

Best practices for the management of low-elevation Mediterranean pine forests to optimize carbon and water balance in the context of climate change

Developed in the framework of the project "Management of Mediterranean pine forest for optimizing carbon and water balance under climate change" (PineOptim) (2024-2025)



**Carbon
Sequestration**



**Resilience to
Drought**



**Adaptive
management**

The "PineOptim" project is implemented within the framework of the action of H.F.R.I. "Funding of Basic Research (Horizontal Support of all Sciences)" of the National Recovery and Resilience Plan "Greece 2.0", funded by the European Union – NextGenerationEU (HFRI Project Number: 016258).

The challenges under the climate change regime



The low-elevation Mediterranean pine forests, and especially the ecosystems of Aleppo pine (*Pinus halepensis*) and Brutian pine (*Pinus brutia*), have a high ecological and socio-economic value. They make a substantial contribution to carbon sequestration and biodiversity conservation.

Climate change intensifies drought and increases temperatures, placing significant pressure on the water balance of pine forests and reducing their resilience.



At the same time, the more frequent and severe occurrence of forest fires threatens the structure, function, and long-term sustainability of Mediterranean pine forests.



The **PineOptim** project evaluates and proposes forest management practices that enhance the water and carbon balance in low-elevation pine forests. Through systematic ecological monitoring, it identifies best practices that support forests' adaptation to climate change and enhance their potential to mitigate its impacts.

This brochure brings together the scientific results of the project, providing evidence-based and actionable guidelines for researchers and students, forest and environmental policymakers, and forest managers in the public and private sectors.

Methodology of PineOptim



The overall objective of the **PineOptim** project was to propose management practices that **optimize carbon sequestration** and **water use efficiency** in low-elevation pine forests, under current and **expected climate conditions**. The methodology included:



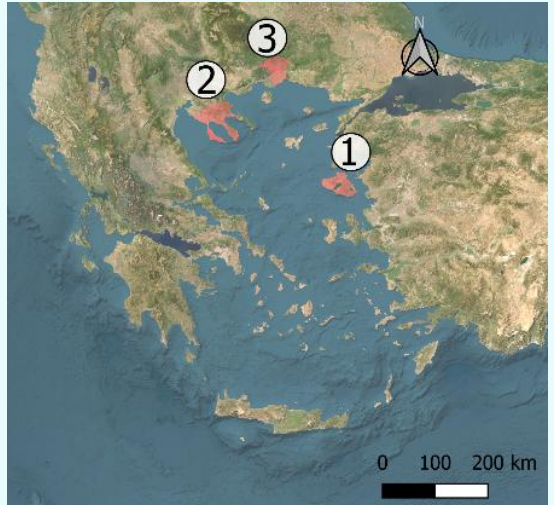
Development of a common, harmonized monitoring protocol.



Collection and analysis of field data on carbon and water fluxes.

Applied to:

1. Natural *P. brutia* forests of Lesvos: different post-fire age and no management interventions.
2. A natural coastal forest of Aleppo pine in Sani, Chalkidiki: removal of the understory - overstory of different densities.
3. Peri-urban forest of *P. brutia* in Xanthi: Different thinning intensity of the overstory.



Evaluation of the effect of alternative management practices on the productivity of the Brutian and Aleppo pine ecosystems.



Development of a model for estimating ecosystem productivity and fire risk under different climate change scenarios.

Continuous monitoring in the field:

Use of low-cost and easy-to-use sensors by non-specialized personnel to measure tree growth and microclimatic soil and air parameters.



Field sampling and measurements:

- Biometric data for the estimation of biomass on the overstory and understory vegetation.
- Measurements of photosynthesis, water potential, and moisture content in needles and twigs.
- Measurements of soil respiration, decomposition of the forest floor, and biomass accumulation through litterfall.

Modeling:

A mechanistic model was used that simulates the carbon fluxes in each tree. The model was fed with all the above-mentioned data to estimate productivity at the ecosystem level and was validated against actual carbon and water fluxes data from an Eddy covariance tower. The validated model was used to produce simulations under different climate and forest management scenarios.





Net Ecosystem Productivity – NEP *

NEP expresses the amount of carbon captured or released annually by an ecosystem, such as a forest.

Integrated Fire Index – IFI *

The IFI indicator estimates the potential risk of a fire ignition based on the microclimatic conditions of the understory vegetation, the density and moisture content of the vegetation, as well as meteorological factors. IFI values range from 1 to 5, with 1 indicating a low risk of fire ignition and 5 indicating a high risk. The index does not refer to the fire's spatial spread and extinguishment.



Local climate change scenarios

SSP2 4.5 (Moderate scenario): If the current increasing trend in greenhouse gas concentrations continues until 2050 and is leveled thereafter, an increase in mean annual temperature of 1.8–2.3 °C and an increase in annual precipitation of approximately 2–12% are projected by the end of the century.



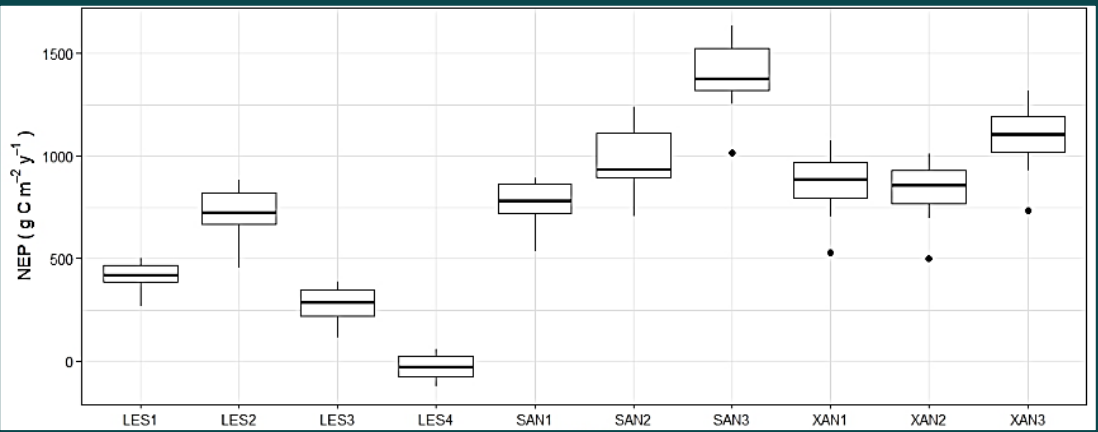
SSP5 8.5 (Pessimistic scenario): If the combustion of fossil fuels and the continuous increase in greenhouse gas concentrations persist, an increase in mean annual temperature of 4.0–4.7 °C and a decrease in annual precipitation of approximately 15–20% are projected by the end of the century.

