



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος
περιβαλλοντικής Βιοτεχνολογίας του ΠΜΣ

Μακροφύκη και μπλε άνθρακας (Blue Carbon): αποκρίσεις και επιπτώσεις της κλιματικής κρίσης»

Μακροφύκη

- Φύκη των οποίων ο θαλλός είναι ορατός μακροσκοπικά
- **Κύριες ομάδες: Phaeophyceae, Rhodophyta, Chlorophyta**

Μορφολογία

Τα μακροφύκη δεν έχουν ρίζες.

Διαθέτουν δίσκο προσκόλλησης (holdfast) για μηχανική σταθεροποίηση στο υπόστρωμα.

Ο δίσκος δεν απορροφά θρεπτικά.

Η πρόσληψη θρεπτικών και CO_2 γίνεται από ολόκληρη την επιφάνεια του θαλλού.



Μπλε άνθρακας

- Ως μπλε άνθρακας, ορίζεται ο άνθρακας που δεσμεύεται, αποθηκεύεται και θάβεται **μακροπρόθεσμα**
-  σε παράκτια και θαλάσσια οικοσυστήματα όπως μαγκρόβια και λιβάδια θαλάσσιων φανερόγαμων.

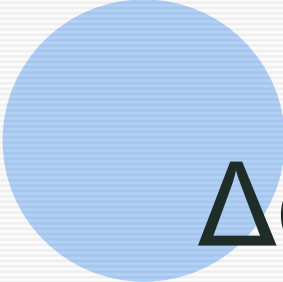
Κριτήρια του IPCC:

Να μπορεί να μετρηθεί η δέσμευση

Να αποθηκεύεται για δεκαετίες/ αιώνες

Να μπορεί να
προστατευθεί/αποκατασταθεί

Μακροφύκη και μπλέ άνθρακας



Δάση μακροφυκών

- Δάση που σχηματίζονται από μεγάλου μεγέθους θαλάσσια φύκη (π.χ. ***Laminaria*, *Macrocystis*, *Ecklonia***).
- Στη Μεσόγειο ➡ δάση μικρότερου μεγέθους ➡ *Cystoseira* και *Sargassum*

