

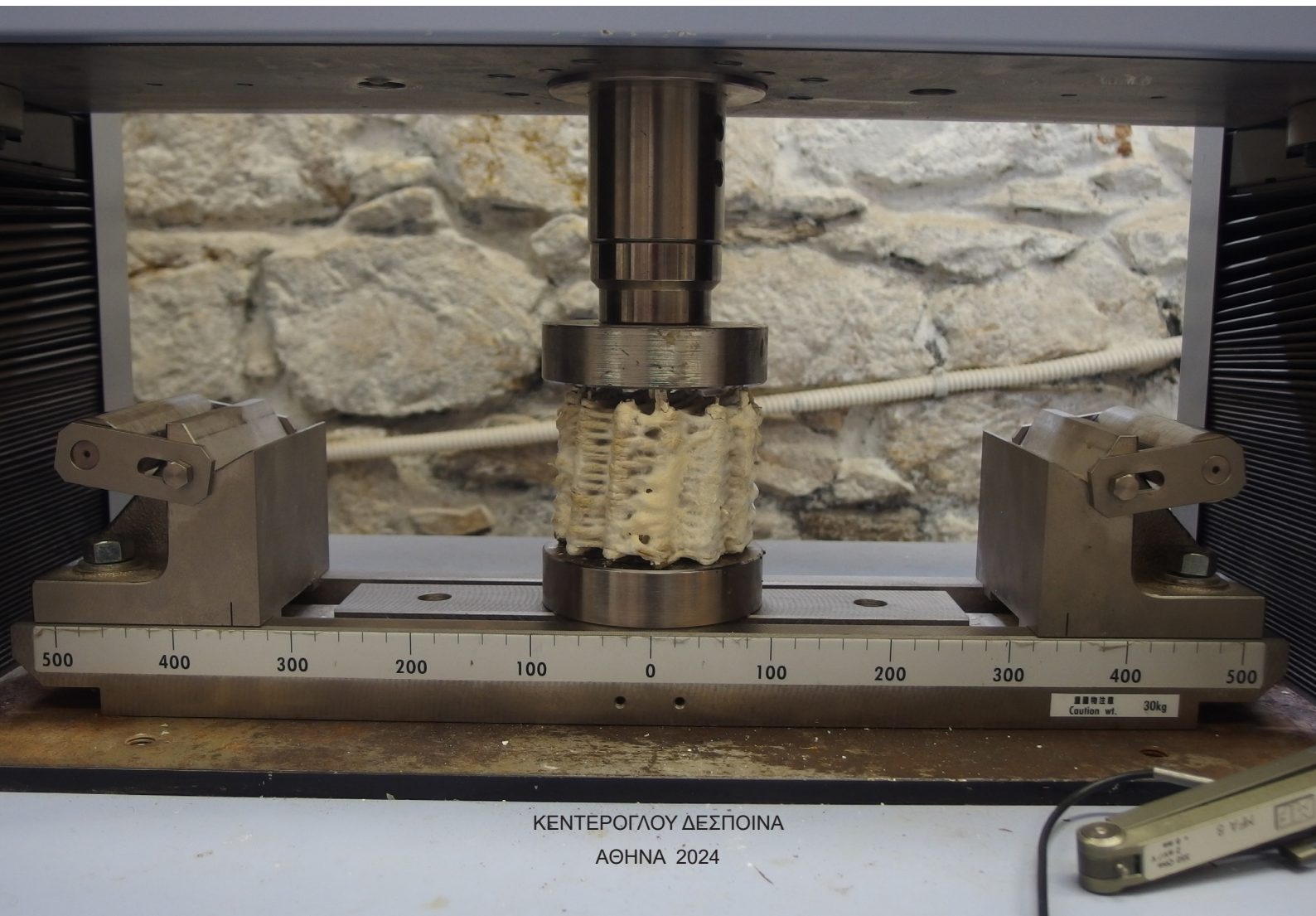


**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**  
**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ - ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΙΚΗΣ**

Μεταπτυχιακός τίτλος σπουδών:  
«Οικολογία και Διαχείριση Βιοποικιλότητας»

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

**Ελεγχόμενη ανάπτυξη μυκηλίου πάνω σε  
προκατασκευασμένο ικρύωμα ως εύπλαστο ή/  
και άκαμπτο υλικό για περαιτέρω αξιοποίηση.**



ΚΕΝΤΕΡΟΓΛΟΥ ΔΕΣΠΟΙΝΑ  
ΑΘΗΝΑ 2024



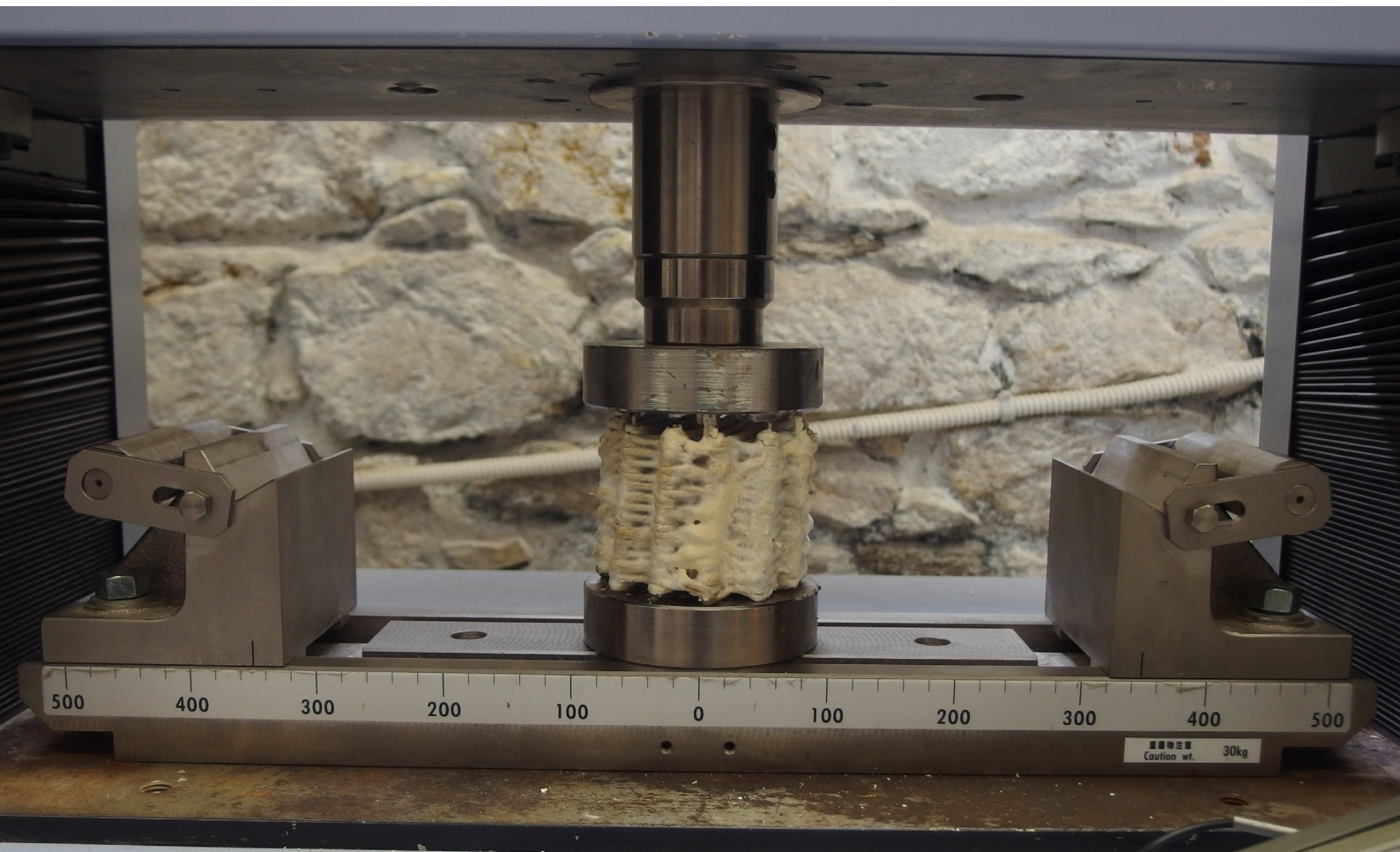


**National and Kapodistrian University of Athens  
Department of Biology  
Section of Ecology & Systematics**

Postgraduate Program:  
«Ecology and Conservation of Biodiversity»

Master Thesis

**Controlled growth of fungal mycelium on pre-fabricated molds as supple and/or as rigid material for further exploitation.**



KENTEROGLOU DESPINA  
ATHENS 2024



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ - ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΙΚΗΣ**

**Εξεταστική Επιτροπή**

**Επιβλέπουσα:**

Ζαχαρούλα Γκόνου Ζάγκου, Επίκουρη Καθηγήτρια  
Συστηματικής & Οικολογίας Μυκήτων Τμήματος Βιολογίας,  
Σχολή Θετικών Επιστημών, Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών

**Μέλη:**

Ιωάννα Πυρρή, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό (Ε.Δι.Π.)  
Τμήματος Βιολογίας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Εθνικό και  
Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Νικόλαος Ζαχαρόπουλος, Μόνιμος Λέκτορας Τμήματος  
Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων & Συστημάτων του  
Πανεπιστημίου Αιγαίου, Σύρος

# Ευχαριστίες

Είμαι υπόχρεη σε πολλούς ανθρώπους που συνοδοιπόρησαν στη μύηση μου στον φανταστικό κόσμο των μυκήτων. Πρώτες απ' όλους, θα ευχαριστήσω εγκάρδια την Επίκουρη Καθηγήτρια Ζαχαρούλα Γκόνου - Ζάγκου χωρίς την εκπαιδευτική ζωντάνια και την προσωπική ποιότητα της οποίας αυτή τη στιγμή δε θα διαβάζατε τις συγκεκριμένες ευχαριστίες της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας. Την ευχαριστώ για την ανάθεση του θέματος, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας στην ανακάλυψη ενός καινούριου δρόμου αξιοποίησης των μυκήτων.

Ευχαριστώ την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Αναστασία Σεργεντάνη και Ρωμανό Αναγνωστόπουλο για τις συμβουλές και τη βοήθεια τους καθ' όλη τη διάρκεια παραμονής μου στο εργαστήριο.

Θα ήθελα να αποδώσω θερμότερες ευχαριστίες στον καθηγητή μου, Νικόλαο Ζαχαρόπουλο, για το χρόνο που μου αφιέρωσε για το στάδιο των μηχανικών δοκιμών των πρωτοτύπων μου στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τους:

Embrace Ορθοπεδικά - Εργαστήριο του Νίκου Σαρρή και την υποψήφια διδάκτορα Κωνσταντίνα Μάτσικα για την αμέριστη υποστήριξη, βοήθεια, φιλία και επικοινωνιακές ώρες ιδεασμού στη δημιουργία πρωτοτύπων,

Γαλάτεια Γεωργούδη, Δασολόγο-Περιβαλλοντολόγο για τη συνεισφορά της στην ανάπτυξη του χάρτη των θέσεων δειγματοληψίας των στελεχών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία,

Ηλία Σαλτιέλ, από την ομάδα Athens Makerspace Lab για τις κοπές στο laser,

την ομάδα του Εργαστηρίου ΠΟΙΩ του Δήμου Αθηναίων για τις κοπές στο laser στους αρχικούς πειραματισμούς,

τους μεταπτυχιακούς φοιτήτριες και τους τεχνικούς του εργαστηρίου της Οικολογίας για τις συμβουλές τους και τέλος τον

Σάββα Βασιλειάδη, Καθηγητή στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής για την καθοδήγηση ως προς την κατανόηση των ιδιοτήτων των φυσικών ινών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους δικούς μου ανθρώπους για τη συμπαράσταση, την κατανόηση και την υποστήριξη που έδειξαν τα τρία τελευταία χρόνια σε αυτή τη νέα πρόκληση που αποφάσισα να φέρω εις πέρας και τη μυκητολατρεία που συχνά τους διασκέδαζε.



Αυτή η σελίδα έχει μείνει σκόπιμα κενή

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>8</b>
<b>ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ</b>	<b>13</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή</b>	<b>15</b>
1.1 Γενικά στοιχεία περί μυκήτων	15
1.1.1 Ηλικία μυκήτων	16
1.1.2 Ταξινομική μυκήτων	18
1.2 Γενικά στοιχεία περί βασιδιομυκήτων	19
1.3 Δομή κυττάρων και βιολογικός κύκλος (με έμφαση στο φύλο Basidiomycota)	20
1.4 Οικολογία μυκήτων (με έμφαση στο φύλο Basidiomycota)	23
1.4.1 Σαπροτροφικοί μύκητες	23
1.4.1.1 Μύκητες λευκής σήψης	23
1.4.1.2 Μύκητες καστανής σήψης	24
1.4.1.3 Μύκητες μαλακής σήψης	24
1.5 Φυσικές ίνες	25
1.5.1 Φυτικές ίνες	27
1.5.1.1 Γιούτα	28
1.5.1.2 Κλωστική κάνναβη	29
1.6 Τεχνική πλέξης	30
1.7 Σύνθετα και βιο-σύνθετα υλικά	32
1.8 Σχεδίαση οδηγούμενη απ'τα υλικά (Material Driven Design, MDD)	33
1.9 Βιώσιμα κτήρια	34
1.10 Βιοτεχνολογία	37
1.10.1 Βιοτεχνολογικές εφαρμογές μυκήτων στον κατασκευαστικό κλάδο	38
1.11 Καινοτόμες προσεγγίσεις	40
1.12 Σκοπός μελέτης διπλωματικής εργασίας	41
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΥΛΙΚΑ &amp; ΜΕΘΟΔΟΙ</b>	<b>42</b>
2.1 Επιλογή και επεξεργασία μυκητολογικού υλικού	42
2.1.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός - χημικά αντιδραστήρια	44
2.1.2 Θρεπτικά υποστρώματα	45
2.1.2.1 Παρασκευή στερεού θρεπτικού μέσου	45
2.1.2.2 Παρασκευή υγρού θρεπτικού μέσου	45
2.1.2.3 Παρασκευή κολλώδους θρεπτικού μέσου	45
2.2 Κατασκευές	48
2.3 Μήτρες για δισδιάστατες και τρισδιάστατες δοκιμές	49
2.3.1 Δισδιάστατες δοκιμές	49
2.3.1.1 Δοκιμή 1	49
2.3.1.2 Δοκιμή 2	49

2.3.2 Τρισδιάστατες δοκιμές	50
2.3.2.1 Δοκιμή 1	50
2.3.2.2 Δοκιμή 2	50
2.3.2.2 Δοκιμή 2 Συνέχεια	51
2.3.3 Άλλες δοκιμές	52
2.4 Μηχανικές Ιδιότητες	53
2.4.1 Δοκιμές θλίψης	53
2.4.2 Δοκιμή αποδόμησης σε φυσικές και ημι-ελεγχόμενες συνθήκες	54
2.4.3 Δοκιμή αντοχής σε καύση	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ &amp; ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b>	<b>56</b>
3.1 Δισδιάστατες δοκιμές	56
3.2 Τρισδιάστατες δοκιμές	57
3.3 Επιλογή σχεδίου προς περαιτέρω αξιολόγηση	57
3.4 Δοκιμές θλίψης	61
3.5 Αξιολόγηση διαγραμμάτων	66
3.6 Δοκιμή αποδόμησης σε φυσικές και ημι-ελεγχόμενες συνθήκες	68
3.6.1 Αποδόμηση σε φυσικό περιβάλλον	68
3.6.2 Αποδόμηση σε ημι-ελεγχόμενες συνθήκες	69
3.7 Δοκιμή αντοχής σε καύση	70
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>71</b>
4.1 Συμπεράσματα υλικών & μεθόδων	71
4.1.1 Γενικά συμπεράσματα	71
4.1.2 Σύγκριση και επιλογή φυτικής ίνας	71
4.1.3 Σχεδιαστικές αδυναμίες και προοπτικές βελτίωσης	73
4.2 Συμπεράσματα κατασκευών & πειραμάτων	75
4.2.1 Γενικά συμπεράσματα	75
4.2.2 Πρόταση για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη	77
<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ</b>	<b>78</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>80</b>
Ιστοσελίδες	86
Πηγές Εικόνων	87
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	<b>88</b>
Εικόνες μικροσκοπίου ινών κλωστικής κάνναβης	88
Διαγράμματα δοκιμών συμπίεσης	89



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες περιβαλλοντικές προκλήσεις όπως η κλιματική κρίση, η αλόγιστη χρήση φυσικών πόρων, η απώλεια φυσικών για τη ζωή ενδιαιτημάτων, η ατμοσφαιρική - εδαφική και υδάτινη ρύπανση, έχουν αλλάξει την ισορροπία και έχουν οδηγήσει στην επιτακτική ανάγκη επαναπροσδιορισμού των ενεργειακών, καταναλωτικών και ερευνητικά εστιασμένων επιλογών και την ανάπτυξη νέων προσεγγίσεων. Στο πλαίσιο της τρέχουσας μετάβασης από μια γραμμική σε μια κυκλική οικονομία, οικολογικά φιλικές ανανεώσιμες λύσεις καταλαμβάνουν συνεχώς περισσότερο έδαφος.

