πως ακριβώς θα γίνει η διαχείριση των ανεμογεννητριών όταν παροπλιστούν δεν αναφέρονται επίσημα πουθενά, παρά τις συνεχείς διαβεβαιώσεις της βιομηχανίας αιολικών πάρκων ότι προτεραιότητα έχει η ανακύκλωση. Στη χώρα δεν υπάρχει καμία εγκατάσταση ή εταιρεία ικανή να ανακυκλώσει τα πτερύγια, το μεταφορικό κόστος για να πάνε σε εταιρείες του εξωτερικού είναι τεράστιο και επομένως αναμένεται είτε να οδηγηθούν σε χώρους ταφής είτε να αφεθούν επί τόπου ή σε άτυπες αποθέσεις. Τέλος, επισημαίνεται ότι παρατηρείται συχνά μια σημαντική έλλειψη στις Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων σε σχέση με τη διαχείριση των αιολικών πάρκων μετά το τέλος του κύκλου ζωής αυτών αλλά και για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αποξήλωσης των εγκαταστάσεων^{vv}.**

^{tt} Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D. P. & Pagh Jensen, J. The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **155**, 111847 (2022)

^{uu} Βλέπε <https://www.rae.gr/wp-content/uploads/2023/06/002-Π.-Παπασταματίου-Green-Forward-9.6.23.pdf>

^{vv} all, R., João, E. & Knapp, C. W. Environmental impacts of decommissioning: Onshore versus offshore wind farms. *Environmental Impact Assessment Review* **83**, 106404 (2020)

7. Συμπεράσματα

Τα βασικά πορίσματα από όσα αναφέρθηκαν στην παρούσα μελέτη είναι τα ακόλουθα.

A. Την περίοδο 2010-2023 τετραπλασιάστηκε η εγκατεστημένη ισχύς και τοποθετήθηκε το 61% των εν λειτουργία ανεμογεννητριών στην Ελλάδα, δηλαδή 1827 νέες ανεμογεννήτριες. Η αιολική ενέργεια πλέον καλύπτει ένα ποσοστό της τάξης του 25-26% της ηλεκτροπαραγωγής της χώρας και αποτελεί κομβικό στοιχείο του εθνικού δικτύου. Κατά συνέπεια, σε μια χώρα που πλέον έχει σχεδόν 3.000 ανεμογεννήτριες διεσπαρμένες σε όλη την επικράτεια, είναι αδήριτη ανάγκη να μελετηθούν σε βάθος όχι μόνο οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αιολικών πάρκων αλλά και το σωρευτικό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, και οι σωρευτικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται. Οι επιπτώσεις αυτές γίνονται όλο και μεγαλύτερες αλλά και πιο αισθητές όσο μεγαλώνει το ποσοστό της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα της χώρας και τα αιολικά πάρκα επεκτείνονται χωρικά σε κάθε άκρη της Ελλάδας, περιλαμβανομένων και περιοχών με ειδική περιβαλλοντική ευαισθησία και καθεστώς προστασίας. Παράλληλα, οι εν λόγω περιβαλλοντικές επιπτώσεις μελετώνται όλο και πιο συστηματικά σε διεθνές επίπεδο τα τελευταία 15 χρόνια με αποτέλεσμα να έχει συσσωρευτεί νέα γνώση και πολλά καινούρια επιστημονικά δεδομένα, τα οποία πρέπει να πλέον να συνηυπολογίζονται στις σχετικές αδειοδοτήσεις και μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

B. Κατά την περίοδο 2010-2023, αυξήθηκε σχεδόν κατά 50% το μέγεθος του ρότορα και υπερδιπλασιάστηκε η μέση ισχύς ανά εγκατεστημένη ανεμογεννήτρια. Ταυτόχρονα, σε παγκόσμια κλίμακα, δρομολογήθηκαν σημαντικές αλλαγές στο σχεδιασμό και επομένως και στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών. Οι αλλαγές αυτές, σε γενικές γραμμές, τροποποιούν το μοναδιαίο περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ανεμογεννητριών (ανηγμένο σε MW) και κατά βάση το μειώνουν σε ποσοστά που φτάνουν ως και το 20%. Ωστόσο η μείωση του μοναδιαίου περιβαλλοντικού αποτυπώματος αντισταθμίζεται από την εκθετική αύξηση των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών. Έτσι για παράδειγμα, αν όλες οι νέες πρόσθετες ανεμογεννήτριες έχουν μοναδιαίο περιβαλλοντικό αποτύπωμα μειωμένο κατά 20% σε σχέση με τις παλιές (παραδοχή ευνοϊκή για τις ανεμογεννήτριες που τοποθετήθηκαν ως το 2014), ο τετραπλασιασμός της εγκατεστημένης ισχύος μεταξύ 2010-2023 σημαίνει ότι το νέο συνολικό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα αυξήθηκε κατά $4 \times 0,8 = 3,2$ δηλαδή 320%.