Ρυθμοί αύξησης

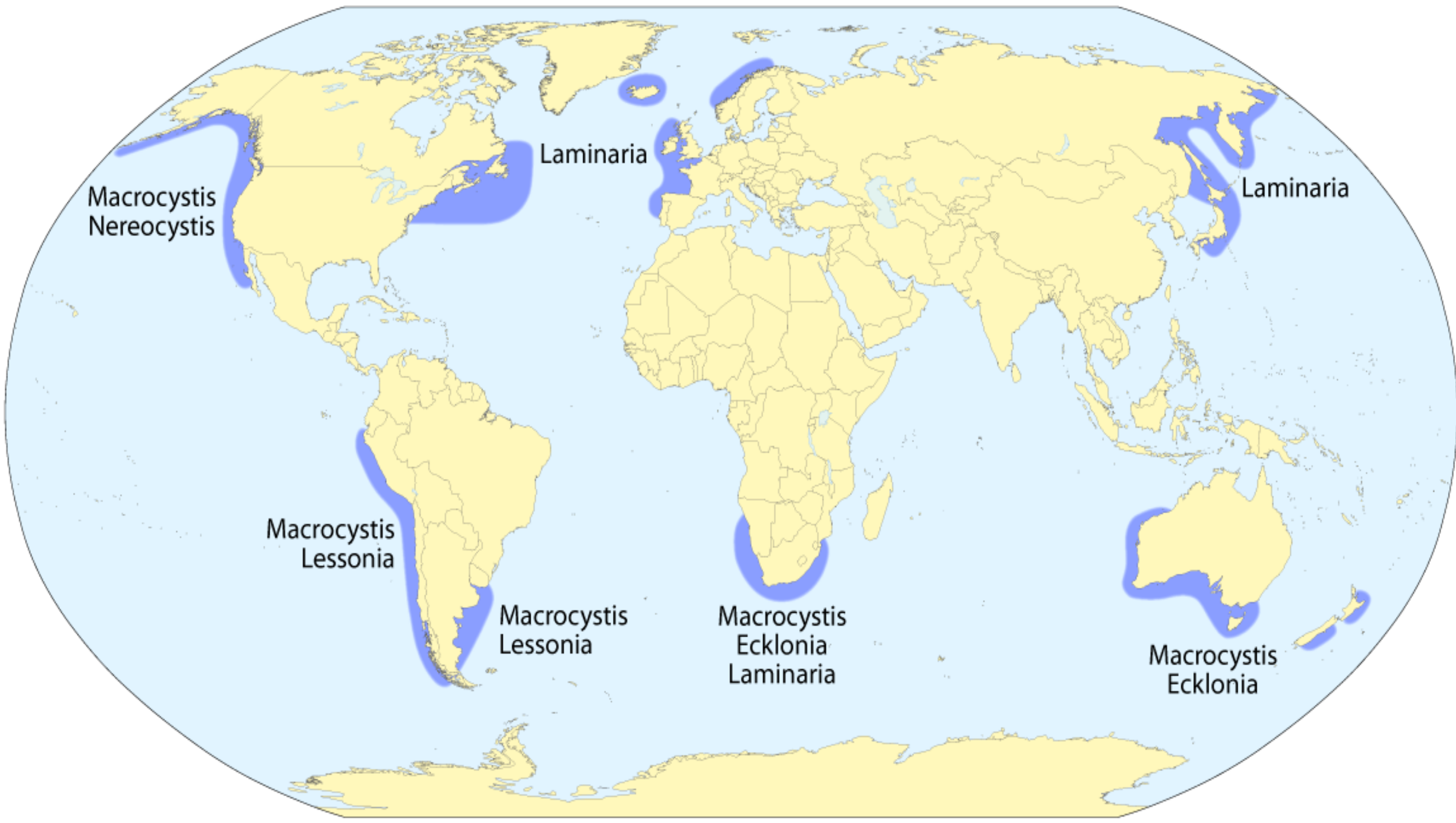
Kelps: πολύ γρήγορη αύξηση (έως 50 cm/day)

Cystoseira: αργή αύξηση, πολυετή είδη

Παράγοντες: φως, θρεπτικά,
θερμοκρασία, υδροδυναμική







■ Phaeophyceae (καφέ φύκη)