Οι μύκητες ως ένα μακράν παραμελημένο βασίλειο για το μεγαλύτερο μέρος της επιστημονικής ιστορίας είναι ζωτικής σημασίας για σχεδόν κάθε πτυχή της καθημερινότητάς μας, δίνοντάς μας τον αέρα που αναπνέουμε, τροφή, φάρμακα, ρούχα. Το βασίλειο των μυκήτων είναι το κεντρικό στοιχείο του συστήματος υποστήριξης της ζωής της Γης. Είναι σε μεγάλο βαθμό άορατοι αλλά απαραίτητοι για τη ζωή στη γη καθώς το ζωικό βασίλειο εξαρτάται από το φυτικό για συνέχιση της ύπαρξης ενώ σε ποσοστό από 70 έως και πάνω από 90%, τα χερσαία φυτά εξαρτώνται από τις συμβιωτικές σχέσεις που αναπτύσσουν με τους μύκητες στις ρίζες αυτών (μυκόρριζες) για επαρκή επιβίωση και ανάπτυξη τους (Behie & Bidochka, 2014). Επίσης, ως ανακυκλωτές των θρεπτικών, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους. Τα τελευταία χρόνια, τόσο ο ευέλικτος μεταβολισμός τους όσο και η ιδιότητα του μυκηλίου να δρα ως αποτελεσματικό συνδετικό υλικό, έχει προσελκύσει την προσοχή της βιομηχανίας και της ακαδημίας προς μία κατεύθυνση ανάπτυξης βιοσύνθετων υλικών με χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα. Η μυκητιακή βιοτεχνολογία, ως σύγχρονο παρακλάδι της βιοτεχνολογίας, αποτελεί ένα μοχλό καινοτομίας για τη βιοοικονομία σύμφωνα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της αειφορίας.

Στο φως αυτών των διαπιστώσεων, τα φυσικά βιο-σύνθετα υλικά είναι ένας αναδυόμενος και πολλά υποσχόμενος τομέας στην επιστήμη των υλικών και της φυσικής δόμησης (*sensu lato*) με τις φυσικές ίνες να αποτελούσαν τη βασική πρώτη ύλη για την παραγωγή εμπορευμάτων και πολλών τεχνικών προϊόντων μέχρι πριν κάποια χρόνια. Τα φιλικά προς το περιβάλλον βιοσύνθετα με βάση μύκητες έχουν τη δυνατότητα να αναχαιτίσουν δραστικά το περιβαλλοντικό κόστος του κατασκευαστικού - κυρίως αλλά όχι μόνο - τομέα και να αποτελέσουν μια καινοτόμα εναλλακτική βιώσιμη λύση στη σύγχρονη οικιστική και ανάπτυξη.

Η ανάπτυξη των μυκητο-υλικών (*myco-materials*) της παρούσας εργασίας βασίστηκε στην τεχνική της παραδοσιακής ύφανσης η οποία αποτέλεσε τη βάση ώστε να σχεδιαστούν υποστηρικτικές δομές που επέτρεπαν τη δημιουργία τρισδιάστατα δομημένων όγκων. Κατά τη χρήση της παρούσας τεχνικής της τρισδιάστατης πλέξης, πολλαπλές δισδιάστατες επιφάνειες χειρίζονται με τέτοιο τρόπο που τα διάφορα επίπεδα των ινών συνδέονται παράγοντας μία τρισδιάστατη ενιαία δομή. Με βάση τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, επιλέχθηκαν οι ίνες κλωστικής κάνναβης ως το κυρίαρχο υπόστρωμα για το μυκήλιο. Οι πρώτες ύλες – φυσικές ίνες και μυκήλιο βασιδιομυκήτων (βιοκαταλύτης) - και οι ιδιότητες τους καθόρισαν - περιορίζοντας ή διευρύνοντας - τις μορφές των, τη διαδικασία ανάπτυξης τους, τις τελικές εφαρμογές τους. Αυτό περιγράφει μία μέθοδο που εισήχθη πρόσφατα, τη “σχεδίαση οδηγούμενη απ’τα υλικά, *material driven design*”.

Έγιναν επίσης τρεις έλεγχοι απόκρισης των βιο-δομών σε μία μηχανική καταπόνηση - δοκιμή συμπίεσης, όπως επίσης και σε δοκιμή βιο-αποικοδόμησης σε φυσικό περιβάλλον και σε ημι-ελεγχόμενες συνθήκες και σε δοκιμή αντίστασης σε καύση.

Στόχος ήταν να δημιουργηθούν βιοδιασπώμενα, *self-grown*, περιβαλλοντικά αποτελεσματικά, βιοσύνθετα κατασκευαστικά υλικά με την προσαρμοσμένη μέθοδο ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Σίγουρα απαιτείται περαιτέρω έρευνα που θα βασιστεί στην παρούσα έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε πρωτότυπα βιο-σύνθετα εφαρμόσιμα σε ρεαλιστικά σενάρια.

## ABSTRACT

The last decades have been marked by serious environmental challenges such as climate crisis, the improvident use of natural resources, the natural habitat loss, the atmospheric, soil and water pollution - among others - have disrupted the harmony and have led to an urgent need to redefine energy, consumer and research-focused options and develop new approaches.

In the context of the current transition from a linear to a circular economy, ecologically friendly renewable solutions are increasingly gaining ground.

Fungi, though a largely neglected kingdom for most of scientific history, are vital to almost every aspect of our daily lives, providing us with the air we breathe, the food we eat, the medicine we take, the clothes we are wearing. The fungal kingdom is the centerpiece of Earth's life support system.

They are largely invisible but essential to life on earth as the animal kingdom depends on the plant kingdom to keep their survival while 70 to over 90% of land plants depend on the symbiotic relationships they develop with fungi in their roots (mycorrhizae) for their adequate survival and growth (Behie & Bidochka, 2014). Also, as nutrient recyclers, they play a decisive role in maintaining soil fertility. In recent years, their highly versatile metabolism as well as the property of acting as an effective binding material, has attracted the attention of industry and academia towards the development of biocomposites with a low carbon footprint. Fungal biotechnology, as a modern branch of biotechnology, is an innovation driver for the bioeconomy according to the principles of circular economy and sustainability.

In light of these findings, natural bio-composites are an emerging and promising field in materials science and physical construction (*sensu lato*) with natural fibers being the key raw material for the production of commodities and many technical products until some years before.

Fungal-based eco-friendly biocomposites have the potential to drastically curb the environmental costs of the construction - mainly but not only - sector and provide an innovative alternative sustainable solution to modern housing and development.

The development of myco-materials of this work was based on the technique of traditional weaving which worked as the basis for designing supporting structures allowing the generation of three-dimensionally developed blocks. While using the technique of 3 dimensional (3D) knitting, multiple two-dimensional surfaces are being manipulated in such a way that the various layers of fibers are interlaced to produce a three-dimensional single structure. Based on the tests performed, hemp fiber was selected as the dominant substrate for the mycelium. The raw materials - natural fibers and mycelium of basidiomycetes (biocatalyst) - and their properties determined - limiting or expanding - their development process, their final applications. This describes a recently introduced method, "material driven design".

We also tested the bio-structures regarding their response to three stress situations: a mechanical stress - in this case a compression test, as well as a biodegradation test in natural environment and in semi-controlled conditions as well as a fire resistance and reaction to fire test.

The goal was to create biodegradable, self-grown, environmentally efficient, bio-composite building materials using the development method that was introduced in this postgraduate thesis which can perform as a groundwork for further exploration and transformation (if not only contribution) to the construction industry.

*Δηλώνω ρητά ότι, το κείμενο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας δεν αποτελεί προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον»*

(υπογραφή μεταπτυχιακού φοιτητή).







## Συντομογραφίες/ Σύμβολα

<b>CMM</b>	Composite Mycelium Materials, <i>σύνθετα μυκηλιακά υλικά</i>
<b>PMM</b>	Pure Mycelium Materials, <i>υλικά από καθαρό μυκήλιο</i>
<b>MBC</b>	Mycelium Based Composites, <i>σύνθετα υλικά με βάση το μυκήλιο</i>
<b>MDD</b>	Material Driven Design, <i>σχεδίαση οδηγούμενη από τα υλικά</i>
<b>NFC</b>	Natural Fiber Composites, <i>σύνθετα υλικά φυσικών ινών</i>
<b>PMC</b>	Polymer-matrix composites, <i>σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα</i>
<b>PDA</b>	Potato Dextrose Agar
<b>WDF</b>	Wood-Decomposing Fungi, <i>ξυλοσηπτικοί μύκητες</i>
<b>WRF</b>	White-Rot Fungi, <i>μύκητες λευκής σήψης</i>
<b>BRF</b>	Brown-Rot Fungi, <i>μύκητες καστανής σήψης</i>
<b>SRF</b>	Soft-rot fungi, <i>μύκητες μαλακής σήψης</i>
<b>s.l</b>	sensu lato, <i>με την ευρεία έννοια</i>
<b>s.s</b>	sensu stricto, <i>με τη στενή έννοια</i>
<b>spp.</b>	species, <i>είδη (πληθυντικός)</i>
<b>ssp.</b>	subspecies, <i>υποείδος</i>
<b>ATHUM</b>	Athens University Mycetheca (Συλλογή Καλλιεργειών Μυκήτων της Μυκητοθήκης ATHUM του Πανεπιστημίου Αθηνών)
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization of the United Nations
<b>PLA</b>	Polylactic acid
<b>PHA</b>	Poly hydroxyalkanotes
<b>PCL</b>	Poly(ε-caprolactone)

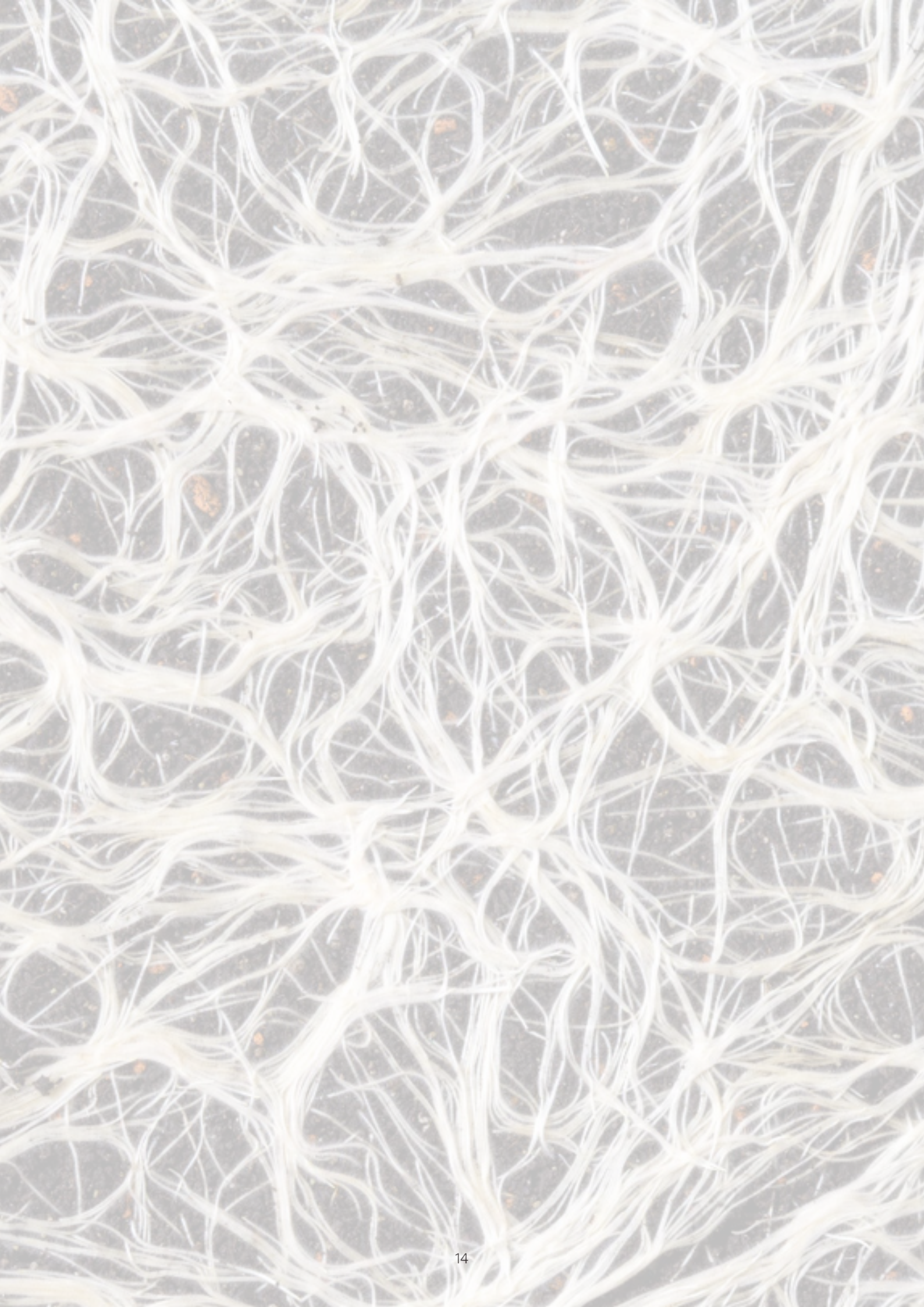
---

**εικ.** *εικόνα*

**πίν.** *πίνακας*

**Κ.Ε** *Κοινή Εποχή*





# Κεφάλαιο 1.

## Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά Στοιχεία περί Μυκήτων

Από την παραγωγή τροφίμων & φαρμάκων, στην κατασκευή φιλικών προς το περιβάλλον κατασκευαστικών υλικών-πρώτων υλών, στη βιοεξυγίανση και την παραγωγή βιοκαυσίμων, από τη δημιουργία φίλτρων νερού και τη διάσπαση πλαστικού, οι μύκητες, αν και σε μεγάλο βαθμό αόρατοι, παραμένουν ικανοί για εκπληκτικά κατορθώματα. Η ζωή στον πλανήτη θα ήταν πολύ διαφορετική χωρίς την παρουσία του Βασιλείου των Μυκήτων. Οι τελευταίοι διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία υγιών οικοσυστημάτων, οδηγώντας τον κύκλο των θρεπτικών, παρέχοντας τροφή σε ένα μεγάλο αριθμό άγριας ζωής - αλλά όχι μόνο, διατηρώντας την υγεία των φυτών και αποθηκεύοντας άνθρακα στα εδάφη. Οι αλληλεπιδράσεις των μυκήτων με τα φυτά άλλαξαν τη χερσαία οικολογία και γεωλογία και τροποποίησαν την ατμόσφαιρα της Γης (Berbee *et al.*, 2017). Εντούτοις, παραμένει μια από τις λιγότερο μελετημένες και προστατευμένες ομάδες οργανισμών.