** The NEP and IFI results of the present guidelines derive from the simulations of the model developed within the project.*

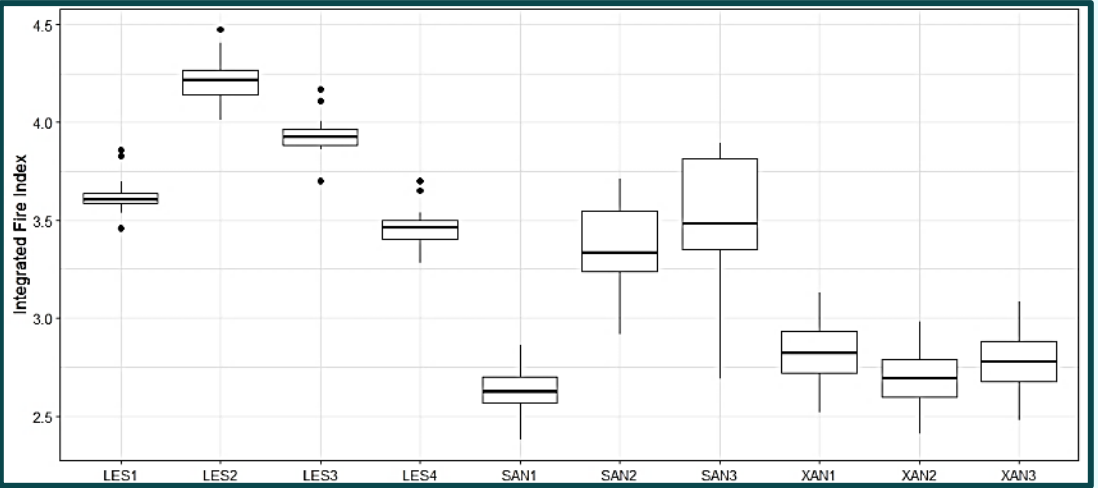
Simulation Results



Carbon sequestration and fire ignition risk under current conditions



Net Ecosystem Productivity (NEP) across all study stands of the PineOptim project during the period 2013–2025 under current management practices



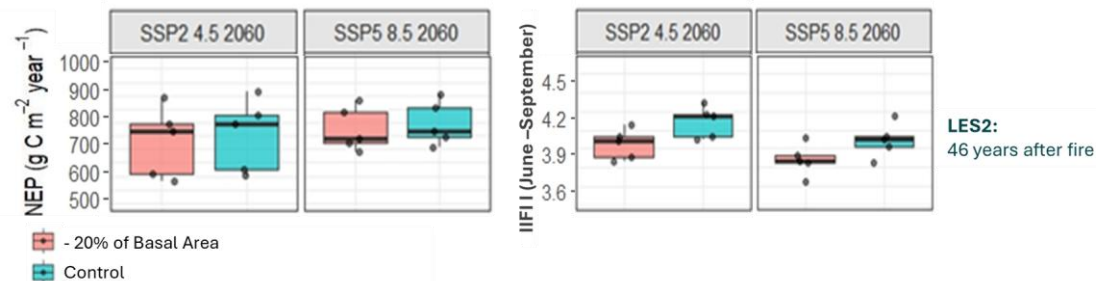
Integrated Fire Index (IFI) across all study stands of the PineOptim project during the dry-hot season (June–September, 2013–2025) under current management practises

LES1: 20 post-fire years
LES2: 46 post-fire years
LES3: 78 post-fire years
LES4: 92 post-fire years
(no management interventions)

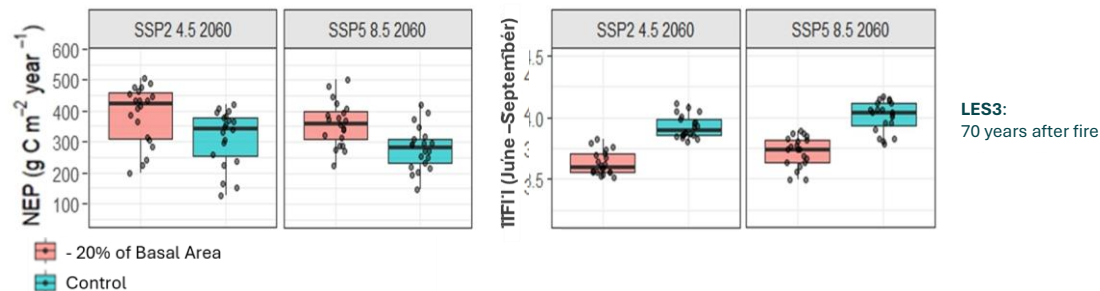
SAN1: No intervention, low
understory & overstory density
SAN2: Understory removal
SAN3: No intervention, high
understory & overstory density

XAN1: No overstory thinning
XAN2: Moderate overstory thinning
XAN3: Intensive overstory thinning

Lesvos – Simulation Results of NEP and IFI (overstory thinning & climate scenarios)



Estimated Net Ecosystem Productivity (NEP) and Fire Ignition Risk Index (IFI) in 2060 for 46-year-old Aleppo pine stands in Lesvos, **if moderate overstory thinning (removal of 20% of basal area)** is applied instead of the current absence of management interventions, based on the moderate (SSP2 4.5) and pessimistic (SSP5 8.5) climate scenarios.



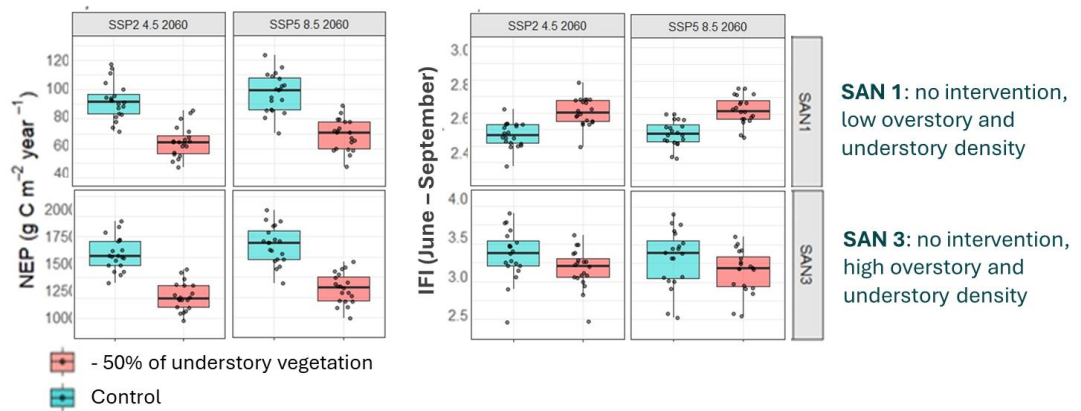
Estimated Net Ecosystem Productivity (NEP) and Fire Ignition Risk Index (IFI) in 2060 for approximately 70-year-old Aleppo pine stands in Lesvos, **if intensive overstory thinning (removal of 40% of basal area)** is applied instead of the current absence of management interventions, based on the moderate (SSP2 4.5) and pessimistic (SSP5 8.5) climate scenarios.