Γ. Το ιστορικό πλαίσιο του αιώνα μας προσδιορίζεται από την τριπλή περιβαλλοντική κρίση, δηλαδή την κλιματική κρίση, την απώλεια βιοποικιλότητας και την αυξανόμενη ρύπανση. Αυτές οι τρεις διαστάσεις της τριπλής περιβαλλοντικής κρίσης είναι αλληλένδετες και αλληλοτροφοδοτούμενες και σε άμεση συσχέτιση με την διαρκή οικονομική μεγέθυνση και την εξάρτηση της οικονομίας από τα ορυκτά καύσιμα. Κατά την εξέταση της σκοπιμότητας εγκατάστασης αιολικών πάρκων, η συζήτηση συχνά περιορίζεται αποκλειστικά στα αναμενόμενα ενεργειακά οφέλη και ειδικότερα στα οφέλη που θα προκύψουν σε σχέση με την κλιματική αλλαγή και την αναμενόμενη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (σε σχέση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων). Ωστόσο, αυτός ο περιορισμός της συζήτησης στο θέμα της κλιματικής αλλαγής είναι εμπόδιο σε μια ολοκληρωμένη αποτίμηση του ΠΑ και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ανεμογεννητριών διότι υποβαθμίζει τις δύο άλλες συνιστώσες της τριπλής περιβαλλοντικής κρίσης, δηλαδή την απώλεια βιοποικιλότητας και την πάσης μορφής ρύπανση.

Δ. Οι αλλαγές στις χρήσεις γης, που προκύπτουν άμεσα και έμμεσα από τα αιολικά πάρκα, συνεισφέρουν άμεσα στη μείωση της βιοποικιλότητας και τον περιορισμό των δυνατοτήτων φυσικής αναπαραγωγής των οικοσυστημάτων. Σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή που συνεισφέρει δραστικά στην απώλεια της βιοποικιλότητας, και ειδικά στην Ελλάδα που θεωρείται μια από τις πλέον ευάλωτες περιοχές της Ευρώπης, οι αλλαγές των χρήσεων γης και οι απώλειες ενδιαιτημάτων μειώνουν καθοριστικά την ικανότητα των οργανισμών να μετατοπίσουν την εξάπλωση τους και έτσι να αποκριθούν στις μεταβολές της κλιματικής αλλαγής. Η Ελλάδα φτάνει σταδιακά σε ένα σημείο καμπής. Αφενός είναι απαραίτητο να προχωρήσει η μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και να μειωθούν δραστικά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αφετέρου, όμως, είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί προσεκτικά το πλαίσιο των ΑΠΕ και ο βαθμός επέκτασης αυτών έτσι ώστε να μην προκαλέσουν επιπρόσθετη ζημιά στα οικοσυστήματα που ήδη απειλούνται σοβαρά από την κλιματική αλλαγή.