Το χώμα, το ουσιαστικό χερσαίο ενδιαίτημα, είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο μέσο, ένα οικοσύστημα με χιλιάδες μικροσκοπικά ενδιαιτήματα και μικροπεριβάλλοντα. Μεταξύ των μικροοργανισμών που κατοικούν στα εδάφη (εδαφική πανίδα, μικρόβια κ.ά), οι μύκητες κατατάσσονται συνήθως ως οι πιο άφθονοι σε όρους βιομάζας και φυσιολογικής δραστηριότητας (Kjoller and Struwe 1982; Schnörrer *et al.* 1985) και είναι θεμελιώδεις στη διατήρηση της υγείας του. Αποτελούν περίπου το 70-80% της συνολικής αποσυνθετικής βιομάζας σε χορτολιβαδικά εδάφη (Mueller *et al.*, 2004). Σύμφωνα με τους Bardgett & van der Putten (2014), ένα γραμμάριο εδάφους μπορεί να περιέχει περίπου  $\approx 100$  μέτρα μυκητιακών υφών, ως μία από τις κύριες συνεισφορές στην παγκόσμια εκτίμηση της μυκητιακής βιομάζας.

Οι οργανισμοί αυτοί έχουν αποικίσει και προσαρμοστεί σε κάθε πιθανή οικοθέση (ecological niche) μέσω της ανάπτυξης μίας ποικιλίας κυτταρικών μορφολογιών συγκροτώντας μία μεγάλη και μοναδική ομάδα οργανισμών, άλλοτε μικροσκοπικών (οπότε και κρίνεται απαραίτητη η χρήση μικροσκοπίου - μικρομύκητες) και άλλοτε εύκολα διακριτών με γυμνό μάτι (μακρομύκητες), που διαφέρουν από άλλους οργανισμούς τόσο στη συμπεριφορά όσο και στην οργάνωση των κυττάρων τους.

Στην πορεία της εξέλιξης, οι μύκητες έχουν κατακτήσει ένα εντυπωσιακό μεγάλο εύρος ενδιαιτημάτων, εκπληρώνοντας σημαντικούς ρόλους σε διάφορα οικοσυστήματα και ενδιαιτήματα (Dix and Webster, 1995). Η κατάκτηση αυτών των, καθ' όλα αποσπασματικών ενδιαιτημάτων διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό από την παραγωγή πολυάριθμων μικροσκοπικών σπορίων τα οποία είναι εύκολο να μετακινηθούν και εγκατασταθούν.

Σε όρους βιοποικιλότητας, ο αριθμός των μυκήτων που έχει περιγραφεί σήμερα είναι περίπου 144,000 είδη, παρόλ' αυτά η συνολική παγκόσμια ποικιλότητα τους παραμένει υπό διαρκή μελέτη (Willis, 2018). Εκτιμάται ότι ο συνολικός τους αριθμός ξεπερνά το 1.5 εκατομμύριο (Hawksworth, 2001) ενώ σύμφωνα με νεώτερες εκτιμήσεις βασιζόμενες σε μοριακές μεθόδους, η πραγματική ποικιλότητα του βασιλείου αυτού μπορεί να αριθμεί περισσότερα από 5 εκατομμύρια είδη (Blackwell, 2011).

Συγκριτικά, από τα 5.5 εκ. έντομα που εκτιμάται ότι υπάρχουν σε παγκόσμια κλίμακα, έχει περιγραφεί περίπου το 1 εκ. (Stork, 2018), ενώ στα αγγειώδη φυτά η κατάσταση φαίνεται να είναι πιο ξεκάθαρη καθώς ο αριθμός τους υπολογίζεται περί τα 321,000 με την πλειοψηφία εκ των οποίων να έχει ήδη περιγραφεί (300,750) (Maarten. *et al.*, 2018). Καταλαβαίνουμε συνεπώς, πως αποτελεί μία καθόλου καλά μελετημένη ομάδα οργανισμών του πλανήτη μας.

Η μυκητοποικιλότητα (mycodiversity), όπως και όλες οι επιμέρους υποκατηγορίες της βιοποικιλότητας, παρουσιάζει ξεχωριστά πρότυπα τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο (Mueller *et al.*, 2004).

Οι μύκητες ζουν σε όλα τα οικολογικά περιβάλλοντα του πλανήτη μας. Ο αέρας βρίθκει από σπόρια μυκήτων, το έδαφος περιέχει πλήθος μυκήτων. Οι τελευταίοι ζουν επάνω σε φύλλα, άνθη, καρπούς, κορμούς ή ρίζες ανωτέρων φυτών (ενδοφυτικοί μύκητες).



Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι μύκητες αποτελούνται από περίπου 90% νερό και 10% ξηρή ύλη (Bötticher 1974; Schmidt, 2010). Η απουσία φωτοσυνθετικής ικανότητας καθιστά απαραίτητο έναν ετερότροφο τρόπο διατροφής (συμβιωτικό, σαπροφοτικό, ή παρασιτικό), με την πρόσληψη των απαραίτητων θρεπτικών (τυπικά ενέργεια και άνθρακα) να γίνεται με την εξωκυτταρική πέψη χάρη στη δραστηριότητα ενζύμων που εκκρίνονται και την απορρόφηση αυτών εν συνεχεία.

Η θρέψη τους, εξαρτάται από την απορρόφηση των θρεπτικών ουσιών από τις μυκηλιακές υφές, το βλαστητικό δηλαδή τμήμα των μυκήτων απ' όπου παράγονται οι αναπαραγωγικές δομές (καρποσώματα). Οι υφές εκκρίνουν ένζυμα, που αποσυνθέτουν τη νεκρή οργανική ύλη του υποστρώματος όπου αναπτύσσονται.

Σαν σαπροτροφική ομάδα οργανισμών, οι μύκητες συμμετέχουν στην αποσύνθεση φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων στο έδαφος, με την οποία οι πολύπλοκες οργανικές ενώσεις των υπολειμμάτων αυτών διασπώνται σε απλούστερες οργανικές ή ανόργανες ουσίες που μπορούν να απορροφηθούν ξανά και να μπου και πάλι στον κύκλο της έμβιας ύλης. Αποκαθιστούν δηλαδή, τη γονιμότητα στο έδαφος.

Χωρίς αυτή την αποσύνθεση, ένα ολοένα μεγαλύτερο μέρος των συστατικών του εδάφους θα παρέμενε δεσμευμένο στη νεκρή οργανική ύλη και θα καθιστούσε τη συνέχιση της ζωής προβληματική.

Οι ρίζες επίσης των περισσότερων φυτών αλλά κυρίως των δασικών δέντρων συμβιών με μύκητες μέσω των λεγόμενων “μυκορριζών”. Επειδή αυτοί οι ετερότροφοι οργανισμοί μπορούν να καταλάβουν ετερογενή περιβάλλοντα, μετατρέπουν οργανικό υλικό και θρεπτικά συστατικά σε βιομάζα σε χωρικές κλίμακες που κυμαίνονται από αρκετά χιλιοστά έως ολόκληρα τοπία (Smith *et al* 1992 Anderson *et al.* 1994; Mueller *et al.*, 2004).

Οι δενδροειδείς ή θυσανώδεις μυκορριζες (arbuscular mycorrhizas) σχηματίζονται στις ρίζες του 80-90% των χερσαίων φυτικών ειδών από μύκητες του φύλου Glomeromycota. Δημιουργούν το λειτουργικό “Wood Wide Web”, ένα εκτεταμένο, υπόγειο δίκτυο υφών θεμελιωδών για την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών από το έδαφος και τη μεταφορά τους στο φυτό ξενιστή. Αυτός ο απεριόριστα μεγάλος αριθμός υπόγειων μυκητιακών σχέσεων εντός των φυτικών κοινοτήτων οφείλεται στην εμφάνιση αναστομώσεων μεταξύ γειτονικών υφών του μυκηλίου, οι οποίες οδηγούν στη συνέχιση των διακλαδώσεων (Giovannetti *et al.*, 2006; Helgason *et al.*, 1998).

### 1.1.1 Ηλικία Μυκήτων

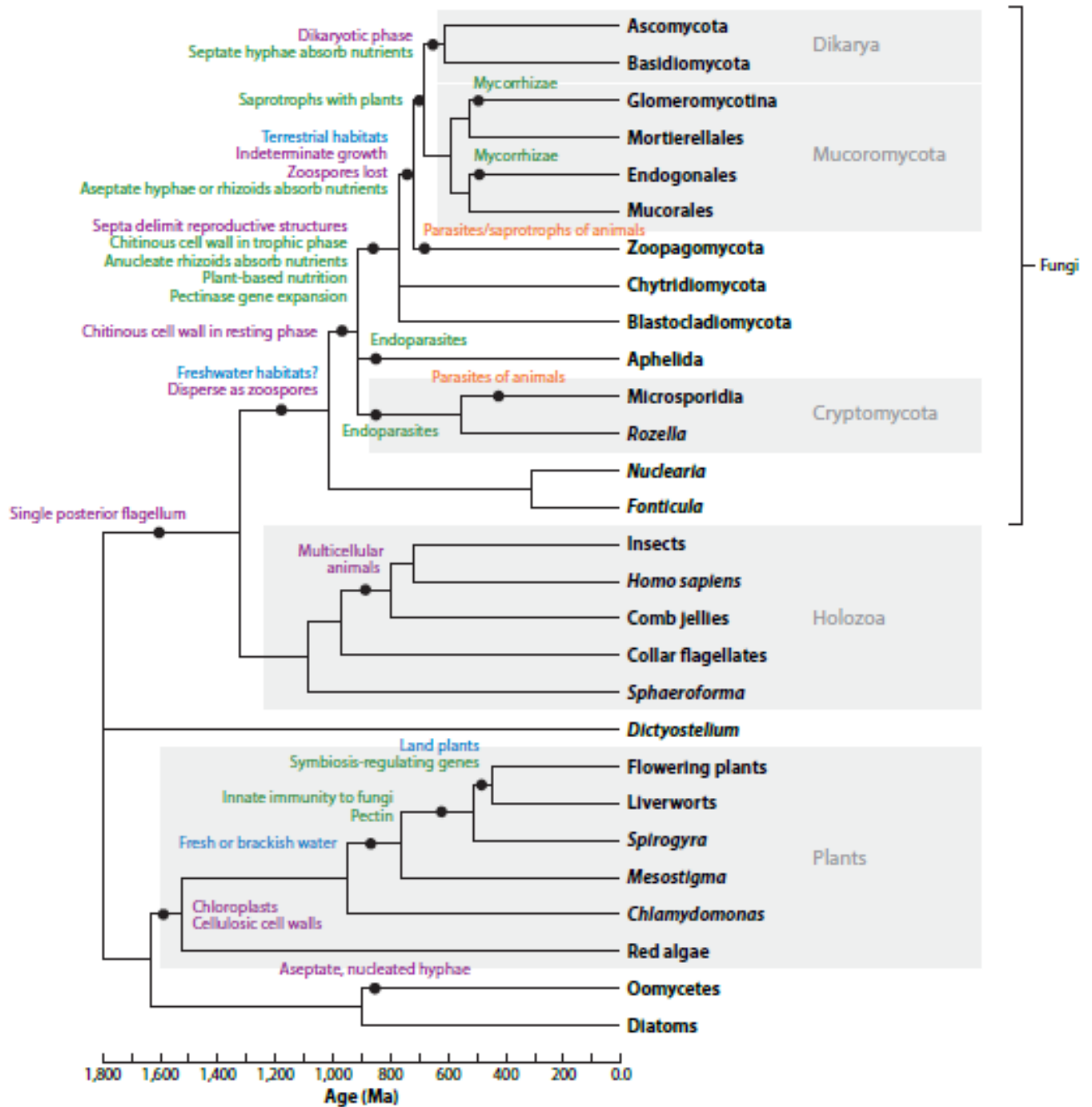
Η ηλικία του βασιλείου των μυκήτων έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης, πολυδιάστατης και συνθετικής έρευνας. Οι πρώτες διατυπώσεις αναφέρουν πως κάπου μεταξύ 1,481 και 900 εκατομμυρίων ετών πριν υπήρχε ένας κοινός πρόγονος των μυκήτων με τα ζώα - τα Οπισθόκοντα - ο οποίος είχε ένα μόνο μαστίγιο (flagellum) που χτυπούσε για να ωθηθεί προς τα εμπρός.

Οι Berbee and Taylor (2001) (Εικ.1) έχουν επιχειρήσει να προσεγγίσουν το ζήτημα με την εφαρμογή της έννοιας του “μοριακού ρολογιού (molecular clock)”, την υπόθεση δηλαδή ότι ο ρυθμός μεταλλάξεων που οδήγησαν σε φυλογενετική ποικιλότητα είναι διαρκής στο χρόνο και στις διάφορες ομάδες οργανισμών. Κάνοντας χρήση απολιθωματικού υλικού, υπολόγισαν ότι οι μύκητες μπορεί να έχουν διαχωριστεί από τα ζώα περίπου 900 εκ χρόνια πριν, πολύ πριν δηλαδή την εξέλιξη των χερσαίων οργανισμών. Αυτή η εκτίμηση συνάδει με την ανακάλυψη απολιθωμένων δομών που φέρουν υφές υπό **αναστόμωση (anastomozing)** σε ιζήματα ηλικίας 1 δισ. ετών (Webster & Weber, 2007).

Κάποια χρόνια αργότερα, το 2017, οι (Berbee *et al.*, 2017) διατύπωσαν την τοποθέτηση πως οι πρώτοι μύκητες δεν άφησαν ερμηνεύσιμο αρχείο απολιθωμάτων, επομένως απαιτούνται έμμεσα συμπεράσματα για να ερμηνεύσουμε υπό μια παλαιοντολογική οπτική. Στην ίδια έρευνα αναφέρεται πως προγονικοί μύκητες θα μπορούσαν να έχουν επιβιώσει των παγκόσμιων παγετώνων “Snowball Earth” περί τα 850–650 εκατομμύρια έτη πριν.

Σε παλαιότερη έρευνα του Deacon (2010), αναφέρεται πως τα αρχαιότερα απολιθώματα μυκήτων χρονολογούνται στην Ορδοβικανή περίοδο, μεταξύ 460 και 455 εκατομμυρίων ετών, αλλά είναι σχεδόν βέβαιο ότι οι υδρόβιοι μύκητες θα υπήρχαν πριν από εκείνη την εποχή, ίσως να χρονολογούνται πριν από περίπου 1 δισεκατομμύριο χρόνια, κάτι που έρχεται να επιβεβαιώσει το συμπέρασμα των Berbee *et al.* Οι Moore *et al.* (2011) υποστηρίζουν ότι κάποια από τα νηματόφυτα (nematophytes) ειδικότερα αυτά του γένους *Prototaxites*, πολύ μεγάλοι χερσαίοι οργανισμοί, ήταν στην πραγματικότητα πολυκύτταροι μύκητες που αναπτύχθηκαν για να εκμεταλλευτούν τα συσσωρευμένα υπολείμματα βακτηρίων, πρωτιστών και βρουοφύτων αξίας 2 δισεκατομμυρίων ετών.