In the studied stands of Lesvos:

- ✓ Under both climate scenarios, moderate thinning at around 45 years of age enhances fire protection without negatively affecting carbon sequestration.
- ✓ Intensive thinning at around 70 years of age increases long-term carbon sequestration by approximately 25% and at the same time reduces the fire ignition risk by approximately 8% (mean values across both climate scenarios).

Sani, Chalkidiki – Simulation Results of NEP and IFI

(understory removal & climate scenarios)



Estimated Net Ecosystem Productivity (NEP) and Fire Ignition Risk Index (IFI) in 2060 for Aleppo pine stands in Sani, Chalkidiki, **if 50% understory removal is applied in stands with low or high overstory and understory density**, based on the moderate (SSP2 4.5) and pessimistic (SSP5 8.5) climate scenarios

In the studied stands in Sani, Chalkidiki:

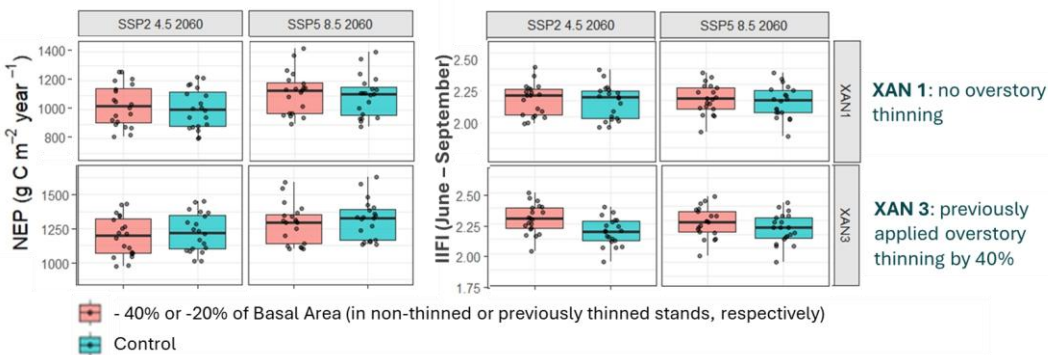
- With low overstory and understory density, removal of 50% of the understory vegetation is expected to lead to:

- ✓ A decrease in carbon sequestration of approximately 30% (mean values across both climate scenarios).
- ✓ An increase in fire ignition risk of approximately 5% (mean values across both climate scenarios).

- With high overstory and understory density, removal of 50% of the understory vegetation is expected to lead to:

- ✓ A decrease in carbon sequestration of approximately 25% (mean values across both climate scenarios).
- ✓ A decrease in fire ignition risk of approximately 5% (mean values across both climate scenarios).

Xanthi – Simulation Results of NEP and IFI (overstory thinning & climate scenarios)



Estimated Net Ecosystem Productivity (NEP) and Fire Ignition Risk Index (IFI) in 2060 for Aleppo pine stands in Xanthi, **if 40% overstory thinning is applied to a stand with no previous thinning (XAN1) or 20% thinning is applied to a stand that underwent 40% thinning 10 years ago (XAN3)**, based on the moderate (SSP2 4.5) and pessimistic (SSP5 8.5) climate scenarios.

In the studied areas in Xanthi, under both climate scenarios:

- Strong overstory thinning (40% of basal area) in a stand with no previous thinning is expected to lead to:
 - ✓ A slight increase in carbon sequestration (approximately 3% on average across both climate scenarios).
 - ✓ No change in fire ignition risk.
- Repetition of overstory thinning, even moderate (20% reduction of basal area), within a 10-year period, is expected to lead to:
 - ✓ A decrease in carbon sequestration.
 - ✓ No significant change in fire ignition risk.

Best Practices

(For low-elevation pine stands originating from natural post-fire regeneration, without management interventions)



Proposed best management practices to increase carbon sequestration and reduce fire ignition risk:

- **Moderate thinning (up to 20% of basal area) between 20 and 40 years of age**, mainly to reduce competition and enhance fire protection.
- **Strong selective thinning (up to 40% of basal area) after 45 years, and no later than around 70 years of age**, to allow the establishment of native broadleaf species.
- **Regeneration thinning after 70 years of age** to promote natural regeneration of the stands.

Note: These recommendations apply on the condition that the stands are protected from grazing.



LES1: 20 post-fire years



LES2: 46 post-fire years



LES3: 78 post-fire years



LES4: 92 post-fire years

Best Practices

(For natural coastal pine forests, where understory removal of evergreen broadleaf species is applied for fire protection)



Proposed best management practices to increase carbon sequestration and reduce fire ignition risk:

- **Understory removal should not exceed 50% of understory ground cover**, as higher percentages lead to a strong reduction in carbon sequestration potential.
- **In stands with sparse overstory, 50% understory removal should be avoided**, because this practice not only reduces ecosystem productivity but also increases fire ignition risk due to changes in the microclimatic conditions.
- **Reforestation with pine** (using seeds from the local area) where natural regeneration is low, due to adverse climatic conditions.



SAN1:

No intervention, low understory & overstory density



SAN2:

Understory removal



SAN3:

No intervention, high understory & overstory density

Best Practices

(For managed peri-urban pine forests originating from plantations, where moderate or intensive overstory thinning has already been applied)

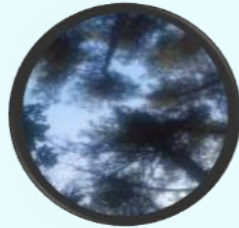
Proposed best management practices to increase carbon sequestration and reduce fire ignition risk:

- **Strong thinning (40% of overstory basal area)**, because the development of an understory of native broadleaf species increases ecosystem productivity, and therefore carbon sequestration, without increasing fire ignition risk.
- **Thinning should not be repeated within a period shorter than 10 years.**
- The ultimate goal should be natural forest regeneration and the **creation of broadleaf or mixed broadleaf-conifer forests**, depending on local conditions.

10 years post-intervention



XAN1:
No overstory
thinning



XAN2:
Moderate
overstory
thinning



XAN3:
Intensive
overstory
thinning

Mediterranean pine forests are under increasing pressure, as climate change intensifies xerothermic conditions and the frequency and severity of wildfires. The results of the **PineOptim** project show that the contribution of these ecosystems to mitigating the impacts of climate change is critically influenced by the management practices applied.

Management of low-elevation Mediterranean pine forests should not focus solely on fire protection or carbon sequestration, but rather on **balancing ecosystem productivity, fire protection, and long-term sustainability**. An integrated approach, **based on combined evaluation of indicators such as NEP and IFI and the use of models**, supports evidence-based decision-making for the long-term sustainability of low-elevation Mediterranean pine forests.

The monitoring protocols developed (Eleftheriadou et al., 2026), along with the proposed best practices emerging from the **PineOptim** project, provide a framework to support climate-adapted management of low-elevation Mediterranean pine forests.

Climate-adapted management is required, using appropriate indicators and models, along with the implementation of contemporary management plans.