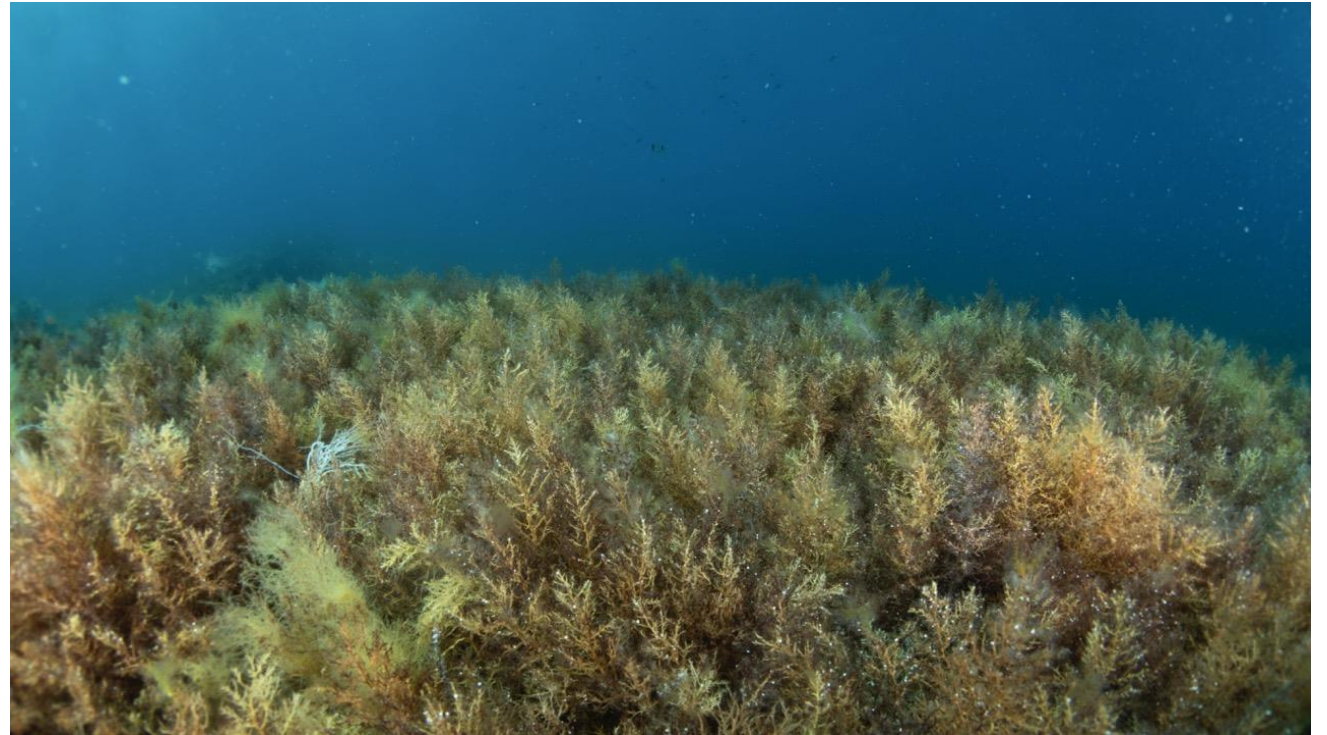
- Κυλινδρικός/ διακλαδιζόμενος θάλλος
παχύς, μηχανικά ανθεκτικός → **μέτρια αντοχή**
σε **Mega Heat Waves (MHWs)**

Μεσογειακά μαρκοφύκη:

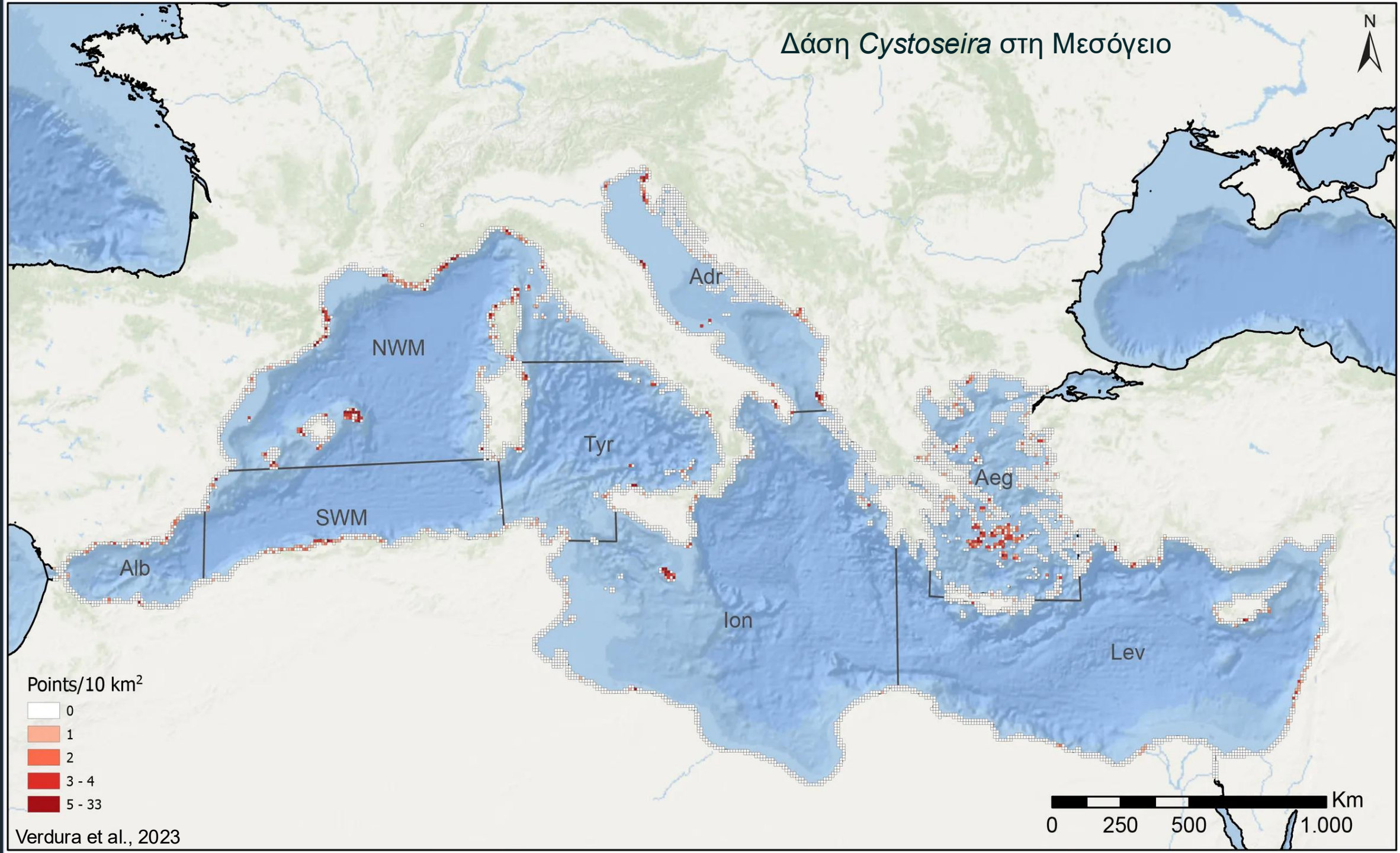
- *Cystoseira*
- *Sargassum* sp



Cystoseira compressa



Δάση *Cystoseira* στη Μεσόγειο





Ενασβεστωμένα ροδοφύκη

Μεσογειακά είδη:

- *Jania rubens*
- *Corallina*
- *Lithophyllum byssoides*



Ροδολιθικοί
πυθμένες

Γιατί τα μακροφύκη δεν αναγνωρίζονται ακόμα απο το IPCC ως οικοσυστήματα μπλε άνθρακα

Κύριοι λόγοι

Η αποθήκευση άνθρακα γίνεται εκτός οικοτόπου (deep sea, submarine canyons, παραλίες)