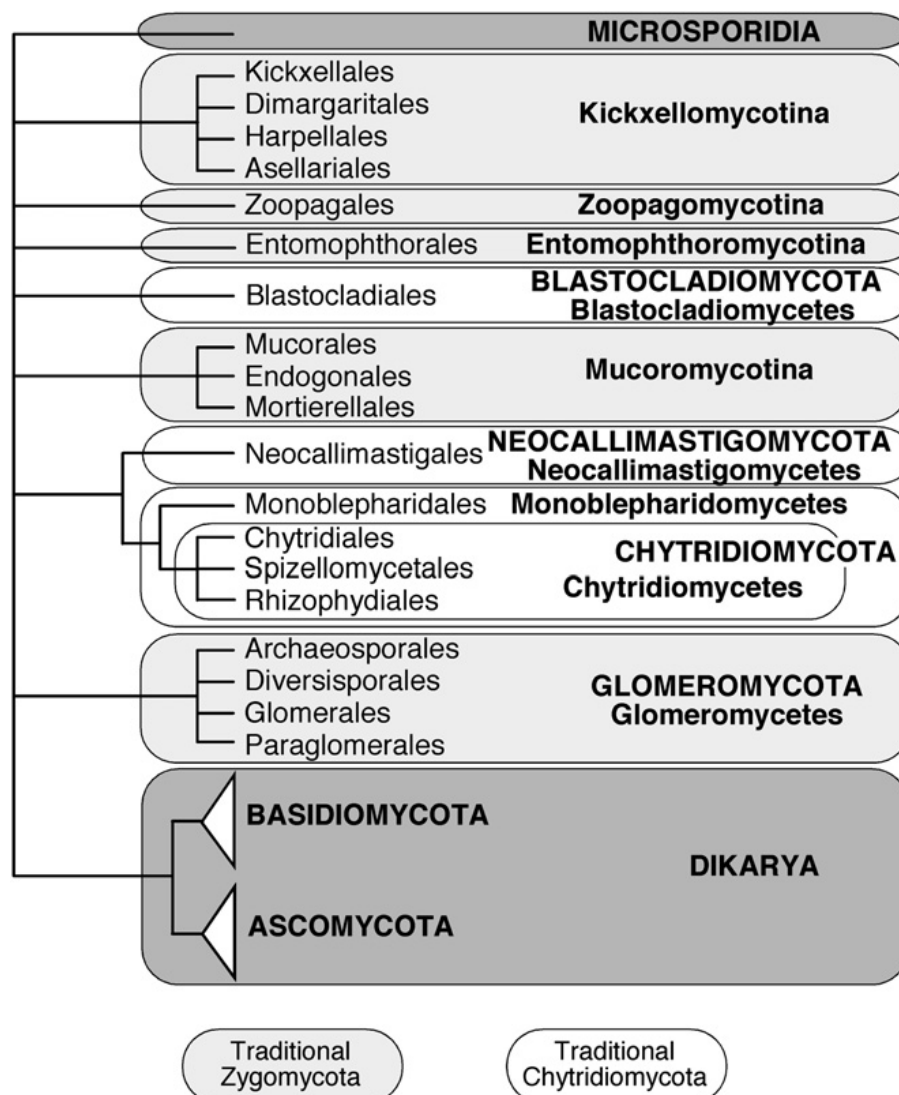


Εικ 1: Φυλογενετικό δέντρο μυκήτων (Berbee et al., 2007)

## 1.1.2 Ταξινόμηση Μυκήτων

Το Βασίλειο των Μυκήτων αποτελεί μια ποικιλόμορφη κατηγορία ετερότροφων οργανισμών γι'αυτό και χρειάστηκε αρκετός χρόνος για μια ολοκληρωμένη φυλογενετική ταξινόμηση. Αυτή ξεκίνησε απ'τον Ernst Haeckel (1866) και τη διάκριση τριών βασιλείων (Φυτά, Ζώα, Πρώτιστα), ακολουθήθηκε απ'την επιδραστική έρευνα του Whittaker (1969), ο οποίος διέκρινε πέντε βασιλεία - 4 ευκαρυωτικά (Φυτά, Ζώα, Μύκητες, Πρώτιστα (πρωτόζωα και φύκη) και 1 μονοκαρυωτικό - Μονήρη (βακτήρια και αρχαία) (Moore *et al.*, 2020). Η μοριακή επανάσταση στην ταξινόμηση των μυκήτων ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, με γονίδια ριβωσομικού RNA ενισχυμένα μέσω PCR (White *et al.* 1990). Τα εργαλεία αυτά συντέλεσαν στην αναθεώρηση της ταξινομικής κατάταξης των μυκήτων.

Σύγχρονα με σχετικά επιστημονικά δεδομένα των Hibbett *et al* (2007), το βασίλειο των μυκήτων περιλαμβάνει 7 φύλα (Microsporidia, Blastocladiomycota, Neocallimastigomycota, Chytridiomycota, Glomeromycota, Basidiomycota, Ascomycota), 10 υποφύλα και 35 τάξεις με τα φύλα των Ασκομυκήτων και Βασιδιομυκήτων να συγκαταλέγονται στο υποβασίλειο Dikarya, στους λεγόμενους Ανώτερους (ή Αληθείς) Μύκητες (Εικ.2). Σύμφωνα όμως με νεώτερα δεδομένα, τα φύλα αυτά γίνονται 8 περιλαμβάνοντας τα Cryptomycota, Microsporidia, Blastocladiomycota, Chytridiomycota, Zoopagomycota, Mucoromycota, Ascomycota, and Basidiomycota (Spatafora *et al.*, 2018). Η ταξινόμηση των μυκήτων αποτελεί μία διαρκή αναθεώρηση όσο νέα δεδομένα προστίθενται στη μελέτη τους.



**Εικ 2:** Σύγχρονη φυλογένεση και ταξινόμηση των μυκήτων (Hibbett *et al.*, 2007)

## 1.2 Γενικά στοιχεία περί βασιδιομυκήτων

Μύκητες του φύλου Basidiomycota υπάρχουν σε όλα τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη της γης και παρουσιάζουν μία εντυπωσιακή ποικιλομορφία ως προς το μέγεθος και τη μορφή. Μαζί με το φύλο Ascomycota (ασμοκύμητες) συγκροτούν το υποβασιλείο Dikarya, το οποίο συναντάται ως “Ανώτεροι Μύκητες”. Αποτελούν το 25-30% του συνόλου των μυκήτων με περίπου 32,000 γνωστά είδη, καλά ανεπτυγμένο μυκήλιο και μία σειρά ιδιαίτερων περιπτώσεων όπως βιοφωταύγεια (Kirk *et al.*, 2008; Taylor *et al.*, 2015). Ωστόσο, μοριακές και γενετικές μελέτες υποδεικνύουν ότι μπορεί να υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλομορφία σε αυτήν την ομάδα που δεν έχει ακόμη ανακαλυφθεί με τον αριθμό τους να αγγίζει τους 40,000 (He & Zhao, 2021).

Οι βασιδιομύκητες μορφολογικά, οικολογικά και ταξινομικά αποτελούν μία ομάδα με μεγάλη ποικιλία και είναι πιθανότατα ένας μονοφυλετικός κλάδος αποτελούμενος από τρία υποφύλα (εικ. 4). Το ένα εκ των οποίων, το υποφύλο Agaricomycotina, απαρτίζεται από μύκητες που σχηματίζουν μακροσκοπικά ορατές αναπαραγωγικές δομές (καρποσώματα), τα βασιδιοκάρπια ή βασιδιώματα, στα οποία παράγονται τα βασίδια, εξειδικευμένα κύτταρα-όργανα. Βασικό γνώρισμα των βασιδιοκαρπίων είναι ο σχηματισμός εγγενών (μειωτικών) σπορίων που ονομάζονται βασιδιοσπόρια στα βασίδια.

Περιλαμβάνουν πολλά γνώριμα μανιτάρια (μακρομύκητες), σαπροτροφικούς, ζελατινώδεις και παρασιτικούς (σκωριάσεις, άνθρακες) μύκητες, ζύμες και άλλες όχι τόσο γνώριμες μορφές μυκήτων. Οι περισσότεροι βασιδιομύκητες είναι χερσαίοι με διασπορά των σπορίων τους μέσω ανεμοχωρίας, αλλά υπάρχουν και αυτοί που απαντώνται σε θαλάσσια ή και γλυκά νερά.

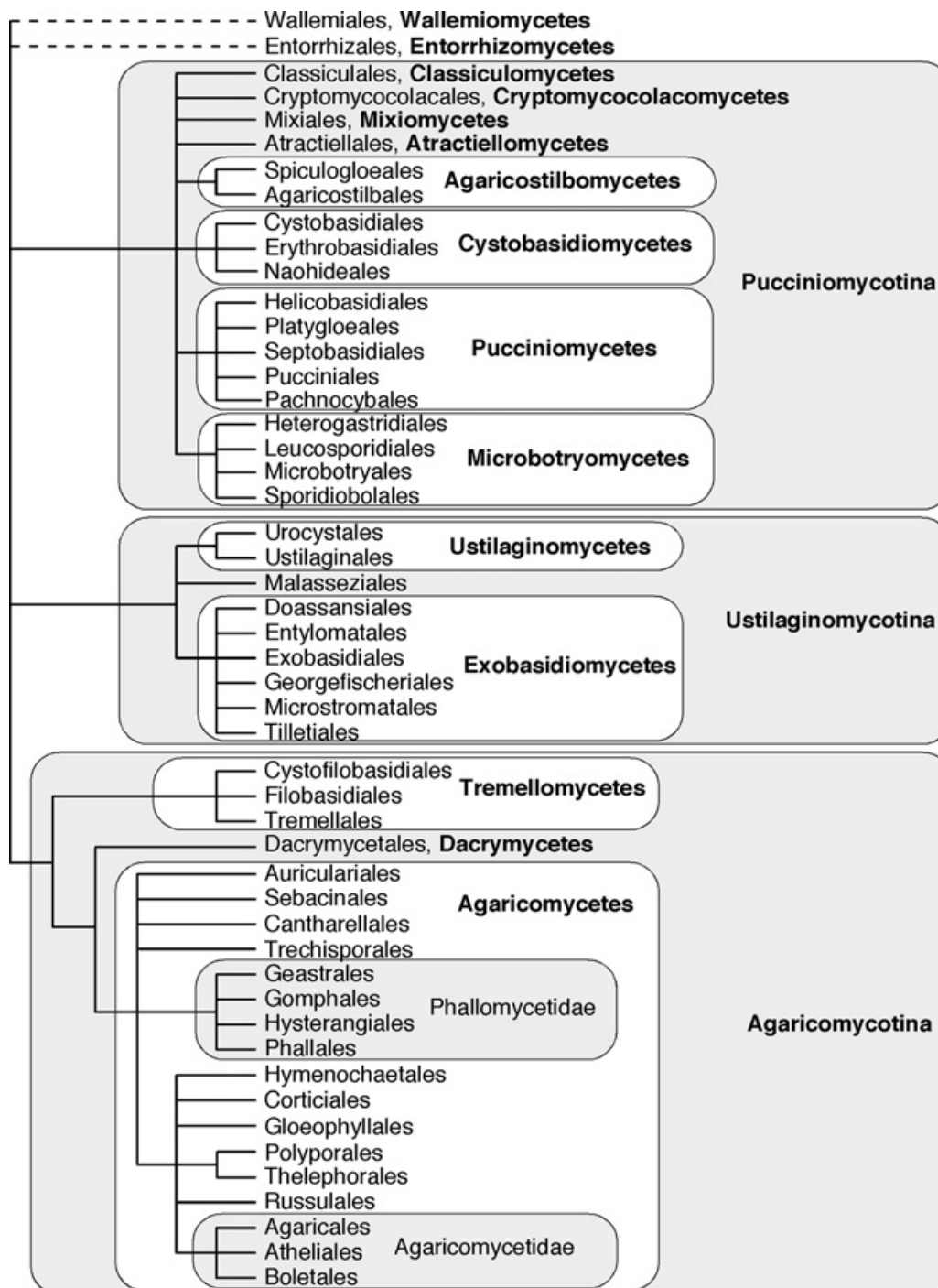
Τα περισσότερα είδη είναι σαπροτροφικά, τρέφονται δηλαδή με νεκρά τμήματα φυτών και παίζουν ζωτικό ρόλο στην ανακύκλωση των θρεπτικών ενώ παράλληλα μπορούν και να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές ως φορείς αποσύνθεσης του ξύλου (ξυλοσηπτικοί μύκητες, WDF). Τα καρποφόρα σώματα πολλών μανιταριών είναι εδώδιμα και κάποια καλλιεργούνται εμπορικά για κατανάλωση (κοινές περιπτώσεις είναι τα *Agaricus bisporus*, *Pleurotus* spp. και *Lentinula edodes*), ενώ κάποια άλλα είναι δηλητηριώδη όπως η *Amanita phalloides*. Υπάρχουν και τα παραισθησιογόνα όπως η *Amanita muscaria* και είδη του γένους *Psilocybe*, *Stropharia* και άλλα (Webster & Weber, 2007). Πολλά είδη είναι μυκορριζικά και αναπτύσσουν συμβιωτικές σχέσεις με δασικά κυρίως δέντρα όπως η ελιά (*Olea*), τα πεύκα (*Pinus*) και άλλα (Καψανάκη-Γκότση, 1996).

Το μυκήλιο των βασιδιομυκήτων μπορεί να ζήσει πολλά χρόνια. Εκτιμήσεις βασιζόμενες στο ρυθμό ανάπτυξης και τη διάμετρο των κύκλων στα λεγόμενα “fairy rings” του μύκητα *Marasmius oreades* που αναπτύσσεται σε λιβάδια υπολογίστηκε πως είναι εκατοντάδων ετών. Παράλληλα, από μελέτες έχει βρεθεί ότι η ηλικία του μυκηλίου μύκητα του γένους *Armillaria* σε δάσος στον Καναδά είναι τουλάχιστον 1500 ετών, με έκταση 15 εκταρίων και πιθανή βιομάζα περίπου 10 τόνους (Smith *et al.*, 1992).

Παρακάτω παρουσιάζονται βασιδιομύκητες που έχω φωτογραφήσει προσωπικά σε εξορμήσεις στην ύπαιθρο (Εικ. 3).