*Eleftheriadou, N., Mantzari, E. D., Kiorapostolou, N., Sazeides, C. I., Xanthopoulos, G., Markos, N., Spyroglou, G., Bintsi-Frantzi, E., Gouvas, A., Dimitrakopoulos, P. G., Fotelli, M. N., Radoglou, K., & Fyllas, N. M. (2026). An Integrated Monitoring Protocol to Study the Effects of Management on the C Sequestration Potential of Mediterranean Pine Ecosystems. *Methods and Protocols*, 9(1), 18. <https://doi.org/10.3390/mps9010018>*



Management of Mediterranean pine forest for optimizing carbon and water balance under climate change



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΡΑΚΗΣ

DEMOCRITUS
UNIVERSITY
OF THRACE



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ
UNIVERSITY OF THE
AEGEAN



ELGO - DIMITRA
HELLENIC AGRICULTURAL
ORGANIZATION - DIMITRA

Forestry and Management
of the Environment and
Natural Resources

Department of
Environment

Forest Research
Institute

Sazeides CI, Kiorapostolou N, Eleftheriadou N, Mantzari ED, Xanthopoulos G, Bintsli-Frantzi E, Gouvas A, Sinodinos, AD, Fyllas NM, Fotelli MN, Dimitrakopoulos PG, Spyroglou G, Markos N, Milios E, Kitikidou K, & Radoglou K (2025). *Best practices for the management of low-elevation Mediterranean pine forests to optimize carbon and water balance in the context of climate change*. Available online: <https://pineoptim.fmenr.duth.gr/>

Contact Information:

Radoglou Kalliopi: kradoglo@fmenr.duth.gr

Dimitrakopoulos Panayiotis: pdimi@aegean.gr

Fotelli Mariangela: fotelli@elgo.gr



PineOptim



pine_optim



The "PineOptim" project is implemented within the framework of the action of H.F.R.I. "Funding of Basic Research (Horizontal Support of all Sciences)" of the National Recovery and Resilience Plan "Greece 2.0", funded by the European Union – NextGenerationEU (HFRI Project Number: 016258).



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Ελλάδα 2.0
ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΚΑΜΨΗΣ
ΚΑΙ ΑΝΕΣΤΗΡΙΣΤΙΚΤΗΤΑΣ



Με τη χρηματοδότηση
της Ευρωπαϊκής Ένωσης
NextGenerationEU



ΕΛΙΔΕΚ
Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας

Βέλτιστες πρακτικές για τη διαχείριση των μεσογειακών πευκοδασών χαμηλού υψομέτρου για αριστοποίηση του ισοζυγίου άνθρακα και νερού στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής

Αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου «Διαχείριση των Μεσογειακών δασών πεύκης για αριστοποίηση του ισοζυγίου άνθρακα και νερού υπό την κλιματική αλλαγή» (PineOptim) (2024-2025)



**Carbon
Sequestration**



**Resilience to
Drought**



**Adaptive
management**

Το έργο «PineOptim» υλοποιείται στα πλαίσια της δράσης του ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. «Χρηματοδότηση Βασικής Έρευνας (Οριζόντια υποστήριξη όλων των Επιστημών)» του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0», με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης – NextGenerationEU (Αριθμός Έργου ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.: 016258).

Οι προκλήσεις υπό το καθεστώς της κλιματικής αλλαγής



Τα μεσογειακά δάση πεύκης χαμηλού υψομέτρου, και ιδιαίτερα τα οικοσυστήματα της Χαλεπίου πεύκης (*Pinus halepensis*) και της Τραχείας πεύκης (*Pinus brutia*), έχουν υψηλή οικολογική και κοινωνικοοικονομική αξία. Συμβάλλουν ουσιαστικά στη δέσμευση άνθρακα και στη διατήρηση της βιοποικιλότητας.

Η κλιματική αλλαγή επιφέρει εντεινόμενες περιόδους ξηρασίας και αυξημένες θερμοκρασίες, ασκώντας σοβαρές πιέσεις στο υδατικό ισοζύγιο των πευκοδασών και μειώνοντας την ανθεκτικότητά τους.



Παράλληλα, η συχνότερη και σφοδρότερη εκδήλωση δασικών πυρκαγιών απειλεί τη δομή, τη λειτουργία και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των μεσογειακών πευκοδασών.



Το έργο **PineOptim** αξιολογεί και προτείνει πρακτικές δασικής διαχείρισης που ενισχύουν το ισοζύγιο νερού και άνθρακα στα πευκοδάση χαμηλού υψομέτρου. Μέσω συστηματικής οικολογικής παρακολούθησης, προσδιορίζει βέλτιστες πρακτικές που υποστηρίζουν την προσαρμογή των δασών στην κλιματική αλλαγή και ενισχύουν το δυναμικό τους για μετριασμό των επιπτώσεών της.

Το παρόν έντυπο συγκεντρώνει τα επιστημονικά αποτελέσματα του έργου, παρέχοντας τεκμηριωμένες και εφαρμόσιμες κατευθυντήριες οδηγίες για ερευνητές/τριες και φοιτητές/τριες, στελέχη χάραξης δασικής και περιβαλλοντικής πολιτικής και διαχειριστές δασών στον δημόσιο₃ και ιδιωτικό τομέα.

Ο γενικός στόχος του έργου **PineOptim** ήταν η πρόταση **πρακτικών διαχείρισης** που **βελτιστοποιούν την αποθήκευση άνθρακα** και την **αποδοτικότητα χρήσης νερού** στα δάση πεύκης χαμηλού υψομέτρου, υπό τις τρέχουσες και **αναμενόμενες κλιματικές συνθήκες**. Η μεθοδολογία περιελάμβανε:



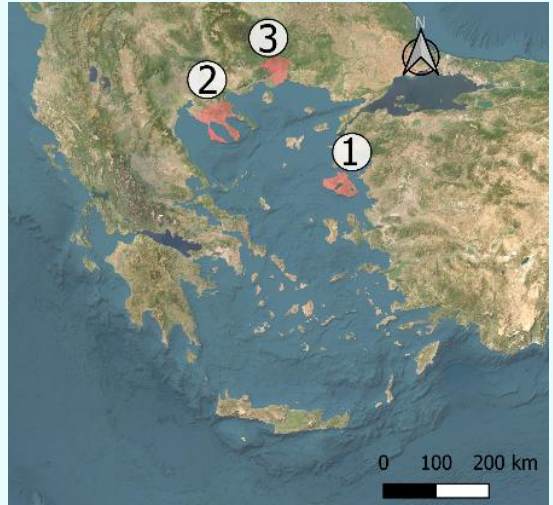
Ανάπτυξη ενός κοινού, εναρμονισμένου πρωτοκόλλου παρακολούθησης.



Συλλογή και ανάλυση δεδομένων πεδίου σχετικά με τις ροές άνθρακα και νερού.