Ε. Με τη συσσώρευση εμπειριών από τις πραγματικές επιπτώσεις αιολικών πάρκων και την πρόοδο της επιστήμης σε σχέση με την ΑΚΖ, είμαστε πλέον σε πολύ καλύτερη θέση και μπορούμε να έχουμε μια ολοκληρωμένη αποτίμηση σε σχέση με τον υπολογισμό του ΠΑ. Σύμφωνα με ορισμένες μελέτες, φαίνεται ότι η φάση λειτουργίας και συντήρησης, η οποία γενικά θεωρούνταν ως αμελητέας επίδρασης, έχει μια συνεισφορά που μπορεί και να φτάσει στο 10-15% στο συνολικό ΠΑ. Το 60-80% του ΠΑ των ανεμογεννητριών αποδίδεται στο στάδιο της παραγωγής αυτών και ένα ποσοστό της τάξης του 3-10% στο στάδιο μεταφοράς και εγκατάστασης. Παρά το γεγονός ότι κατά τη λειτουργία των αιολικών πάρκων οι εκπομπές είναι σχεδόν μηδενικές, ο σωρευτικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος είναι σημαντικός, σε σημείο είναι απαραίτητο να εξεταστεί η συνολική συνεισφορά της γενικευμένης και άνευ όρων χρήσης αιολικής ενέργειας στη βιωσιμότητα. Επισημαίνεται ότι υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες, μεθοδολογικά κενά αλλά και αλληλοσυγκρουόμενες προσεγγίσεις όσον αφορά την ΑΚΖ για την αιολική ενέργεια. Σε γενικές γραμμές, η συσσωρευμένη πλέον εμπειρία από τα αιολικά πάρκα αναδεικνύει την έλλειψη μιας ενιαίας και αξιόπιστης προσέγγισης και τροφοδοτεί διαρκώς νέες ερευνητικές μελέτες, αναδεικνύοντας ότι απέχουμε ακόμα πολύ από την τυποποίηση των σχετικών μοντέλων και την επιστημονικά τεκμηριωμένη αξιοπιστία αυτών.

ΣΤ. Πρόσφατες επιστημονικές μελέτες αναδεικνύουν και τεκμηριώνουν το γεγονός ότι, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, η μαζική υιοθέτηση της αιολικής ενέργειας ενδέχεται να οδηγήσει σε σωρευτικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις δυσμενέστερες ακόμα και σε σχέση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων σε υψηλής τεχνολογίας εγκαταστάσεις. Ο βασικός λόγος είναι ότι ο ΣΑ της αιολικής ενέργειας είναι της τάξης του 25%, έναντι 85% των ορυκτών καυσίμων, επομένως απαιτείται να κατασκευαστεί και να τοποθετηθεί εξοπλισμός μεγάλης ονομαστικής ισχύος, σχεδόν τετραπλάσιας από την αναμενόμενη πραγματική συνεισφορά στην Ελλάδα, με το αντίστοιχο εδαφικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σημειώνεται ότι ο ΣΑ για τα αιολικά συστήματα εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Από το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης της μονάδας, όπως μπορεί να εκφραστεί από τη μέση ταχύτητα ανέμου
- Από την ποιότητα της εγκατάστασης, όπως μπορεί να εκφραστεί από τον συντελεστή απωλειών

- Από το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένη και το ποσοστό απορριπτόμενης ενέργειας

Z. Μια βασική έλλειψη πολλών ΜΠΕ αλλά ΑΚΖ είναι και το γεγονός ότι δεν υπολογίζεται η απώλεια της εδαφικής αποθήκευσης άνθρακα αλλά και οι εκπομπές λόγω αλλαγής χρήσεων γης οι οποίες είναι πολύ σημαντικές. Σύμφωνα με μια εμπειριστατωμένη μελέτη, η αντικατάσταση της βλάστησης και του επιφανειακού εδάφους από αδιαπέραστες επιφάνειες που σχετίζονται με τα αιολικά πάρκα μειώνει την δέσμευση άνθρακα και αυξάνει τις εκπομπές άνθρακα μέσω της απώλειας βιομάζας και της αύξησης της διάβρωσης του εδάφους. Ο βαθμός στον οποίο τα αιολικά πάρκα επηρεάζουν τη δέσμευση άνθρακα από τη βλάστηση και τα εδάφη δεν είναι ξεκάθαρος και συνήθως δεν υπολογίζεται. Σε μια σχετική μελέτη που αναφέρεται στη Σκωτία, η εγκατάσταση 3.848 ανεμογεννητριών οδήγησε σε επιπρόσθετες εκπομπές 4,9 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα, ακριβώς λόγω της αλλαγής των χρήσεων γης και της μη εδαφικής αποθήκευσης. Εξίσου σημαντική έλλειψη, είναι και ο μη υπολογισμός της απώλειας του ζωτικής σημασίας οργανικού άνθρακα από το έδαφος, λόγω των αλλαγών των χρήσεων γης.