**Εικ. 3:** 1. *Ramaria* sp., 2. *Guepinia* sp., 3. *Hydnocristella himantia*, 4. *Lycoperdon* sp., 5. *Rhodocollybia* sp., 6. *Omphalotus olearius*, 7. *Mycena* sp. 8. *Geastrum* sp. (Εικόνες από το προσωπικό αρχείο)



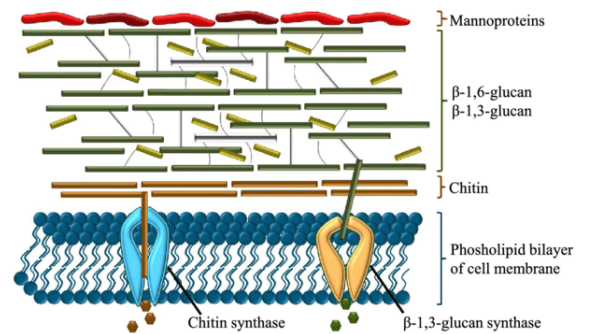
**Εικ 4:** Σύγχρονη φυλογένεση και ταξινόμηση βασιδιομυκήτων (Hibbett *et al.*, 2007)



### 1.3 Δομή κυττάρων και βιολογικός κύκλος (με έμφαση στο φύλο Basidiomycota)

Οι μύκητες παράγουν μία ποικιλία κυταρικών μορφολογιών προκειμένου να αποικίσουν και να προσαρμοστούν σε νέα περιβάλλοντα (Esser *et al.*, 2006). Ο κυτταρικός κύκλος είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό όλων των διαιρούμενων κυττάρων (Murray and Hunt 1993, Esser *et al.*, 2006). Το σώμα των μυκήτων είτε αποτελείται από ένα κύτταρο, είναι δηλαδή μονοκύτταρο (στην περίπτωση αυτή μιλάμε για ζύμες), είτε, όπως συμβαίνει στην πλειοψηφία των μυκήτων, είναι πολυκύτταροι και το σώμα τους αποτελείται από διακλαδισμένα ή μη, σωληνοειδή, μικροσκοπικά νημάτια, τις υφές (hyphae). Το σύνολο των υφών αποτελεί το μυκήλιο (mycelium), ενώ συλλογικά το σώμα των μυκήτων ονομάζεται θαλλός (thalus) (Παντίδου, 1976). Το μυκήλιο διευκολύνει υποστηρικτικά τη μεταφορά νερού και θρεπτικών συστατικών. Οι υφές, οι οποίες συνήθως παράγονται από τη βλάστηση ενός σπορίου παρουσιάζουν επάκρια αύξηση και μπορεί να φέρουν ή όχι εγκάρσια τοιχώματα, τα λεγόμενα διαφράγματα ή σέπτα (septa) τα οποία και αποτελούν τον τρόπο διαμερισματοποίησης τους (septation). Η απουσία ή παρουσία σέπτων χωρίζει τους μύκητες σε δύο ομάδες, τους Κατώτερους (Μαστιγομύκητες και Ζυγομύκητες) και τους Ανώτερους μύκητες (Ασκομύκητες, Βασιδιομύκητες και Δευτερομύκητες), αντίστοιχα.

Το μυκήλιο είναι καλά αναπτυγμένο, αλλά συνήθως αόρατο γιατί εισχωρεί στο έδαφος, το ξύλο ή άλλο υπόστρωμα. Το κυτταρικό τοίχωμα των υφών, στις περισσότερες περιπτώσεις, αποτελείται από μικρονημάτια χιτίνης (πολυμερές) (Εικ. 5).



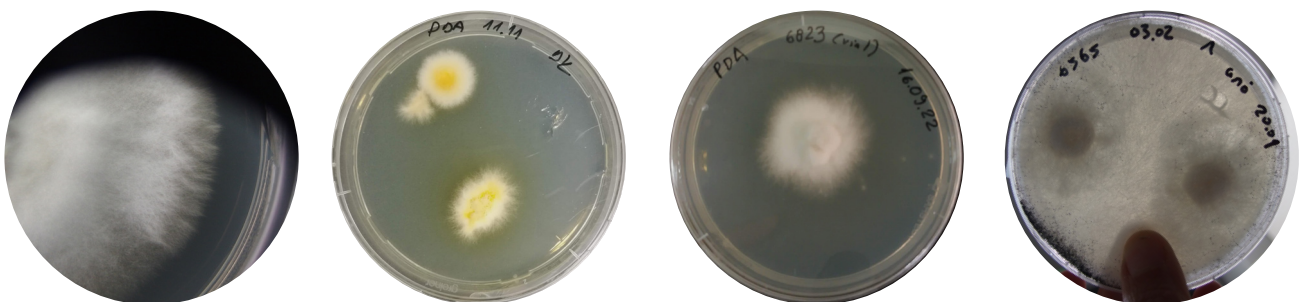
Εικ 5: Κυτταρικό τοίχωμα μυκήτων (Fesel and Zuccaro, 2016)

Στους μύκητες η αναπαραγωγή γίνεται με δύο τρόπους, αγενώς και εγγενώς. Η αναπαραγωγή των μυκήτων είναι αρκετά πολύπλοκη διαδικασία με τους περισσότερους μύκητες να αναπαράγονται και με τους δύο τρόπους. Τυπική μονάδα τόσο της αγενούς όσο και της εγγενούς αναπαραγωγής είναι το σπόριο. Τα αγενή (μιτωτικά) σπόρια χρησιμεύουν ως μέσο διασποράς σε νέο υπόστρωμα, με σκοπό την αναπαραγωγή με άλλα άτομα. Τα εγγενή σπόρια απ'την άλλη, παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία. Τα μειωτικά σπόρια σχηματίζονται μέσα σε ειδικά αναπαραγωγικά όργανα ανάλογα με την ομάδα των μυκήτων, και έτσι έχουμε τα ασκοσπόρια όταν πρόκειται για ασκομύκητες και τα βασιδιοσπόρια όταν πρόκειται για βασιδιομύκητες.

Τα καρποφόρα σώματα είναι προσαρμογές για αέρια διάδοση των εγγενών βασιδιοσπορίων από το μυκήλιο, τα οποία αναπτύσσονται σε υγρά υποστρώματα. Τα βασιδιοκάρπια αναπτύσσονται από το υπόγειο μυκήλιο. Ο σχηματισμός αυτού του μυκηλίου ξεκινά με τη βλάστηση ενός αγενούς ή εγγενούς σπορίου (Esser and Brown, 2006; Webster & Weber, 2007). Τα βασίδια σχηματίζονται στην κατώτερη συνήθως στρώση ενός βασιδιοκαρπίου που λέγεται υμένιο (hymenium) ή γόνιμος ιστός το οποίο παίρνει διάφορους σχηματισμούς, όπως ελάσματα, πόρους ή δόντια (εικόνα 6).

Ο αγενής πολλαπλασιασμός θεωρείται ιδιαίτερης σημασίας καθώς έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή πολύ μεγάλου αριθμού σπορίων και συνεπώς ευκολότερη διασπορά. Αγενής αναπαραγωγή μπορεί να παρατηρηθεί σε καλλιέργειες μυκήτων στα διάφορα θρεπτικά υποστρώματα στο εργαστήριο (Παντίδου, 1976) (Εικ. ).

Απ'την άλλη πλευρά, ο εγγενής πολλαπλασιασμός (μείωση) συνδράμει στη γενετική ποικιλομορφία ως απαραίτητο στοιχείο της ανταγωνιστικότητας ενός είδους και της ικανότητας του να ανταποκριθεί στις διάφορες πιέσεις της φυσικής επιλογής.

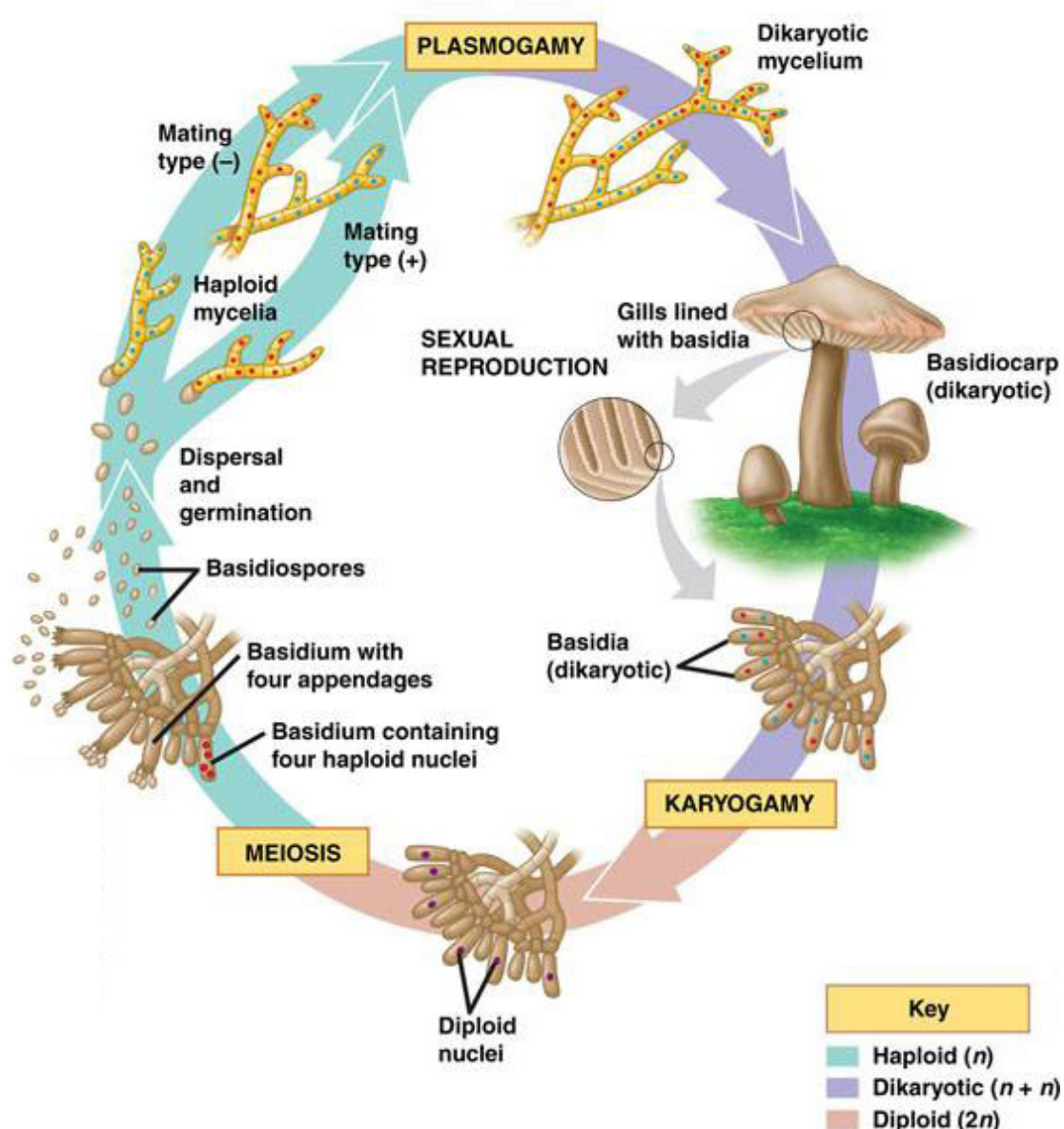


Εικ. 6: Φωτογραφίες ανάπτυξης διαφόρων στελεχών σε τρυβλία PDA (εικόνες από το προσωπικό αρχείο)

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των βασιδιομυκήτων, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, είναι ότι σχηματίζουν τα μειωτικά τους σπόρια (βασιδιοσπόρια) πάνω σε ένα εξειδικευμένο κύτταρο που λέγεται βασίδιο. Η παραγωγή βασιδιοσπορίων πάνω σε βασίδια είναι καθοριστικό κριτήριο για την κατάταξη ενός μύκητα στο φύλο των βασιδιομυκήτων (αναλυτικά στην εικόνα 7).

Οι κρίκοι, σχηματισμοί που παρατηρούνται κατά τη δικάρυα φάση, διασφαλίζουν ότι οι θυγατρικοί πυρήνες που θα προκύψουν από τη διαίρεση των 2 πυρήνων ενός κυττάρου θα κατανεμηθούν στο νεοσχηματιζόμενο επάκριο κύτταρο, όπως και σε κάθε νέο κύτταρο. Η παρουσία τους υποδηλώνει ότι ένας μύκητας ανήκει στους βασιδιομύκητες ενώ αντίθετα, η απουσία τους δεν αποκλείει την πιθανότητα το μύκηλο να είναι δικάρυο ή ότι ο μύκητας ανήκει στους βασιδιομύκητες (Καψανάκη-Γκότση, 1996).

Η θρέψη των μυκήτων είναι από τους σημαντικότερους κλάδους της μυκητολογίας. Σαν ετερότροφοι (χημειο-οργανότροφοι) οργανισμοί, οι μύκητες για να τραφούν εξαρτώνται από τις προσχηματισμένες οργανικές ενώσεις του υποστρώματος στο οποίο αναπτύσσονται. Το χιτινοειδές κυτταρικό τους τοίχωμα τους αναγκάζει να λάβουν την τροφή τους μέσω της αερόβιας οξείδωσης (ή πιο απλά απορρόφησης) απλών, διαλυτών ενώσεων που απελευθερώνονται από πιο πολύπλοκες πολυμερικές ενώσεις μέσω ενζύμων που αυτοί εκκρίνουν στο εκάστοτε οικοσύστημα (Παντίδου, 1976).



Εικ. 7: Αγενής και Εγγενής Αναπαραγωγή Βασιδιομυκήτων (Campbell and Reece *et al.*, 2009)

## 1.4 ΟΙΚΟΛΟΓΙΑ ΜΥΚΗΤΩΝ (με έμφαση στο φύλο Basidiomycota)

Στα χερσαία οικοσυστήματα, οι βασιδιομύκητες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποικοδόμηση σε κάθε δασικό οικοσύστημα και απαντώνται ως σαπροτροφικοί στα διάφορα υποστρώματα, ως συμβιωτικοί ή και σε κάποιες περιπτώσεις ως παρασιτικοί. Πιο συγκεκριμένα, η ομάδα των σαπροτροφικών βασιδιομυκήτων αποκτούν την ενέργεια, τον άνθρακα και τα υπόλοιπα θρεπτικά συστατικά μέσω της αποικοδόμησης της νεκρής οργανικής ύλης και μπορεί να διακριθεί σε δύο επιμέρους κατηγορίες, αυτή των σαπροτροφικών του εδάφους και αυτή των σαπροτροφικών του ξύλου.

### 1.4.1 Σαπροτροφικοί Μύκητες

Όλοι οι μύκητες απαιτούν μία οργανική πηγή άνθρακα και ενέργειας, όπως επίσης και έναν συνδυασμό αζώτου, φωσφόρου και θείου, κάλιου και μαγνησίου, μεταξύ άλλων στοιχείων σε ιχνοποσότητες. Οι ίδιοι έχουν εξελιχθεί να χρησιμοποιούν κάθε διαθέσιμη πηγή άνθρακα μέσω ενζύμων που εκκρίνουν, από νεκρά δέντρα μέχρι και ζωντανούς ιστούς στις διάφορες οικοθέσεις που συναντώνται. Τόσο την ενέργεια όσο και τον άνθρακα τα λαμβάνουν από σάκχαρα μέσω τριών οδών (γλυκόλυση, τρικαρβοξυλικά οξέα και φωσφορικές πεντόζες). Αν και η γλυκόζη είναι ο βασικός προκάτοχος για αυτές τις οδούς, οι μύκητες σπάνια τη βρίσκουν ελεύθερη στη φύση. Αντ' αυτού, μια πιο ευρέως διαθέσιμη και αξιόπιστη πηγή είναι η κυτταρίνη από υπολείμματα φυτών ή οι ιστού ζωντανών ξενιστών. Η πιο ανθεκτική πηγή κυτταρίνης στη φύση είναι το ξύλο. Η αποσύνθεση του ξύλου μέσω μυκήτων παίζει καθοριστικό ρόλο στον κύκλο του άνθρακα στα διάφορα οικοσυστήματα. Η λιγνινοκυτταρρινολυτική δράση των βασιδιομυκήτων εφαρμόζεται μέσω του μυκηλίου τους το οποίο απελευθερώνει κυτταρρινολιγνινολυτικά ένζυμα που αναπτύσσονται πάνω στο ξύλο και κατά κανόνα τρέφονται από αυτό προκαλώντας δομικές αλλαγές στους ξυλώδεις ιστούς. Το ξύλο περιέχει 40-45% κυτταρίνη η οποία όμως αποσυνθέτεται αργά λόγω της λιγνίνης που περιβάλλει τις ίνες κυτταρίνης. Η λιγνινοκυτταρίνη αντιπροσωπεύει την πιο άφθονη πηγή άνθρακα στη γη (Tonar-Herrera *et al.*, 2018). Αποτελεί ένα υδροφοβικό πολυμερές ανθεκτικό σε μικροβιακές επιθέσεις και μη αξιοποιήσιμο από τους μύκητες.