Εφαρμογή σε:

1. Φυσικά δάση Τραχείας πεύκης Λέσβου: διαφορετική μετα-πυρική ηλικία και έλλειψη διαχειριστικών επεμβάσεων.
2. Φυσικό παράκτιο δάσος Χαλεπίου πεύκης στη Σάνη Χαλκιδικής: αραιώση του υπορόφου / ανώροφος διαφορετικής πυκνότητας.
3. Περιαστικό δάσος Τραχείας πεύκης Ξάνθης: Διαφορετική έντασης αραιώση του ανωρόφου.



Αξιολόγηση της επίδρασης διαφορετικών εναλλακτικών πρακτικών διαχείρισης στην παραγωγικότητα των οικοσυστημάτων Τραχείας και Χαλεπίου πεύκης.



Ανάπτυξη μοντέλου εκτίμησης της παραγωγικότητας και του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς υπό διαφορετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Διαρκής παρακολούθηση στο πεδίο:

Χρήση αισθητήρων μικρού κόστους και εύκολης χρήσης από μη εξειδικευμένο προσωπικό για τη μέτρηση της αύξησης των δέντρων και των μικροκλιματικών παραμέτρων εδάφους και αέρα.



Δειγματοληψίες και μετρήσεις πεδίου:

- Βιομετρικά δεδομένα για εκτίμηση βιομαζών σε ανώροφο και υπόροφο.
- Μετρήσεις φωτοσύνθεσης, υδατικού δυναμικού και περιεχόμενης υγρασίας σε βελόνες και κλαδίσκους.
- Μετρήσεις εδαφικής αναπνοής, αποσύνθεσης του δασικού τάπητα και συσσώρευσης βιομάζας μέσω φυλλόπτωσης.

Μοντελοποίηση:

Χρησιμοποιήθηκε ένα μηχανιστικό μοντέλο που προσομοιώνει τις ροές άνθρακα του δέντρου και τον κίνδυνο έναρξης πυρκαγιάς της συστάδας. Το μοντέλο τροφοδοτήθηκε με όλα τα ανωτέρω δεδομένα για να εκτιμηθεί η παραγωγικότητα του οικοσυστήματος και επαληθεύτηκε με πραγματικά δεδομένα από πύργο καταγραφής ροών άνθρακα και νερού. Το επαληθευμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της παραγωγικότητας οικοσυστήματος και του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς υπό διαφορετικά σενάρια κλιματικών συνθηκών και διαχείρισης.



Καθαρή Παραγωγικότητα Οικοσυστήματος (Net Ecosystem Productivity – NEP) *



Η NEP εκφράζει την ποσότητα του άνθρακα που δεσμεύεται ή εκλύεται ετησίως από ένα οικοσύστημα, όπως το δάσος.

Δείκτης κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς (Integrated Fire Index – IFI) *



Ο δείκτης IFI εκτιμά τον δυνητικό κίνδυνο έναρξης πυρκαγιάς με βάση τις μικροκλιματικές συνθήκες του υπορόφου, την πυκνότητα και την περιεχόμενη υγρασία της βλάστησης, καθώς και μετεωρολογικούς παράγοντες. Οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από 1 έως 5, με το 1 να υποδηλώνει χαμηλό κίνδυνο έναρξης πυρκαγιάς και το 5 υψηλό κίνδυνο. Ο δείκτης δεν αφορά στη χωρική εξάπλωση και καταπολέμηση της πυρκαγιάς.

Τοπικά σενάρια κλιματικής αλλαγής

SSP2 4.5 (μετριοπαθές σενάριο): Εάν η τρέχουσα τάση αύξησης της συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου συνεχιστεί έως το 2050 και μετριαστεί στη συνέχεια, προβλέπεται άνοδος της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά 1,8 – 2,3 °C και αύξηση της ετήσιας βροχόπτωσης κατά 2 – 12 % περίπου, έως το τέλος του αιώνα.

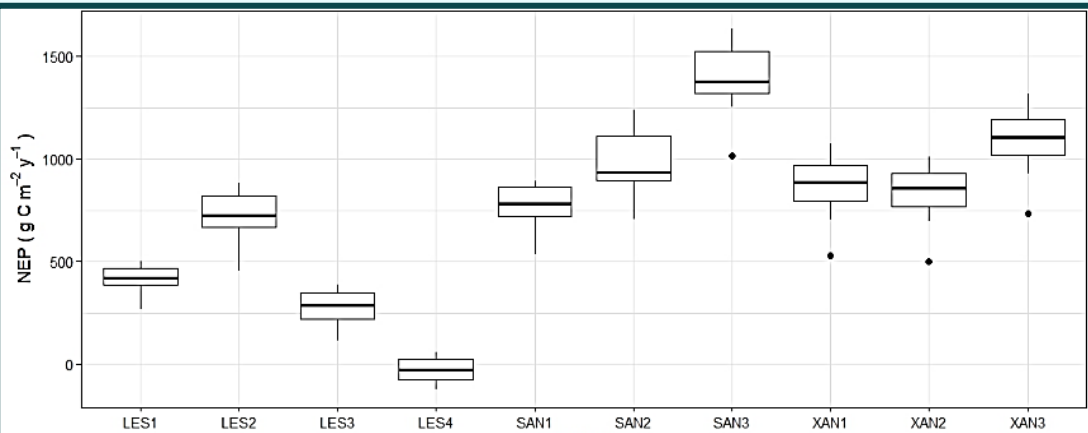
SSP5 8.5 (δυσμενές σενάριο): Εάν συνεχιστεί η καύση ορυκτών καυσίμων και η συνεχής αύξηση της συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου, προβλέπεται άνοδος της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κατά 4,0 – 4,7 °C και μείωση της ετήσιας βροχόπτωσης κατά 15 – 20% περίπου, έως το τέλος του αιώνα.

* Τα αποτελέσματα NEP και IFI του παρόντος οδηγού προέρχονται από τις προσομοιώσεις του μοντέλου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου.

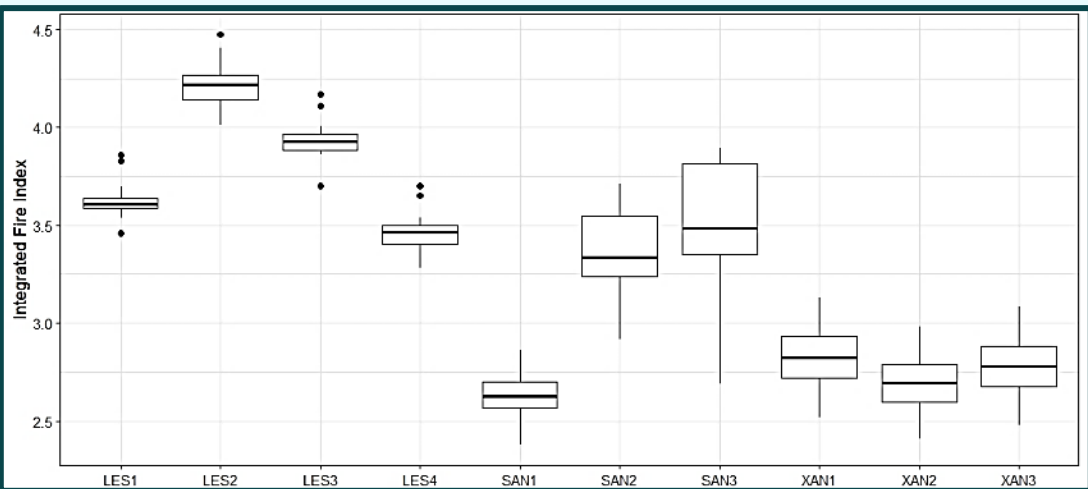
Αποτελέσματα προσομοιώσεων



Αποθήκευση άνθρακα & κίνδυνος έναρξης πυρκαγιάς
υπό υφιστάμενες συνθήκες



Καθαρή Παραγωγικότητα του οικοσυστήματος (NEP) σε όλες τις συστάδες μελέτης του έργου PineOptim κατά την περίοδο 2013-2025 με βάση την υφιστάμενη διαχείριση.