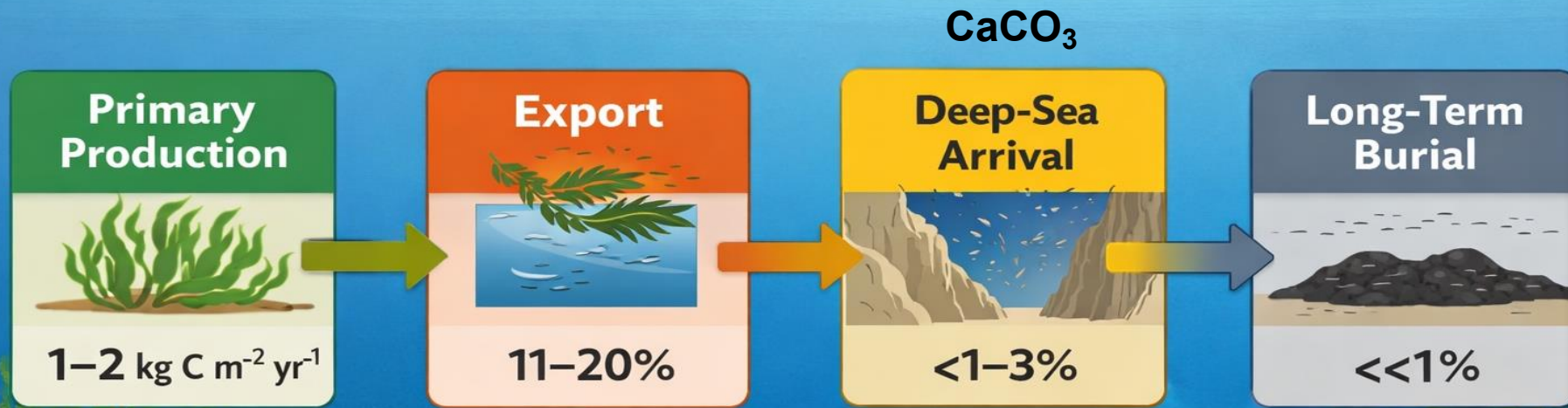
Δεν δημιουργούν δικά τους ιζήματα

Δεν υπάρχει ακόμη επαρκής ποσοτικοποίηση των ροών εξαγωγής

Μεγάλη χωρική μεταβλητότητα και δυσκολία παρακολούθησης

Το IPCC αναγνωρίζει μόνο οικοσυστήματα με in situ burial (μαγκρόβια δάση και θαλάσσια λιβάδια)

Carbon Flux Pathways in Macroalgal Forests



Global Macroalgal Production: $1.3-1.6 \text{ Pg C yr}^{-1}$

- ▀ Ως τώρα, τα μακροφύκη συμβάλλουν σημαντικά στο παράκτιο Blue Carbon, μέσω:

A. Υψηλής πρωτογενούς παραγωγής

- Τα δάση kelp και τα *Sargassum* είναι από τα πιο παραγωγικά οικοσυστήματα.

B. Εξαγωγή και ταφή βιομάζας

- Αποκολλημένα φύκη μεταφέρονται ανοικτά της ακτής και βυθίζονται.
- Ένα μέρος της βιομάζας θάβεται σε ιζήματα.

C. Έμμεσες οικοσυστημικές λειτουργίες

- Σταθεροποίηση ιζημάτων έμμεσα με
- Μείωση διάβρωσης.
- Ενίσχυση βιοποικιλότητας και κύκλων θρεπτικών.

Μόνο η βιομάζα που φτάνει σε βαθιά νερά αποθηκεύεται μακροπρόθεσμα

Η μακροχρόνια αποθήκευση εξαρτάται από το ποσοστό βιομάζας που φτάνει σε βαθιά νερά (εκτιμήσεις: 11–20% της παραγωγής).

Δάση μακροφυκών- κύριες διαδρομές που δε λαμβάνονται υπόψιν Blue Carbon

- Αποκολλημένη βιομάζα μεταφέρεται από ρεύματα σε βαθύτερες ζώνες όπου μπορεί να ταφεί.
- Υποθαλάσσιες χαράδρες λειτουργούν ως παγίδες άνθρακα, ενισχύοντας τη μονιμότητα της ταφής.
- Ξεβρασμένα μακροφύκη θάβονται σε παράκτια ιζήματα, προσφέροντας βραχυπρόθεσμη αποθήκευση.

Βάθος και αποθήκευση άνθρακα

Η βιομάζα πρέπει να καταβυθιστεί σε μεγάλα βάθη:

- Στα ρηχά νερά
 - το CaCO_3 δεν διαλύεται
 - ο άνθρακας δεν αποθηκεύεται μόνιμα
 - η βιομάζα σπάνια φτάνει σε βαθιά νερά.
- Κάτω από το λυσοκλινές → **500–1500 m** → αρχίζει η διάλυση **CaCO_3**
- Κάτω από το Βάθος αντιστάθμισης ανθρακικού ασβεστίου-Compensation Depth (CCD) → **> 4000 m** → πλήρης διάλυση και ενσωμάτωση στο βαθύ ανόργανο ανθρακικό σύστημα

Μόνο το πολύ μικρό ποσοστό της βιομάζας που φτάνει κάτω από τη λυσοκλίνη/CCD συμβάλλει σε μακροχρόνια αποθήκευση άνθρακα.

Ροδολιθικοί πυθμένες

- ❖ Οικοσυστήματα του βυθού από ενασβεστωμένα ροδοφύκη που παράγουν ανθρακικό ασβέστιο.
- ❖ Μελετώνται έντονα σήμερα ως φυσικοί χώροι αποθήκευσης άνθρακα.
- ❖ **Πρόγραμμα RHODOCAR:**
 - Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα που απέδειξε τη συμβολή τους στη μακροχρόνια δέσμευση άνθρακα και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.