Οι τρεις βασικές κατηγορίες ξυλοσηπτικής μυκητιακής δράσης ανάλογα με τα συστατικά του κυτταρικού τοιχώματος που αποικοδομούνται είναι οι μύκητες λευκής σήψης (white-rot), οι μύκητες καστανής (brown-rot) σήψης και οι μύκητες μαλακής σήψης (soft-rot).

#### 1.4.1.1 Μύκητες λευκής σήψης (White-rot fungi, WRF)

Οι μύκητες λευκής σήψης έχουν εκτενέστερη παρουσία στη διεθνή βιβλιογραφία (Εικ. 9). Η λευκή σήψη προκαλείται από είδη μυκήτων τόσο από βασιδιομύκητες όσο και από ασκομύκητες και είναι η πιο κυρίαρχη μορφή σήψης στα αγγειόσπερμα.

Οι μύκητες λευκής σήψης φαίνεται από τη βιβλιογραφία ότι μπορούν να παράξουν διαφορετικά λιγνινολυτικά ένζυμα με κυριότερα τα εξωκυτταρική υπεροξειδάση της λιγνίνης (lignin peroxidase, LiP), εξωκυτταρική υπεροξειδάση του μαγγανίου (manganese dependent peroxidase, MnP), εξωκυτταρική λακκάση (laccase, Lac) και η αλκυλο-αρυλο-εθεράση (alkyl aryl etherase) και ως εκ τούτου είναι σε θέση να αποικοδομούν ή να ανοργανοποιούν αρκετούς οργανικούς ρύπους (Chen *et al.* 2012; Αντωνοπούλου, 2014). Ανάμεσα στους μύκητες λευκής σήψης που έχουν μελετηθεί για την ικανότητα βιοαποικοδόμησης ξενοβιοτικών οργανικών ρύπων και την επεξεργασία αποβλήτων είναι και ο *Pleurotus ostreatus* (Gao *et al.*, 2010).

Όλα τα παραπάνω αποτελούν παραδείγματα ενός σχετικά καινούριου αλλά με πολλές δυνατότητες τομέα, αυτού της περιβαλλοντικής (βιο)τεχνολογίας με τη χρήση μυκήτων λευκής σήψης, έννοια που προτάθηκε περίπου τη δεκαετία του 1980 (Bumpus and Aust, 1987; Tien, 1987; Aust, 1990; Gao *et al.*, 2010).



### 1.4.1.2 Μύκητες καστανής σήψης (Brown-rot fungi, BRF)

Οι μύκητες καστανής σήψης κυριαρχούν ως αποικοδομητές ξύλου σε δάση μεγαλύτερου γεωγραφικού πλάτους (Zhang J., *et al.*, 2022). Σε αντίθεση με τους μύκητες λευκής σήψης, οι μύκητες καστανής σήψης αποικοδομούν την κυτταρίνη και ημικυταρρίνη εντός του συμπλέγματος λιγνοκυτταρίνης χωρίς να επηρεάζουν τη λιγνίνη έτσι ώστε να παραμένει ένα καστανό υπόλειμμα του πολυμερούς. Περίπου το 80% της καστανής σήψης σχετίζεται με κωνοφόρα όπου προκαλεί τη διάσπαση του εσωτερικού στρώματος (S2) των κυτταρικών τοιχωμάτων, δίνοντας στο σάπιο ξύλο έναν καφέ χρωματισμό (Εικ. 9).

Εδώ, το αρχικό στάδιο είναι μη-ενζυμικό όπου παράγονται χημικές ενώσεις για τη διάσπαση της κυταρρίνης και ημικυταρρίνης ακολουθούμενα από ένζυμα τα οποία απελευθερώνουν σάκχαρα από τους υδατάνθρακες τα οποία στη συνέχεια απορροφούνται από το μύκητα.

### 1.4.1.3 Μύκητες μαλακής σήψης (Soft-rot fungi, SRF)

Αυτή η ομάδα αν και δεν έχει μελετηθεί τόσο πολύ ως προς τα αποικοδομητικά ενζυματικά συστήματα, χαρακτηρίζεται από την ικανότητα αποικοδόμησης πολυσακχαριτών που βρίσκονται συχνά στα εξωτερικά στρώματα σομφού με σχετικά αργό και επιφανειακό τρόπο. Το ξύλο που έχει προσβεβληθεί από μύκητα μαλακής σήψης γίνεται μαλακό όταν βραχεί, παρουσιάζει ρωγμές λόγω συρρίκνωσης όταν στεγνώνει και γίνεται σκόνη όταν τρίβεται.

Το μοντέλο σήψης αυτό οφείλεται κυρίως στο φύλο των ασκομυκήτων με κάποιες εξαιρέσεις βασιδιομυκήτων όπου παρατηρήθηκε ένας μηχανισμός μεταγωγής από το κανονικό μοτίβο αποσύνθεσης (σε κάποιες περιπτώσεις από λευκή σήψη και σε άλλες σε καστανή) σε μια μαλακή σήψη (Εικ. 8). Η τελευταία παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με την καστανή σήψη καθώς αποικοδομεί την κυταρρίνη, αφήνοντας ανέγγιχτη τη λιγνίνη αλλά παρουσιάζει τον ίδιο σχηματισμό κοιλότητας (cavity formation) με τη λευκή σήψη (Morris *et al.*, 2016).

Ακολουθούν φωτογραφίες από τις παραπάνω κατηγορίες ξυλοσηπτικών μυκήτων:



Εικ. 8: Ξύλο προσβεβλημένο από μύκητα μαλακής σήψης (Carvalho *et al.*, 2018)



Εικ. 9:  
Εικόνα αριστερά: Μύκητας λευκής σήψης (Mariano *et al.*, 2020)

Εικόνα δεξιά: Μύκητας καστανής σήψης ([Forest pathology](#))

## 1.5 Φυσικές ίνες

Οι φυσικές ίνες, ως δομικά υλικά για κτίρια ήταν γνωστές πολύ πριν. Για αιώνες, μείγματα άχυρου και αργίλου, που ξεραίνονταν στον ήλιο, χρησιμοποιήθηκαν ως σύνθετα υλικά κατασκευής. Λόγω των χαμηλών τιμών και της σταθερά αυξανόμενης απόδοσης των τεχνικών πλαστικών, η εφαρμογή των φυσικών ινών σχεδόν σταμάτησε (Bledzki et Gassan, 1999).

Η χρήση των φυσικών ινών στην ανάπτυξη θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων σύνθετων υλικών ως ένα από τα θέματα που έχουν ερευνηθεί περισσότερο τα τελευταία χρόνια προέκυψε από τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουμε εδώ και κάποιες δεκαετίες. Η αλλαγή στα συστήματα υλικών μας σχετίζεται άμεσα με τη μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων (πρώτη ύλη για πλαστικό), τις υπέρμετρες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και των συνολικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής τους.

Οι φυσικές ίνες παρουσιάζουν μία πληθώρα πλεονεκτημάτων και εγγενών ιδιοτήτων σε σχέση με τις συνθετικές/ κατασκευασμένες (synthetic/ manufactured, engineered fibers). Μεταξύ άλλων είναι περιβαλλοντικά φιλικές, μη δραστικές (non-abrasive) με τον εξοπλισμό κατά την επεξεργασία, έχουν σχετικά χαμηλό κόστος, προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές, είναι χαμηλής πυκνότητας (1,2–1,6 g/cm<sup>3</sup> σε σχέση με αυτή των ινών γυαλιού (2.4 g/cm<sup>3</sup>). Οι ιδιότητες αυτές οδηγούν στη δημιουργία ελαφρότερων σύνθετων υλικών και συνεπώς στην αύξηση της ζήτησης των σύνθετων με βάση τις ίνες κάνναβης υλικών σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους (Thyaviahalli et al., 2019) και παράλληλα έχουν υψηλή ειδική αντοχή και ακαμψία. Κατά μέσο όρο, η παραγωγή τους χρησιμοποιεί 60% λιγότερη ενέργεια από την αντίστοιχη παραγωγή γυαλιού και καταλήγει σε χαμηλότερες εκπομπές αερίων. Επιπλέον, τα υπολείμματα της παραγωγής είναι κυρίως οργανικά και 100% βιοδιασπώμενα (Manaia et al., 2019) και κατά την επεξεργασία τους οι φυσικές ίνες δεν παράγουν επιβλαβή αέρια (Mochane et al., 2019).

Οι φυσικές ίνες εξάγονται από διαφορετικούς ανανεώσιμους πόρους και χαρακτηρίζονται ανάλογα με την προέλευση τους (φυτά, ζώα, ορυκτά).

Σε αυτό το σημείο να πούμε πως ενώ είναι αρκετά τα πλεονεκτήματα της χρήσης φυσικών ινών σε δομικές - αλλά όχι μόνο - εφαρμογές, υπάρχουν επίσης και ορισμένα μειονεκτήματα. Τα κυριότερα αυτών είναι ο υδρόφιλος χαρακτήρας των ινών λόγω της ύπαρξης υδροξυλομάδων στην επιφάνειά τους, η χαμηλή αντίσταση σε μικροοργανισμούς, η χαμηλή θερμική σταθερότητα, οι διακυμάνσεις στις μηχανικές ιδιότητες και οι χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από αυτές των συνθετικών ινών (Saba et al., 2016; Mochane et al., 2019). Οι φυσικές ίνες επηρεάζονται εύκολα από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, με την ευαισθησία στην υγρασία να αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα ο οποίος έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας με λύσεις όπως οι επιφανειακές επεξεργασίες (surface treatment) να σημειώνουν αξιοσημείωτα αποτελέσματα. Σε γενική παραδοχή, η αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες (Bledzki & Gassan, 1999).

Παρακάτω βλέπουμε έναν συγκεντρωτικό πίνακα της χημικής σύστασης ορισμένων φυσικών ινών.

**Table 1. Chemical composition of some natural fibers.**

Fiber	Cellulose (wt%)	Lignin (wt%)	Hemicellulose (wt%)	Pectin (wt%)	Wax (wt%)	Moisture content (wt%)
Jute	61–71.5	12–13	13.6–20.4	0.4	0.5	12.6
Hemp	70.2–74.4	3.7–5.7	17.9–22.4	0.9	0.8	10
Kenaf	31–39	15–19	21.5	–	–	–
Flax	71	2.2	18.6–20.6	2.3	1.7	10
Ramie	68.6–76.2	0.6–0.7	13.1–16.7	1.9	0.3	8
Sunn	67.8	3.5	16.6	0.3	0.4	10
Sisal	67–78	8–11	10.0–14.2	10	2.0	11
Henquen	77.6	13.1	4–8	–	–	–
Cotton	82.7	–	5.7	–	0.6	–
Kapok	64	13	23	23	–	–
Coir	36–43	41–45	10–20	3–4	–	8
Banana	63–67.6	5	19	–	–	8.7
PALF	70–82	5–12	–	–	–	11.8

Πίνακας 1: Χημική σύνθεση ορισμένων φυσικών ινών (Manaia et al., 2019)



# ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΝΕΣ



Εικ. 10: Φυσικές ίνες, προσαρμοσμένη από τους Mochane et al., 2019



### 1.5.1 Φυτικές Ίνες

Οι φυτικές ίνες (plant ή vegetable fibers) περιέχουν κυτταρίνη ως το κύριο δομικό τους συστατικό και άλλες οργανικές συνθέσεις όπως ημικυτταρίνες, λιγνίνη (άμορφη), πηκτίνη, και άλλα (Bledzki & Gassan, 1999). Οι κυτταρικές δομές των φυσικών ινών είναι σχετικά περίπλοκες, με τις ίνες να αποτελούν σύνθετα άκαμπτων κυτταρινικών μικροϊνών ενσωματωμένων σε μία μαλακή μήτρα λιγνίνης και ημικυτταρίνης (Dick-er *et al.*, 2013). Η ημικυτταρίνη είναι το δεύτερο πιο άφθονο οργανικό υλικό στη γη μετά την κυτταρίνη με το σύνολο τους να παρουσιάζει υδρόφιλο χαρακτήρα σε αντίθεση με τη λιγνίνη που είναι υδρόφοβη.

Λιγνινοκυτταρινικές ίνες όπως το λινό (*Linum usitatissimum*), η κλωστική κάνναβη (*Cannabis sativa*), το kenaf (*Hibiscus cannabinus*), το σιζάλ (*Agave fourcroydes*), ο φοίνικας (*Cocos nucifera*) και η γιούτα (*Corchorus capsularis* και *C. olitorius*), μεταξύ πολλών άλλων, έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον βιομηχανιών όπως αυτών του υφάσματος, της αυτοκίνησης, της αεροδιαστημικής, των κατασκευών και της συσκευασίας ως υποκατάστατα των συνθετικών ινών, όπως οι ίνες γυαλιού και άνθρακα (Gurunathan *et al.*, 2015).

Οι φυτικές ίνες αποτελούνται κυρίως από κυτταρίνη, ημικυτταρίνες, λιγνίνη, πηκτίνη και άλλα εκχυλίσματα σε χαμηλή ποσότητα και διακρίνονται με βάση το τμήμα του φυτού απ' το οποίο προέρχονται. Συνεπώς, υπάρχουν οι ίνες από το εσωτερικό φλοιό του φυτού (bast fibres) όπως το λινό, η βιομηχανική κάνναβη, το kenaf και η γιούτα και οι σκληρές ίνες (hard fibres) όπως το σιζάλ και ο φοίνικας.

Οι μαλακές (bast) ίνες ονομάζονται επίσης και βλαστικές ίνες (stem fibres), επειδή λαμβάνονται από το βλαστό του φυτού, δηλαδή από τα εσωτερικά κυτταρικά στρώματα (Peças *et al.*, 2018) (Εικ. 10).

Συνήθως οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικές αντικαταστάσεις των συμβατικών ενισχυτικών ινών σε θερμοπλαστικές μήτρες (matrixes) - πολυεστέρες όπως το πολυπροπυλένιο (polypropylene, PP), το πολυαιθυλένιο (polyethylene, PE), το πολυστυρένιο (polystyrene, PS), το πολυβινυλοχλωρίδιο (poly vinyl chloride, PVC) και το πολυλακτίδιο (polylactic acid, PLA) (Manaia *et al.*, 2019; Sain *et al.*, 2005; (Mochane *et al.*, 2019).

Η επιλογή των φυτικών ινών - πρώτη ύλη ανάπτυξης των πλεκτών δομών πάνω στις οποίες θα αναπτυχθεί το μνήλιο είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος με βασικά κριτήρια επιλογής τόσο το περιβαλλοντικό αποτύπωμα όσο και τις μηχανικές ιδιότητες τους. Η κλωστοϋφαντουργία όσο και ο κατασκευαστικός τομέας (όπως ήδη αναφέραμε στο πρώτο μέρος) είναι από τις πιο ρυπογόνες βιομηχανίες στον κόσμο με την επιλογή περιβαλλοντικά φιλικών υλικών να αποτελεί πλέον καίρια ανάγκη και υποχρέωση των εταιρειών.

Στις επόμενες δύο παραγράφους αναλύονται περαιτέρω οι δύο φυσικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας.

Table 1. Chemical composition of plant fibers.