Δείκτης κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς (IFI) σε όλες τις συστάδες μελέτης του έργου PineOptim στην ξηροθερμική περίοδο (Ιούνιος - Σεπτέμβριος, 2013-2025) με βάση την υφιστάμενη διαχείριση

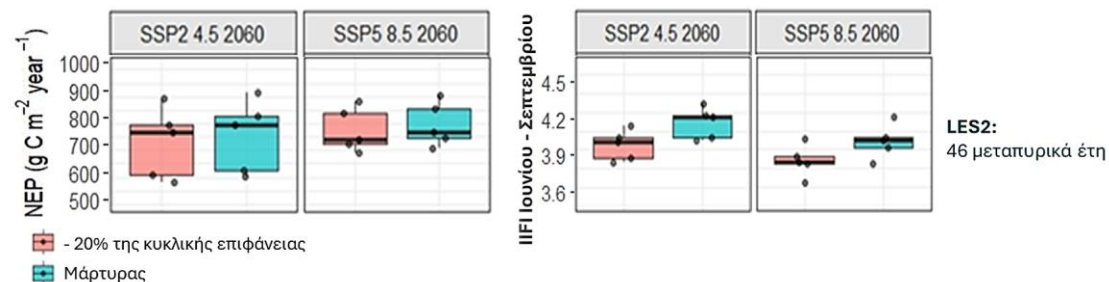
LES1: 20 μεταπτυρικά έτη
LES2: 46 μεταπτυρικά έτη
LES3: 78 μεταπτυρικά έτη
LES4: 92 μεταπτυρικά έτη
(χωρίς διαχειριστικές επεμβάσεις)

SAN1: Χωρίς επέμβαση, χαμηλή
πυκνότητα υπορόφου & ανωρόφου
SAN2: Αφαίρεση υπορόφου
SAN3: Χωρίς επέμβαση, υψηλή
πυκνότητα υπορόφου & ανωρόφου

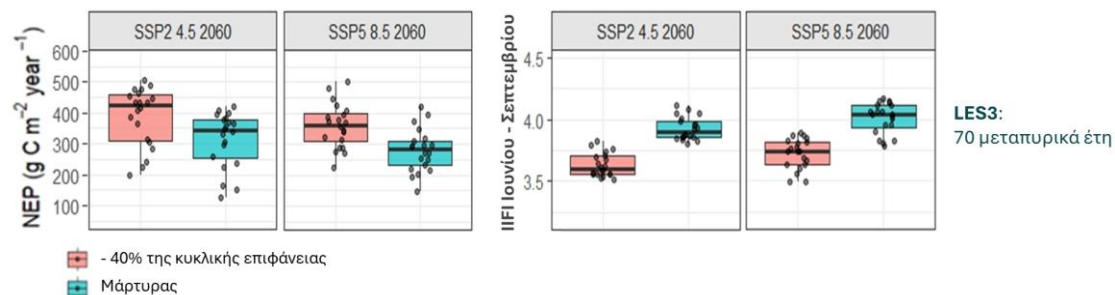
XAN1: Χωρίς αραίωση ανωρόφου
XAN2: Μέτρια αραίωση ανωρόφου
XAN3: Ισχυρή αραίωση ανωρόφου

Λέσβος - Αποτελέσματα προσομοιώσεων NEP και IFI

(αραίωση ανωρόφου & κλιματικά σενάρια)



Εκτιμώμενη Καθαρή Παραγωγικότητα του οικοσυστήματος (NEP) και Δείκτης κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς (IFI) το 2060 σε συστάδες Τραχείας πεύκης 46 ετών στη Λέσβο, **εάν αντί της υφιστάμενης έλλειψης επεμβάσεων εφαρμοστεί μέτρια αραίωση ανωρόφου (αφαίρεση 20% της κυκλικής επιφάνειας)**, με βάση το μετριοπαθές (SSP2 4.5) και το δυσμενές (SSP5 8.5) κλιματικό σενάριο.

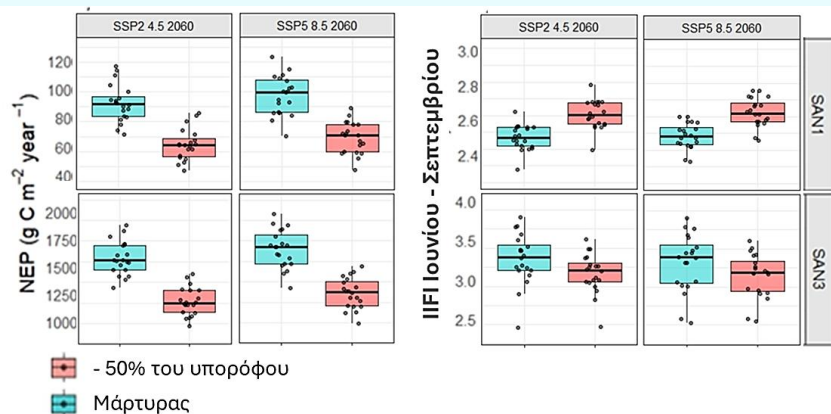


Εκτιμώμενη Καθαρή Παραγωγικότητα του οικοσυστήματος (NEP) και Δείκτης κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς (IFI) το 2060 σε συστάδες Τραχείας πεύκης 70 περίπου ετών στη Λέσβο, **εάν αντί της υφιστάμενης έλλειψης επεμβάσεων εφαρμοστεί ισχυρή αραίωση ανωρόφου (αφαίρεση 40% της κυκλικής επιφάνειας)**, με βάση το μετριοπαθές (SSP2 4.5) και το δυσμενές (SSP5 8.5) κλιματικό σενάριο.