Ευαισθησία στην κλιματική αλλαγή

- Πολύ ευαίσθητα σε άνοδο θερμοκρασίας.
- Λόγω αύξησης θερμοκρασίας και όξινισης → Ενασβεστωμένα ροδοφύκη → μείωση ενασβεστοποίησης, αποχρωματισμός, νέκρωση
- **Ακραία και μεγάλα σε διάρκεια φαινόμενα θαλάσσιου** καύσωνα → απώλεια *Cystoseira* & *Sargassum* σε Μεσόγειο, συρρίκνωση kelps, όπως και φυτών όπως η *Posidonia oceanica*.
- Βιομάζα στα ιζήματα μπορεί να οξειδωθεί και να αυξησει εκπομπές CO₂
- Η απώλεια μακροφυκών = απώλεια βιοποικιλότητας (φιλοξενούν ασπόνδυλα, βακτήρια, ψάρια, *Monachus monachus*, θαλάσσιες χελώνες και λειτουργούν ως **Ecosystem engineers** καθώς τροποποιούν ρεύματα και παγιδεύουν σωματίδια

Προκλήσεις στη Μεσόγειο

- Μετατόπιση ειδών προς βορρά.
- Οι δασικές κοινότητες *Cystoseira* και *Sargassum* υποχωρούν, ενώ αυξάνονται **θυσανοειδείς αναπτύξεις (turfs)**.
- Η απώλεια δασών μακροφυκών μειώνει τη **δυναμική δέσμευσης άνθρακα και τη βιοποικιλότητα των παράκτιων οικοσυστημάτων**.

Υποβάθμιση **Δασών** & Επιπτώσεις στις Οικοσυστημικές Λειτουργίες

Παράγοντες υποβάθμισης



Ρύπανση
& Ευτροφισμός



Λιμενικά έργα
& Αλιευτικά δίκτυα



Υπερβόσκηση



Θέρμανση
& Οξίνιση



Εισβολικά είδη



Συνέπειες



Μείωση
Πρωτογένους Παραγωγής



Διαταραχή Κύκλου
Θρεπτικών Ουσιών



Μείωση
Δέσμευσης Άνθρακα



Εκπομπές CO₂

Διαχείριση

Μέτρα προστασίας μακροφυκών

- Περιορισμός ρύπανσης & ευτροφισμού
- Προστασία από υπερβόσκηση (αχινοί, *Sarpa*, *Siganus*)
- Απαγόρευση αγκυροβολίας σε *Cystoseira* / *Posidonia*
- Θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές (MPAs)
- Αποκατάσταση δασών *Cystoseira* (υπάρχουν projects σε Ιταλία, Ισπανία, Ελλάδα)

Διαχείριση καλλιεργειών μακροφυκών

- Τεχνητή καταβύθιση καλλιεργημένων μακροφυκών σε μεγάλα βάθη για ενίσχυση παραγωγής άνθρακα , με υψηλή αβεβαιότητα και οικολογικούς κινδύνους