H. Οι υποτιμημένες επιπτώσεις των αιολικών πάρκων στη βιοποικιλότητα αρχίζουν πλέον και γίνονται αισθητές και νέες μελέτες αναδεικνύουν διαφορετικές διαστάσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν. Στην Ελλάδα, η δέσμευση γης, από την κατασκευή αιολικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, είναι ιδιαίτερα μεγάλη (3.53 τ.μ. /MWh) – σχεδόν 3.5 φορές μεγαλύτερη από τον παγκόσμιο μέσο όρο, κυρίως λόγω των έντονων κλίσεων, της διάνοιξης νέων δρόμων και των απαιτούμενων διαπλατυνσεων για τη μεταφορά των ανεμογεννητριών. Διαπιστώθηκε ότι για κάθε εγκατεστημένο MW αιολικής ενέργειας, διανοίγονται 148 μέτρα νέων δρόμων και διαπλατώνονται 170 μέτρα υφιστάμενων δρόμων.

Θ. Μια συστηματική ανάλυση των περιβαλλοντικών όρων από 101 ΑΕΠΟ αιολικών πάρκων της περιόδου 2014-2020 εξέτασε κατά πόσο οι όροι που τίθενται στις ΑΕΠΟ των αιολικών πάρκων επιτελούν τον ρόλο τους ως προς την προστασία της ορνιθοπανίδας και πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στη συστηματική παρακολούθηση των επιπτώσεων των έργων και στην άμβλυνση των επιπτώσεων τους. Η μελέτη συμπεραίνει ότι καταγράφεται απουσία εναρμονισμένης προσέγγισης των περιβαλλοντικών όρων που τίθενται στους ΑΣΠΗΕ. Οι διαφοροποιήσεις αφορούν στην αδειοδοτούσα αρχή της εκάστοτε ΑΕΠΟ καθώς και στην περιοχή εγκατάστασης των ΑΣΠΗΕ, δηλαδή αν πρόκειται για εγκαταστάσεις εντός ή εκτός περιοχών Natura 2000. Επίσης, διαπιστώνονται διαφοροποιήσεις ως προς τους περιβαλλοντικούς όρους που επιβάλλονται και για έργα που εγκαθίστανται σε παρόμοιες - από οικολογικής άποψης- περιοχές και επομένως αναμένεται να έχουν παρόμοιας κλίμακας περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το αποτέλεσμα έχει σαφές αρνητικό πρόσημο σε σχέση με την προστασία του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα στις προστατευόμενες περιοχές.

Z. Τα αιολικά πάρκα είναι κατασκευασμένα από υλικά που σε ποσοστό 85-90% είναι ανακυκλώσιμα. Το γεγονός ότι τα εν λόγω υλικά είναι ανακυκλώσιμα δεν συνεπάγεται αυτόματα ότι όντως θα ανακυκλωθούν – για να γίνει αυτό απαιτείται η αυστηρή τήρηση των υποχρεώσεων των ιδιοκτητών καθώς και ευνοϊκοί όροι της αγοράς. Τα εύκολα ανακυκλώσιμα υλικά (σίδηρος, χάλυβας, αλουμίνιο, χαλκός) θα ανακυκλωθούν υπό ορισμένες προϋποθέσεις, όπως γίνεται και στην ΕΕ, αλλά με σημαντικά μεγαλύτερο

μεταφορικό κόστος στην Ελλάδα, λόγω της χωροθέτησης των αιολικών πάρκων. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές τεχνολογικές δυσκολίες και απουσία εγκαταστάσεων ανακύκλωσης των πτερυγίων, τόσο στην Ελλάδα όσο και στην ΕΕ. Μόνο 4 χώρες στην ΕΕ έχουν απαγορεύσει την ταφή των πτερυγίων (Γερμανία, Αυστρία, Ολλανδία και Φιλανδία). Χαρακτηριστικό του προβλήματος που υπάρχει είναι ότι δεν αναφέρονται πουθενά στατιστικά στοιχεία για τα ποσοστά ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης των πτερυγίων. Στην Ελλάδα δεν υπάρχει καμία εγκατάσταση ή εταιρεία ικανή να ανακυκλώσει τα πτερύγια, ενώ το μεταφορικό κόστος για να πάνε σε εταιρείες του εξωτερικού είναι τεράστιο και επομένως αναμένεται είτε να οδηγηθούν στους ήδη κορεσμένους χώρους ταφής (ΧΥΤΑ) είτε να αφεθούν επί τόπου ή σε άτυπες αποθέσεις.