Στις συστάδες μελέτης της Λέσβου:

- ✓ και στα δύο κλιματικά σενάρια, η μέτρια αραίωση σε ηλικία 45 περίπου ετών ενισχύει την αντιπυρική προστασία χωρίς να επιδρά αρνητικά στη δέσμευση άνθρακα.
- ✓ η ισχυρή αραίωση σε ηλικία περίπου 70 ετών αυξάνει μακροπρόθεσμα τη δέσμευση άνθρακα κατά περίπου 25% και παράλληλα μειώνει τον κίνδυνο έναρξης πυρκαγιάς κατά περίπου 8% (μέσοι όροι και για τα δύο κλιματικά σενάρια).

Σάνη, Χαλκιδική - Αποτελέσματα προσομοιώσεων NEP και IFI (αφαίρεση υπορόφου & κλιματικά σενάρια)



SAN 1: χωρίς επέμβαση,
χαμηλή πυκνότητα
υπορόφου και ανωρόφου

SAN 3: χωρίς επέμβαση,
υψηλή πυκνότητα
υπορόφου και ανωρόφου

Εκτιμώμενη Καθαρή Παραγωγικότητα του οικοσυστήματος (NEP) και Δείκτης κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς (IFI) το 2060 σε συστάδες Χαλεπίου πεύκης στη Σάνη Χαλκιδικής, **εάν η αφαίρεση του υπορόφου κατά 50% εφαρμοστεί σε συστάδες με χαμηλή ή υψηλή πυκνότητα ανωρόφου και υπορόφου**, με βάση το μετριοπαθές (SSP2 4.5) και το δυσμενές (SSP5 8.5) κλιματικό σενάριο.

Στις συστάδες μελέτης στη Σάνη Χαλκιδικής

- **με χαμηλή πυκνότητα υπορόφου και ανωρόφου**, η απομάκρυνση του 50% του υπορόφου αναμένεται να οδηγήσει σε:

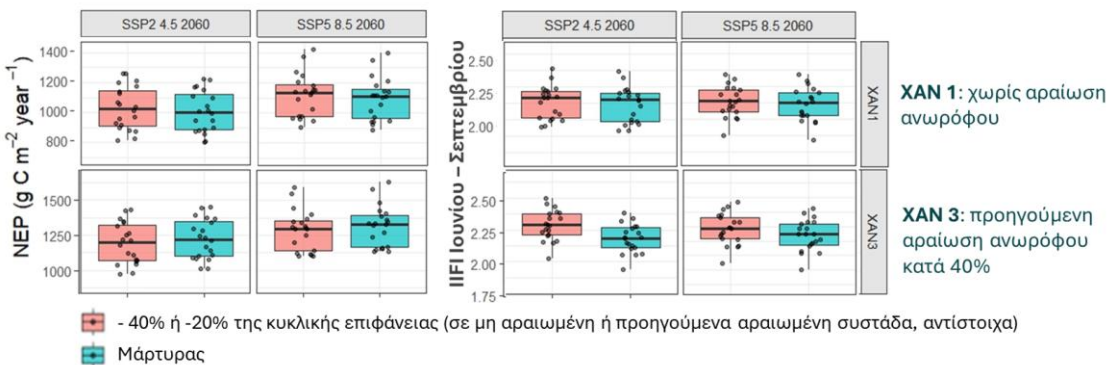
- ✓ μείωση της αποθήκευσης άνθρακα κατά περίπου 30% (μέσος όρος και για τα δύο κλιματικά σενάρια).
- ✓ αύξηση του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς κατά 5% περίπου (μέσος όρος και για τα δύο κλιματικά σενάρια).

- **με υψηλή πυκνότητα υπορόφου και ανωρόφου**, η απομάκρυνση του 50% του υπορόφου αναμένεται να οδηγήσει σε:

- ✓ μείωση της δέσμευσης άνθρακα κατά 25% περίπου (μέσος όρος και για τα δύο κλιματικά σενάρια).
- ✓ μείωση του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς κατά 5% περίπου (μέσος όρος και για τα δύο κλιματικά σενάρια).

Ξάνθη - Αποτελέσματα προσομοιώσεων NEP και IFI

(αραίωση ανωρόφου & κλιματικά σενάρια)



Εκτιμώμενη Καθαρή Παραγωγικότητα του οικοσυστήματος (NEP) και Δείκτης κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς (IFI) το 2060 σε συστάδες Τραχείας πεύκης στην Ξάνθη, **εάν εφαρμοστεί αραιώση κατά 40% σε συστάδα χωρίς προηγούμενη αραιώση (ΧΑΝ1) ή κατά 20 % σε συστάδα που πριν 10 έτη είχε υποστεί αραιώση κατά 40% (ΧΑΝ3)**, με βάση το μετριοπαθές (SSP2 4.5) και το δυσμενές (SSP5 8.5) κλιματικό σενάριο.

Στις συστάδες μελέτης στην Ξάνθη, ομοίως και στα δύο κλιματικά σενάρια:

- η **ισχυρή αραιώση του ανωρόφου με αφαίρεση του 40% της κυκλικής επιφάνειας (σε συστάδα χωρίς προηγούμενη αραιώση)** αναμένεται να οδηγήσει σε:

- ✓ μικρή αύξηση της αποθήκευσης άνθρακα (περίπου 3% κατά μέσο όρο για τα δύο κλιματικά σενάρια).
- ✓ καμία μεταβολή του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς.

- η **επανάληψη της αραιώσης του ανωρόφου, έστω και μέτρια (20% της κυκλικής επιφάνειας), σε διάστημα 10 ετών**, αναμένεται να οδηγήσει σε:

- ✓ μείωση της αποθήκευσης άνθρακα.
- ✓ μη σημαντική μεταβολή του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς.

Βέλτιστες πρακτικές

(Σε συστάδες πεύκης χαμηλού υψομέτρου που προκύπτουν από φυσική αναγέννηση μετά από πυρκαγιά, χωρίς διαχειριστικές επεμβάσεις)



Προτεινόμενες βέλτιστες διαχειριστικές πρακτικές για αύξηση της αποθήκευσης άνθρακα και μείωση του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς:

- **Μέτριες αραιώσεις (έως 20% της κυκλικής επιφάνειας) μεταξύ 20 και 40 ετών**, κυρίως για μείωση του ανταγωνισμού και αύξηση της αντιπυρικής προστασίας.
- **Ισχυρές εξευγενιστικές αραιώσεις (έως 40% της κυκλικής επιφάνειας) μετά τα 45 έτη και το αργότερο στα 70 περίπου έτη**, για την εγκατάσταση αυτόχθονων πλατυφύλλων ειδών.
- **Αναγεννητικές υλοτομίες μετά τα 70 έτη** για φυσική αναγέννηση των συστάδων.

Σημείωση: Οι προτάσεις ισχύουν με την προϋπόθεση ότι οι συστάδες προστατεύονται από τη βόσκηση.