Χρειάζεται

- Έλεγχος θρεπτικών
- Αποφυγή σκίασης

Σε μελλοντικές έρευνες

Χαρτογράφηση δασών μακροφυκών και ροδολιθικών πυθμένων

Μεσογειακά δάση και ενασβεστωμένα φύκη που σχηματίζουν υφάλους: υποεκτιμημένα

Καταγραφή με σαφήνεια των ροών εξαγωγής

Ανάγκη για deep-sea monitoring

Βιβλιογραφία

- Doblas-Reyes, F. J., Sörensson, A. A., Almazroui, M., Dosio, A., Gutowski, W. J., Haarsma, R., Hamdi, R., Hewitson, B., Kwon, W.-T., Lamptey, B. L., Maraun, D., Stephenson, T. S., Takayabu, I., Terray, L., Turner, A., & Zuo, Z. (2021). Linking global to regional climate change. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Ö. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1363–1512). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Duarte, B., Martins, I., Rosa, R., Matos, A. R., Roleda, M. Y., Reusch, T. B. H., Engelen, A. H., Serrão, E. A., Pearson, G. A., Marques, J. C., Caçador, I., Duarte, C. M., & Jueterbock, A. (2018). Climate Change Impacts on Seagrass Meadows and Macroalgal Forests: An Integrative Perspective on Acclimation and Adaptation Potential. *Frontiers in Marine Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00190>
- Duarte, C., Losada, I. J., Hendriks, I., Mazarrasa, I., & Marba, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3, 961–968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Duarte, C. M., Gattuso, J.-P., Hancke, K., Gundersen, H., Filbee-Dexter, K., Pedersen, M. F., Middelburg, J. J., Burrows, M. T., Krumhansl, K. A., Wernberg, T., Moore, P., Pessarrodona, A., Ørberg, S. B., Pinto, I. S., Assis, J., Queirós, A. M., Smale, D. A., Bekkby, T., Serrão, E. A., & Krause-Jensen, D. (2022). Global estimates of the extent and production of macroalgal forests. *Global Ecology and Biogeography*, 31(7), 1422–1439. <https://doi.org/10.1111/geb.13515>
- Effects of climate change factors on marine macroalgae: A review. (2021). In *Advances in Marine Biology* (Vol. 88, pp. 91–136). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.amb.2020.11.001>
- Filbee-Dexter, K., & Wernberg, T. (2020). Substantial blue carbon in overlooked Australian kelp forests. *Scientific Reports*, 10(1), 12341. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69258-7>
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., Golledge, N. R., Hemer, M., Kopp, R. E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A. B. A., & Yu, Y. (2021). Ocean, cryosphere, and sea level change. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Ö. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1211–1362). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

Garrabou, J., Gómez-Gras, & Cerrano, C. (n.d.). *Global Change Biology | Environmental Change Journal | Wiley Online Library*. Retrieved 24 May 2026, from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.16301>

Green-Gavrielidis, L. A., & Thorner, C. S. (2022). Will Climate Change Enhance Algal Blooms? The Individual and Interactive Effects of Temperature and Rain on the Macroalgae *Ulva*. *Estuaries and Coasts*, 45(6), 1688–1700. <https://doi.org/10.1007/s12237-022-01048-y>

Handayani, T., Zulpikar, F., & Kusnadi, A. (2022). The roles of macroalgae in climate change mitigation: Opportunities and challenges for marine-based carbon donor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1119(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1119/1/012014>

Hanley, M. E., Firth, L. B., & Foggo, A. (n.d.). *Victim of changes? Marine macroalgae in a changing world*. Retrieved 16 May 2026, from <https://dx.doi.org/10.1093/aob/mcad185>

Howard, J., Sutton-Grier, A. E., Smart, L. S., Lopes, C. C., Hamilton, J., Kleypas, J., Simpson, S., McGowan, J., Pessarrodona, A., Alleway, H. K., & Landis, E. (2023). Blue carbon pathways for climate mitigation: Known, emerging and unlikely. *Marine Policy*, 156, 105788. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105788>

Ji, Y., Xu, Z., Zou, D., & Gao, K. (2016). Ecophysiological responses of marine macroalgae to climate change factors. *Journal of Applied Phycology*, 28(5), 2953–2967. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0840-5>

Kendrick, M. A., Hémond, C., Kamenetsky, V. S., Danyushevsky, L., Devey, C. W., Rodemann, T., Jackson, M. G., & Perfit, M. R. (2017). Seawater cycled throughout Earth's mantle in partially serpentinized lithosphere. *Nature Geoscience*, 10(3), 222–228. <https://doi.org/10.1038/ngeo2902>

Koch, M., Bowes, G., Ross, C., & Zhang, X.-H. (2013). Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae. *Global Change Biology*, 19(1), 103–132. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02791.x>