Fiber	Origin	Cellulose (%)	Lignin (%)	Hemicellulose (%)	Pectin (%)	Wax (%)	Ash (%)	Microfibrillar Angle (°)
Hemp	Bast	70-74	3.5-5.7	15-20	0.8	1.2-6.2	0.8	2-6.2
Jute	Bast	61-72	12-13	18-22	0.2	0.5	0.5-2	8
Sisal	Leaf	78	8	10	-	2	1	-
Flax	Bast	64-72	2-2.2	18-20	1.8-2.3	-	-	5-10
Ramie	Bast	69-91	0.4-0.7	5-15	1.9	-	-	7.5
Harakeke	Leaf	56-64	7.8	23-31	-	-	-	-
Coconut Coir	Fruit	36-43	0.15-0.25	41-45	3-4	-	-	30-49
Kenaf	Bast	45-57	22	8-13	0.6	0.8	2-5	2-6.2

Πίνακας 2: Χημική σύνθεση φυτικών ινών (Manaia *et al.*, 2019)

### 1.5.1.1 Γιούτα

Σύμφωνα με την Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας του ΟΗΕ, (FAO, 2023), η γιούτα χαρακτηρίζεται ως μία από τις “χρυσές ίνες (golden fibre)” του μέλλοντος λόγω του χρυσού της χρώματος και της μεταξένιας λάμψης της και αποτελεί μία από τις πιο μακριές και πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ίνες στον τομέα των υφασμάτων.

Οι ίνες εξάγονται από τον κορμό φυτών του γένους *Corchorus*, κυρίως του *Corchorus capsularis* και λιγότερο συχνά του *C. olitorius* που εντοπίζονται σε τροπικές πεδινές περιοχές με υγρασία μεταξύ 60-90% (Alves *et al.*, 2009). Το ύψος των φυτών κυμαίνεται μεταξύ ενός και τεσσάρων περίπου μέτρων και η διάμετρος φτάνει τα 20 χιλιοστά και αποτελούνται κυρίως από κυτταρίνη και λιγνίνη (μέχρι και 12-16%). Οι ίνες αφαιρούνται από το βλαστό με τη διαδικασία του “biological retting”, που βασίζεται σε μία σειρά διαδικασιών όπως η συγκέντρωση των βλαστών, το μούλιασμα για ευκολότερο διαχωρισμό των ινών από τους βλαστούς (για περίπου τέσσερις εβδομάδες) και τέλος την αφαίρεση των εξωτερικών ινών από τον εσωτερικό βλαστό (Mansur & Aziz, 1982).

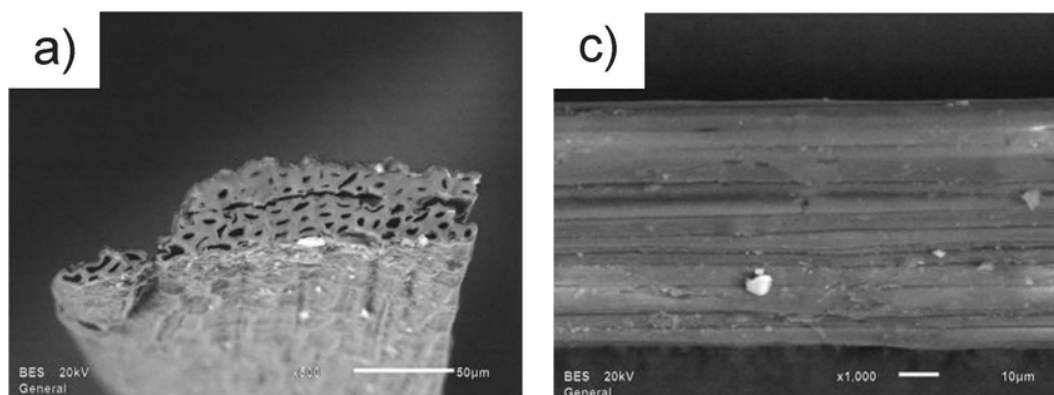
Από άποψη περιβαλλοντικών οφελών κατά την ενσωμάτωση ινών γιούτας σε διάφορες εφαρμογές, σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι είναι βιοδιασπώμενες και ανακυκλώσιμες, με ένα εκτάριο φυτών γιούτας να καταναλώνει περίπου 15 τόνους διοξειδίου του άνθρακα και να απελευθερώνει 11 τόνους οξυγόνου (FAO, 2023).

Η γιούτα χρησιμοποιείται πολύ συχνά επίσης ως ενίσχυση σε πράσινα σύνθετα υλικά ενώ προσπάθειες έχουν γίνει ήδη απ’ την δεκαετία του 1980 για τη χρήση τους ως ενισχυτικά σε σύνθετα τσιμέντου (Mansur & Aziz, 1982). Τέλος, οι ίνες της είναι πολύ εύθραυστες, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε λιγνίνη, όπως αναφέραμε προηγουμένως (Singh *et al.*, 2018; Corrales *et al.*, 2007).

Η εικόνα 11 δείχνει συγκεντρωμένα τα πιο σημαντικά στάδια επεξεργασίας του φυτού ενώ στην εικόνα 12 βλέπουμε τη μορφολογία διατομής και τα διαμήκη προφίλ των ινών γιούτας.



Εικ. 11: (α) Φυτό [1], (β) Συγκομιδή [2], (γ) Εξαγωγή των ινών (retting) [2], (δ) Αποξήρανση [2]



Εικ. 12: (α) Διατομή (c) Διαμήκες προφίλ [3]

### 1.5.1.2 Κλωστική Κάνναβη

Η κάνναβη σύμφωνα με τον Richard Evans Schultze “είναι ένα πράσινο, πολύ άφθονο και πανταχού παρόν φυτό, οικονομικά σημαντικό, ευέλικτο και πολλές χρήσεων, πιθανώς επικίνδυνο αλλά σίγουρα με πολλούς τρόπους μυστηριώδες” (Schultes 1970, Αμερικανός εθνοβοτανολόγος).

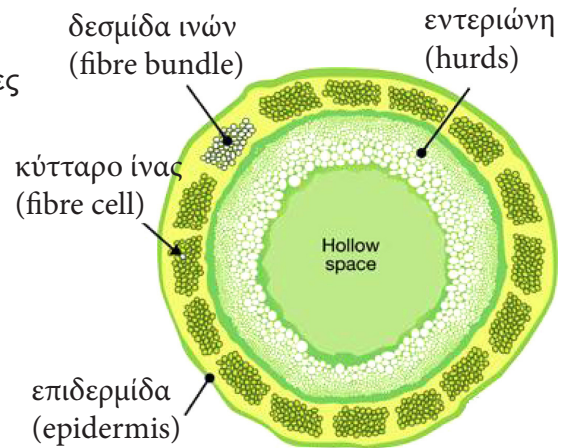
Η κλωστική ή βιομηχανική κάνναβη (*Cannabis sativa*), στην περίπτωση μας, είναι ένα ετήσιο ποώδες φυτό C3 που μπορεί να φτάσει τα 4 μέτρα ύψος με μικρές απαιτήσεις σε λίπανση και άρδευση και συνήθως είναι έτοιμο για συγκομιδή σε δύο έως τρεις μήνες μετά τη σπορά (Sature et Mache, 2015; Manaia *et al.*, 2015). Γενικά προτιμά ήπιο κλίμα, υγρή ατμόσφαιρα και βροχοπτώσεις της τάξης των 600–700 mm ετησίως, αναπτύσσεται καλά σε διάφορους τύπους εδάφους, με προτίμηση το αμμώδες αργιλώδες έδαφος με επαρκή αποστράγγιση. Η βιομηχανική κάνναβη που καλλιεργείται κυρίως για τις ίνες φυτεύεται στενά μεταξύ τους για να ενισχυθεί η επιμήκυνση των βλαστών και όχι η διακλάδωση, με στόχο μεγαλύτερες και ισχυρότερες ίνες. Στις εικόνες 13 και 14 φαίνεται μικροσκοπικά η ανατομία και η δομή της κάνναβης.

Προέρχεται από την κεντρική Ασία, και συγκεκριμένα την ενδιάμεση περιοχή μεταξύ Ιμαλαΐων, Σιβηρίας, Νότιου Καυκάσου και νότιας περιοχής Κασπίας Θάλασσας, ενώ σύμφωνα με αρχαιολόγους το πιο πιθανό κέντρο προελεύσεως είναι η Κίνα. Η κλωστική κάνναβη εισήχθη στην Ευρώπη περίπου το 1200 Κ.Ε, με πρωταρχική χρήση την παραγωγή χαρτιού (Nath, 2022).

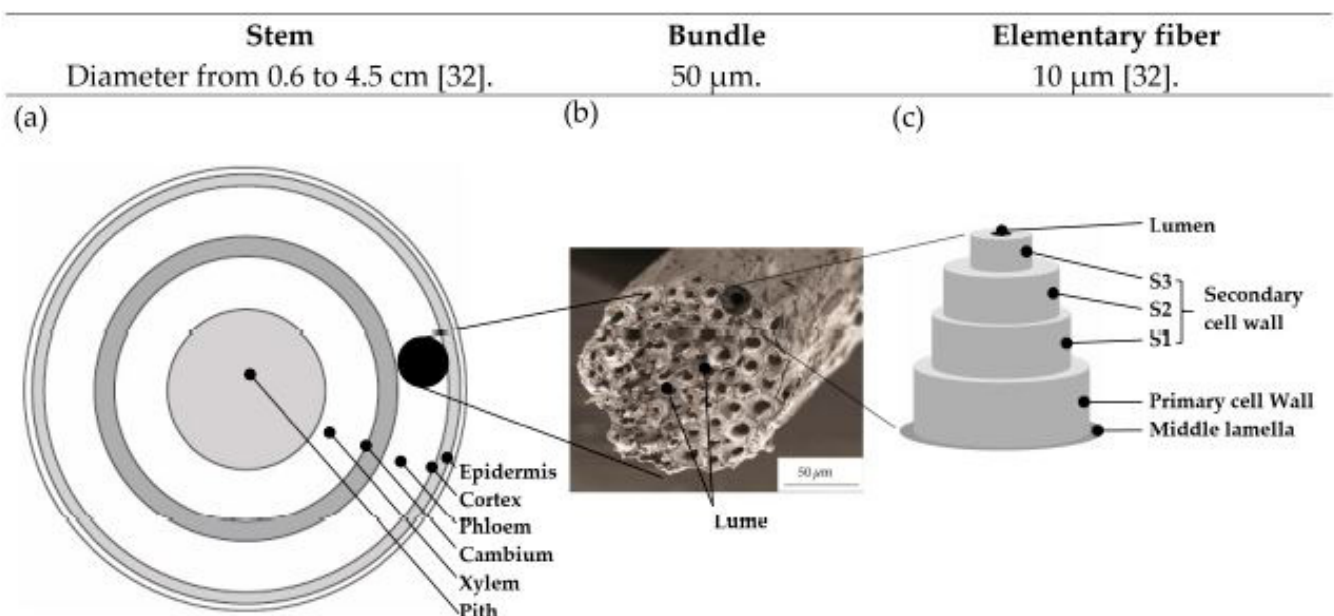
Η δεύτερη πιο σημαντική χρήση των ιών κλωστικής κάνναβης σήμερα είναι ως μονωτικά υλικά, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 26% των εφαρμογών, ενώ η χρήση τους στην παραγωγή βιο-σύνθετων υλικών αποτελεί περίπου το 14% των εφαρμογών (Carus et Sarmiento; 2016).

Έχει λοιπόν τη δυνατότητα να λειτουργήσει σαν δεξαμενή διοξειδίου του άνθρακα (carbon sink) εξοικονομώντας μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Ingrao *et al.*, 2015). Να πούμε μόνο, πως για κάθε 10 στρέμματα φυτεμένης κλωστικής κάνναβης, απορροφώνται 8-15 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Credits, 2022).

Σύμφωνα με τους Tran *et al.* (2010) το τσιμέντο βασιζόμενο σε ίνες κλωστικής κάνναβης (hemp concrete) μπορεί να μειώσει τόσο τις καθημερινές διακυμάνσεις της σχετικής υγρασίας σε εσωτερικούς χώρους όσο και την κατανάλωση ενέργειας κατά 45% σε σύγκριση με το κοινό τσιμέντο.



**Εικ. 13:** Διατομή βλαστού κάνναβης (Ingrao *et al.*, 2015)



**Εικ. 14:** Δομή ίνας κλωστικής κάνναβης (Manaia *et al.*, 2019)



## 1.6 Τεχνική της Πλέξης

Η δημιουργία δισδιάστατων ή και τρισδιάστατων δημιουργημάτων μέσω εύκαμπτων υλικών με τη μορφή πλεκτικής (καλαθοπλεκτικής ή υφαντικής) θεωρείται ως μια από τις παλαιότερες τέχνες στον κόσμο. Ιστορική αναζήτηση αναφέρει πως η παρατήρηση των φωλιών των πτηνών αποτέλεσε την έμπνευση για την ανάπτυξη της τέχνης του πλεξίματος και, κατά συνέπεια, της ύφανσης με τα πρώτα δημιουργήματα (artifacts) να αποτελούνται από συστραμμένες φυτικές ίνες.

Μελέτες βασιζόμενες στο ρουχισμό των ειδωλίων ονόματι “Αφροδίτες” της Παλαιολιθικής Ευρασίας υποστηρίζουν ότι η πλέξη ήταν ήδη γνωστή κατά την Παλαιολιθική Εποχή (27,000 χρόνια πριν) στην παραγωγή αντικειμένων όπως φούστες, ζώνες, καπέλα και άλλα στοιχεία ενδυμασίας (Soffer *et al.*, 2000; Adavasio *et al.*, 1996).

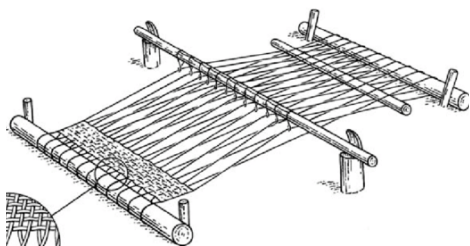
Πολύ σπουδαία ήταν η σημασία της υφαντικής παράδοσης και στην Αίγυπτο (περί το 5,000 της προ Κοινής Εποχής) με υπολείμματα υφασμάτων να έχουν βρεθεί σε τάφους της αρχαίας Αιγύπτου (πιθανότατα χάρη στο ξηρό κλίμα και την άμμο της ερήμου της Σαχάρας) με βασική φυτική ίνα το λινάρι αλλά και στο Περού (Jolie *et al.*, 2011), την Ανατολία (Hodder, 2013), το Ιράκ και πολλά άλλα μέρη του κόσμου.

Στην Ελλάδα, η Μινωική Κρήτη αποτέλεσε την κοιτίδα της ανάπτυξης της τέχνης της υφαντικής κατά την ύστερη εποχή του Χαλκού (Gillis & B. Nosch, 2007).

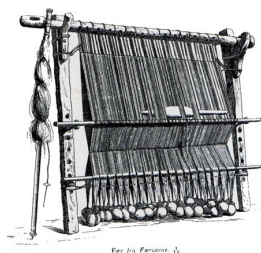
Από τις πρώτες χειροκίνητες μηχανές πλέξης (αργαλειός) ήταν αυτή του εγγλέζου William Lee το 1589 ενώ ο 18ος αιώνας χαρακτηρίζεται από σειρά εφευρέσεων που κατέστησαν την ύφανση νημάτων πολύ πιο αποτελεσματική συμπεριλαμβανομένης και της ανακάλυψης του μηχανοποιημένου αργαλειού (power loom). Στη δισδιάστατη ύφανση τα δύο βασικά συστατικά που χρησιμοποιούνται είναι το στημόνι (weft), -διαμήκες- και το υφάδι (warp), -εγκάρσιο- το οποίο τραβιέται πάνω και κάτω από το στημόνι.