LES1: 20 μεταπυρικά έτη



LES2: 46 μεταπυρικά έτη



LES3: 78 μεταπυρικά έτη



LES4: 92 μεταπυρικά έτη

Βέλτιστες πρακτικές

(Σε φυσικά παράκτια δάση πεύκης, όπου εφαρμόζεται αφαίρεση του υπορόφου αειφύλλων πλατυφύλλων για αντιπυρική προστασία)



Προτεινόμενες βέλτιστες διαχειριστικές πρακτικές για αύξηση της αποθήκευσης άνθρακα και μείωση του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς:

- **Η αφαίρεση του υπορόφου να μην ξεπερνά το 50% της εδαφοκάλυψης** του υπορόφου, καθώς υψηλότερο ποσοστό οδηγεί σε ισχυρή μείωση του δυναμικού αποθήκευσης άνθρακα.
- **Σε συστάδες με αραιό ανώροφο να αποφεύγεται η αραιώση υπορόφου κατά 50%**, καθώς η πρακτική αυτή εκτός της μείωσης της παραγωγικότητας του οικοσυστήματος οδηγεί και σε αύξηση του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς λόγω μεταβολής του μικροκλίματος.
- **Τεχνητή αναδάσωση** με πεύκη (από σπέρματα της περιοχής), όπου η φυσική αναγέννηση είναι χαμηλή, λόγω αντίξων κλιματικών συνθηκών.



SAN1:

Χωρίς επέμβαση, χαμηλή πυκνότητα υπορόφου και ανώροφου



SAN2:

Αφαίρεση υπορόφου



SAN3:

Χωρίς επέμβαση, υψηλή πυκνότητα υπορόφου και ανώροφου

Βέλτιστες πρακτικές

(Σε διαχειριζόμενα περιαστικά δάση πεύκης που έχουν προέλθει από φυτεύσεις, όπου είχε ήδη εφαρμοστεί μέτρια ή έντονη αραιώση του ανωρόφου)

Προτεινόμενες βέλτιστες διαχειριστικές πρακτικές για αύξηση της αποθήκευσης άνθρακα και μείωση του κινδύνου έναρξης πυρκαγιάς:

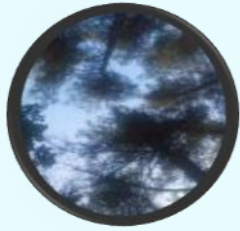
- **Ισχυρές αραιώσεις (40% της κυκλικής επιφάνειας του ανωρόφου),** καθώς η ανάπτυξη υπορόφου αυτόχθονων φυλλοβόλων πλατύφυλλων αυξάνει την παραγωγικότητα του οικοσυστήματος, άρα και την αποθήκευση άνθρακα, χωρίς να αυξάνει τον κίνδυνο έναρξης πυρκαγιάς.
- **Οι αραιώσεις δεν θα πρέπει να επαναλαμβάνονται σε διάστημα μικρότερο των 10 ετών.**
- Τελικός στόχος θα πρέπει να είναι η φυσική αναγέννηση του δάσους και η **δημιουργία δάσους πλατυφύλλων ή μεικτού δάσους πλατυφύλλων – κωνοφόρων, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες.**

10 έτη μετά την επέμβαση



XAN1:

Χωρίς αραιώση
ανωρόφου



XAN2:

Μέτρια αραιώση
ανωρόφου



XAN3:

Ισχυρή αραιώση
ανωρόφου

Τα μεσογειακά δάση πεύκης βρίσκονται υπό αυξανόμενη πίεση, καθώς η κλιματική αλλαγή εντείνει τις ξηροθερμικές συνθήκες και τη συχνότητα και ένταση των δασικών πυρκαγιών. Τα αποτελέσματα του έργου **PineOptim** δείχνουν ότι η συμβολή των οικοσυστημάτων αυτών στον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής επηρεάζεται καθοριστικά από τις εφαρμοζόμενες διαχειριστικές πρακτικές.

Η διαχείριση των μεσογειακών δασών πεύκης χαμηλού υψομέτρου δεν θα πρέπει να στοχεύει μονομερώς στην αντιπυρική προστασία ή στην αποθήκευση άνθρακα, αλλά στην **ισορροπία μεταξύ παραγωγικότητας οικοσυστήματος, αντιπυρικής προστασίας και μακροχρόνιας βιωσιμότητας**. Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, που βασίζεται **σε συνδυαστική αξιολόγηση δεικτών, όπως οι NEP και IFI, και τη χρήση μοντέλων**, υποστηρίζει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα των μεσογειακών δασών πεύκης χαμηλού υψομέτρου.

Τα πρωτόκολλα παρακολούθησης που αναπτύχθηκαν (Eleftheriadou et al., 2026), καθώς και οι προτεινόμενες βέλτιστες πρακτικές, οι οποίες προκύπτουν από το έργο **PineOptim** αποτελούν ένα πλαίσιο υποστήριξης για την προσαρμοσμένη στην κλιματική αλλαγή διαχείριση των μεσογειακών δασών πεύκης χαμηλού υψομέτρου.

Απαιτείται προσαρμοσμένη στην κλιματική αλλαγή διαχείριση με χρήση κατάλληλων δεικτών και μοντέλων και την υλοποίηση σύγχρονων διαχειριστικών μελετών.



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ **DEMOCRITUS**
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ **UNIVERSITY**
ΘΡΑΚΗΣ **OF THRACE**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ
UNIVERSITY OF THE
AEGEAN



ELGO - DIMITRA
HELLENIC AGRICULTURAL
ORGANIZATION - DIMITRA

Τμήμα Δασολογίας και
Διαχείρισης
Περιβάλλοντος και
Φυσικών Πόρων

Τμήμα Περιβάλλοντος

Ινστιτούτο Δασικών
Ερευνών

Σαζεΐδης, Χ., Κιοραποστόλου, Ν., Ελευθεριάδου, Ν., Μάντζαρη, Ε., Ξανθόπουλος, Γ., Μπίντση-Φραντζή, Ε., Γκούβας, Α., Συνοδινός Α.-Δ. Φύλλας, Ν., Φωτέλλη, Μ., Δημητρακόπουλος, Π., Σπύρογλου, Γ., Μάρκος, Ν., Μήλιος, Η., Κιτικίδου, Κ., & Ραδόγλου, Κ. (2025). *Βέλτιστες πρακτικές για τη διαχείριση των μεσογειακών πευκοδασών χαμηλού υψομέτρου για αριστοποίηση του ισοζυγίου άνθρακα και νερού στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής*. Διαθέσιμο online: <https://pineoptim.fmenr.duth.gr/>

Στοιχεία επικοινωνίας:

Ραδόγλου Καλλιόπη: kradoglo@fmenr.duth.gr

Δημητρακόπουλος Παναγιώτης: pdimi@aegean.gr

Φωτέλλη Μαριάντζελα: fotelli@elgo.gr



PineOptim



pine_optim



Το έργο «PineOptim» υλοποιείται στα πλαίσια της δράσης του ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. «Χρηματοδότηση Βασικής Έρευνας (Οριζόντια υποστήριξη όλων των Επιστημών)» του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0», με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης– NextGenerationEU (Αριθμός Έργου ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.: 016258).