Βιβλιογραφία

- Krause-Jensen, D., & Duarte, C. M. (2016). Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*, 9(10), 737–742. <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
- Krause-Jensen, D., Lavery, P., Serrano, O., Marbà, N., Masque, P., & Duarte, C. M. (2018). Sequestration of macroalgal carbon: The elephant in the Blue Carbon room. *Biology Letters*, 14(6), 20180236. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0236>
- Kuwae, T., Watanabe, A., Yoshihara, S., Suehiro, F., & Sugimura, Y. (2022). Implementation of blue carbon offset crediting for seagrass meadows, macroalgal beds, and macroalgae farming in Japan. *Marine Policy*, 138, 104996. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.104996>
- Monserrat Barcelo, M. (2023). *Marine forests loss: Causes and effects in the framework of their conservation and restoration* (Issue 2023COAZ4011) [Theses, Université Côte d'Azur]. <https://theses.hal.science/tel-04071065>
- Pessarrodona, A., Franco-Santos, R. M., Wright, L. S., Vanderklift, M. A., Howard, J., Pidgeon, E., Wernberg, T., & Filbee-Dexter, K. (2023). Carbon sequestration and climate change mitigation using macroalgae: A state of knowledge review. *Biological Reviews*, 98(6), 1945–1971. <https://doi.org/10.1111/brv.12990>
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., Dessai, S., Islam, A. S., Rahimi, M., Ruiz Carrascal, D., Sillmann, J., Sylla, M. B., Tebaldi, C., Wang, W., & Zaaboul, R. (2021). Climate change information for regional impact and for risk assessment. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Ö. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1767–1926). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Román, M., Román, S., Vázquez, E., Troncoso, J., & Olabarria, C. (2020). Heatwaves during low tide are critical for the physiological performance of intertidal macroalgae under global warming scenarios. *Scientific Reports*, 10(1), 21408. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78526-5>
- Schindler Murray, L., Milligan, B., Ashford, O. S., Bonotto, E., Cifuentes-Jara, M., Glass, L., Howard, J., Landis, E., Northrop, E., Roth, N., Thiele, T., Aigrette, L., Gil, L., Hamilton, J., Herr, D., Loureiro, T. G., Millington-Drake, M., Neilson, C., Pessarrodona, A., ... Von Unger, M. (2023). *The blue carbon handbook: Blue carbon as a nature-based solution for climate action and sustainable development*. World Resources Institute. <https://doi.org/10.69902/566a16de>
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Ö. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1513–1766). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Tsiamis, K., Panayotidis, P., Salomidi, M., Pavlidou, A., Kleinteich, J., Balanika, K., & Küpper, F. C. (2013). Macroalgal community response to re-oligotrophication in Saronikos Gulf. *Marine Ecology Progress Series*, 472, 73–85. <https://doi.org/10.3354/meps10060>
- Verdura, J., Rehues, L., Mangialajo, L., Frascetti, S., Belattmania, Z., Bianchelli, S., Blanfuné, A., Sabour, B., Chiarore, A., Danovaro, R., Fabbri, E., Giakoumi, S., Iveša, L., Katsanevakis, S., Kytiou, E., Nasto, I., Nikolaou, A., Orfanidis, S., Rilov, G., ... Cebrian, E. (2023). Distribution, health and threats to Mediterranean macroalgal forests: Defining the baselines for their conservation and restoration. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1258842>
- Winther, J.-G., Dai, M., Rist, T., Hoel, A. H., Li, Y., Trice, A., Morrissey, K., Meñez, M. A., Fernandes, L., Unger, S., Scarano, F., Halpin, P., & Whitehouse, S. (2020). Integrated ocean management for a sustainable ocean economy. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1259-6>
- Assis, J., Fragkopoulou, E., Gouvêa, L., Araújo, M., & Serrao, E. (2024). Kelp forest diversity under projected end-of-century climate change. *Diversity and Distributions*, 30. <https://doi.org/10.1111/ddi.13837>

An underwater scene featuring a large school of small, silvery fish swimming in a blue, sunlit environment. The fish are densely packed in some areas, particularly on the left and bottom right. Large, yellowish-brown seaweed fronds hang from the top, creating a forest-like structure. A few larger, darker fish are also visible, including one prominent dark fish in the upper right. The overall atmosphere is serene and natural.

Ευχαριστώ πολύ για την προσοχή σας!