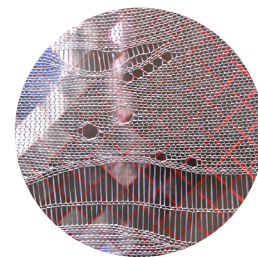
Ειδώλιο  
“Αφροδίτη”



Οριζόντιος αργαλειός με λεπτομέρεια (Ciszuk *et al.*, 2008)



Κάθετος αργαλειός με βάρη (Αργολική Αρχαιολογική Βιβλιοθήκη Ιστορίας και Πολιτισμού)



DataKnit (Jenny Sabin Studio)

Φτάνοντας στο σήμερα, η ανάγκη για καινοτομία και αντισυμβατικές λύσεις έχουν οδηγήσει στην ανακάλυψη πρωτοποριακών μεθόδων, τεχνικών και συνδυασμών υλικών και τεχνολογιών.

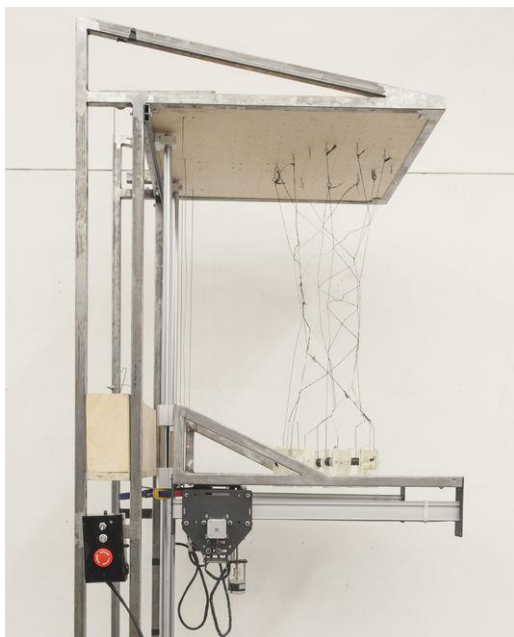
Η παγκόσμια ζήτηση για δομικά υλικά πιο ελαφριά αλλά ταυτόχρονα με βελτιωμένες ειδικές αρχιτεκτονικές και μηχανικές ιδιότητες σε εφαρμογές πέραν αυτών που αναφέρθηκαν παραπάνω σε συνδυασμό με την επείγουσα ανάγκη για περιβαλλοντικά βιώσιμες εναλλακτικές που υποστηρίζεται από μία συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία, αποτέλεσαν και συνεχίζουν να αποτελούν κίνητρο για βελτιωμένες και λειτουργικές λύσεις. Η ρομποτική, η τρισδιάστατη εκτύπωση, η τεχνητή νοημοσύνη, ο προγραμματισμός αποτελούν σταθερά και επιταχυνόμενα αναδυόμενους βιομηχανικούς κλάδους που μπορούν να συνενώσουν το παρελθόν με το παρόν με αρχιτεκτονικές. Παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή των σύνθετων πλεκτών των τρισδιάστατων αργαλειών (3d weaving looms) σε εφαρμογές κυρίως στην αεροδιαστημική και το στρατό (Harvey *et al.*, 2019; Bilisik *et al.*, 2013; Bilisik, 2012). Οι εφαρμογές στην αεροδιαστημική και το στρατό βασίζονται στην παραδοσιακή τεχνική της ύφανσης ενσωματώνοντας όμως, υπολογιστικά περιβάλλοντα (όπως η τεχνική της “3D orthogonal weaving “ (Bilisik, 2012)).

Η ενσωμάτωση ψηφιακών μεθόδων παραγωγής (*Digitally Knit Textiles “DataKnit”, Jenny Sabin studio*), μνηστικών βιο-σύνθετων δομών (*FungAr*, EU funded) και οργανισμών (*Silkworm-spun pavilion*, MIT) στην πλέξη για την ανάπτυξη ενισχυμένων υλικών (θα το δούμε αναλυτικότερα παρακάτω) είναι ένα πολύ πρόσφατο ερευνητικό πεδίο το οποίο όμως μπορεί να φέρει σημαντικές καινοτομίες και μία διαφορετική προσέγγιση στην παραγωγή, “έξυπνων” σε κάποιες περιπτώσεις, υλικών υψηλής απόδοσης και ακεραιότητας.

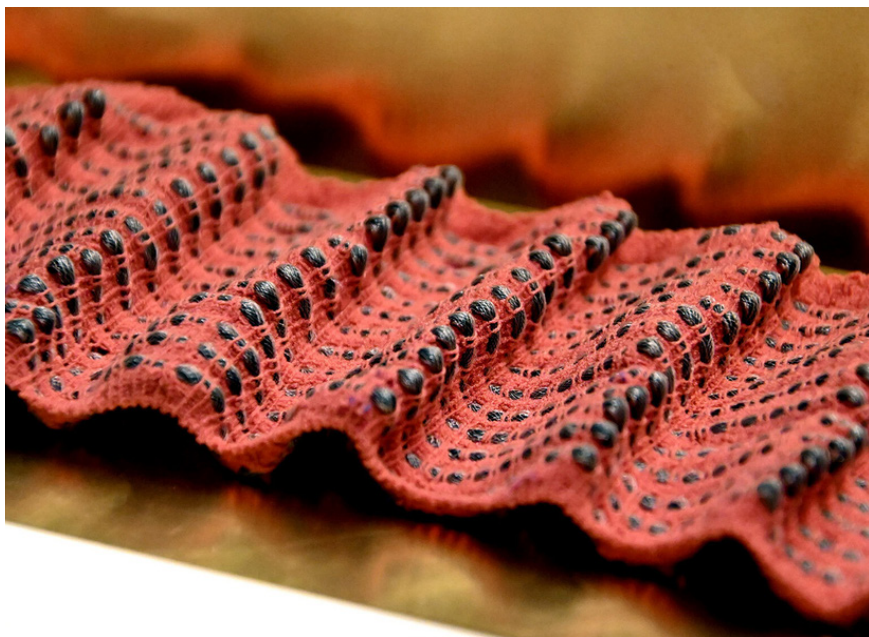
**Eik.15:** *Silkworm-spun pavilion*, by MIT Media Lab



**Eik. 16:** *Seamless Loom*, by Hella Jongerius



**Eik.17:** *Space Weaver*, California College of the Arts



**Eik.18:** *Robotic "OmniFibers" textiles*, MIT



## 1.7 Σύνθετα & βιο-σύνθετα υλικά

Όταν δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά με σημαντικά διαφορετικές φυσικές ή χημικές ιδιότητες συνδυάζονται για να παράξουν ένα νέο - τεχνητό - υλικό, αυτά ονομάζονται “σύνθετα υλικά (composite materials) (Singh *et al.*, 2018)”

Παραδοσιακά, τα σύνθετα αυτά υλικά μπορεί να είναι ενισχυμένα πλαστικά (συνθετικές/ τεχνητές ίνες (όπως γυαλί, υαλοβάμβακας, κέβλαρ) μαζί με κάποιο πολυμερές (θερμοσκληρυνόμενο, θερμοπλαστικό ή και φυσικό όπως το PLA, το PHA ή το PCL)), ή άλλες συνδυασμένες λύσεις.

Την τελευταία δεκαετία, ο όλο και συνεχώς αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός σε συνδυασμό με την εξάντληση του πετρελαίου και την αστικοποίηση, έχουν επιφέρει καταφανή πίεση στην κατασκευαστική βιομηχανία και στα παραδοσιακά δομικά υλικά όπως το τσιμέντο. Η ραγδαία αυτή αύξηση, τις οποίες οι δραστηριότητες σχετίζονται άμεσα και με την παγκόσμια κλιματική κρίση, έχει οδηγήσει παράλληλα σε αυξημένη γεωργική παραγωγή και την απόρριψη μεγάλων ποσοτήτων γεωργικών παρα-προϊόντων τα οποία αποτελούν περιβαλλοντικά βιώσιμες εναλλακτικές συμπληρωματικές λύσεις σε σύνθετα υλικά (Ramesh *et al.*, 2017, 2022; Jones *et al.*, 2020).

Τα βιο-σύνθετα αποτελούνται από ένα βιοδιασπώμενο πολυμερές (μία πολυμερική μήτρα) και λιγνοκυταρρινικά υλικά που συμπεριφέρονται ως ενισχυτικά υλικά πλήρωσης (Kim *et al.*, 2006) γι' αυτό και υπάγονται στην κατηγορία των σύνθετων πολυμερικής μήτρας υλικών. Κατηγοριοποιούνται σε “πράσινα σύνθετα (green composites)” όπου το βιοδιασπώμενο πολυμερές είναι ένα βιο-πολυμερές όπως το πολυλακτίδιο (PLA) και σε “μερικώς φιλικά προς το περιβάλλον (partly eco-friendly)” όπου ένα από τα συστατικά στοιχεία δεν έχει αποκτηθεί από ανανεώσιμες πηγές. Σε αντίθεση με τα συνθετικά - κατασκευασμένα υλικά (engineered materials), τα πράσινα σύνθετα έχουν μειωμένο ανθρακικό αποτύπωμα, εκπομπή επικίνδυνων ρύπων και λιγότερες ενεργειακές απαιτήσεις (Zwawi, 2021).

Τα σύνθετα ενισχυμένα με φυτικές ίνες (plant fibre reinforced composites, PFRCs) προσδιορίζονται ως ένα είδος υλικού που, όπως ήδη αναφέραμε προηγουμένως, αποτελούνται από μία φυτική ίνα και ένα βιοδιασπώμενο πολυμερές (συνθετική ή βιοδιασπώμενη ρητίνη) αντικαθιστώντας τα σύνθετα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (glass fibre reinforced composites, GFRCs) (Ramesh *et al.*, 2017).

Οι μύκητες μπορούν να χρησιμοποιήσουν πολλά είδη παραπροϊόντων ως υποστρώματα για ανάπτυξη. Επίσης, είναι μία φυσική και ανανεώσιμη πηγή πολύτιμων δομικών πολυμερών, όπως η χιτίνη, και άλλων πολυσακχαριτών όπως η χιτοζάνη (Jones *et al.*, 2020). Όταν το μυκήλιο διεισδύσει σε ένα υπόστρωμα, δρα ως φυσικό αυτοσυναρμολογούμενο συνδετικό, συγκρατώντας ένα χαλαρό μείγμα σε μονολιθική μορφή, δημιουργώντας ένα στερεό σύνθετο από βιοπολυμερή μήτρα κυτταρίνης και μία πυκνή ενίσχυση χιτίνης (Sydor *et al.*, 2022).

Η δημιουργία τέτοιων υλικών άπτεται της τομής διαφόρων επιστημών όπως η σχεδίαση (design), η μηχανική, η επιστήμη των υλικών και η βιολογία, όπου οι δημιουργοί συνεργάζονται με βιολογικούς οργανισμούς, ορίζοντας παράγοντες όπως την ανάπτυξη και την απόδοση τους με στόχο την επίτευξη μοναδικών ιδιοτήτων των υλικών.



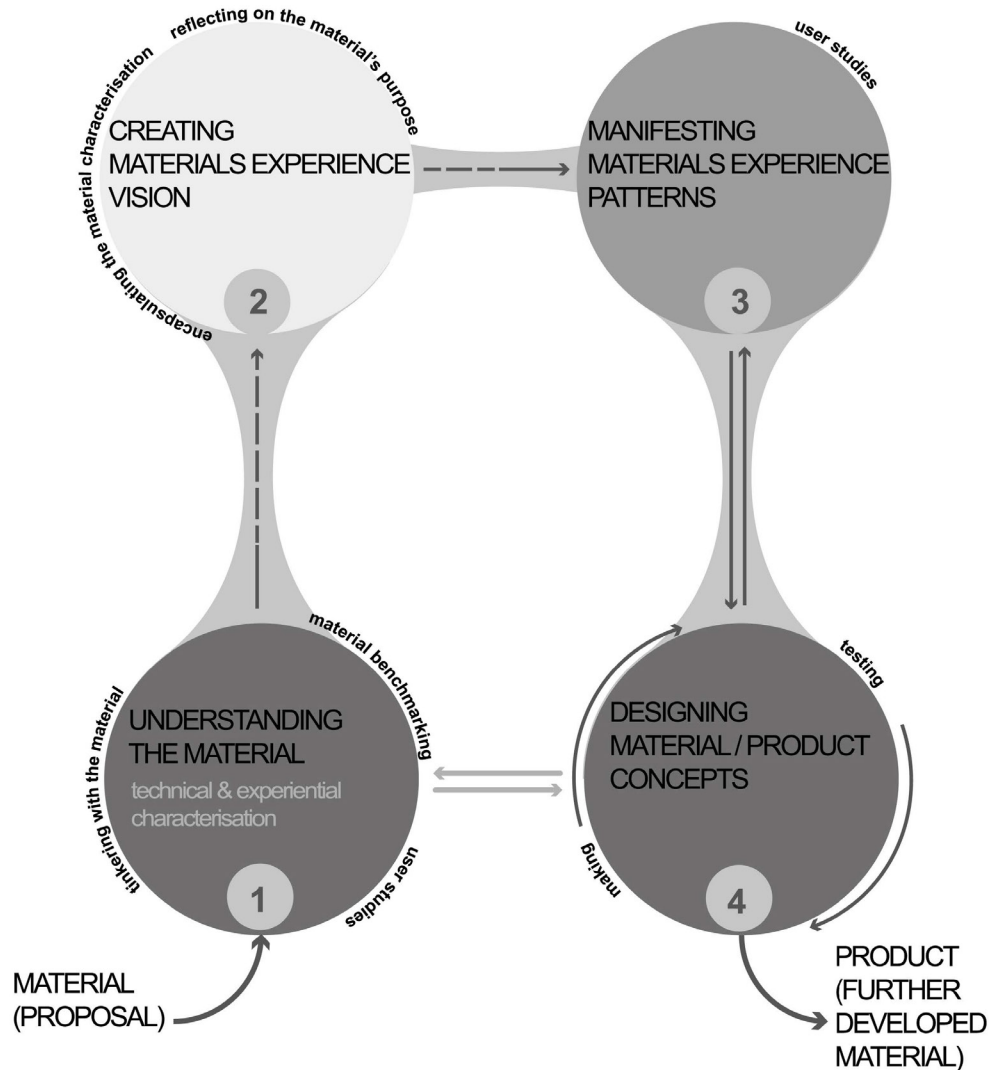
## 1.8 Σχεδίαση οδηγούμενη απ'τα υλικά, Material Driven Design

Η επιστήμη των υλικών προσφέρει συνεχώς καινούρια υλικά με ανώτερες ιδιότητες και μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με τα συμβατικά (μεταξύ άλλων bio-based, έξυπνα, ανακυκλωμένα και/ή βιοδιασπώμενα υλικά). Παρόλ'αυτά, η βελτιωμένη αυτή λειτουργικότητα δεν είναι αρκετή για να εξασφαλίσει ούτε την εμπορική επιτυχία αλλά ούτε και την ευρέως διαδεδομένη χρήση του υλικού.

Αυτό πρέπει να είναι κοινωνικά και πολιτισμικά αποδεκτό ή ευπρόσδεκτο. Η αξιολόγηση του υλικού βασίζεται τόσο στο τί είναι όσο όμως και στο τί κάνει, πώς το κάνει, πώς εμείς αλληλε-πιδρούμε με αυτό, πώς το αντιλαμβανόμαστε κ.ά.

Αυτά τα ερωτήματα προσεγγίζονται από τη μέθοδο του “Σχεδιασμού Οδηγούμενου από τα υλικά, Material Driven Design (MDD)” που αναπτύχθηκε από ερευνητ(ρι)ές του Πανεπιστημίου του Delft (Ολλανδία) και του Πολυτεχνείου του Μιλάνο για να διευκολύνει τη σχεδίαση, όπου οι χρήστες αναπτύσσουν εμπειρίες με τα υλικά (material experiences) (Karana *et al.*, 2014; 2015).

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα επεξηγηματικό σχέδιο το οποίο απεικονίζει τα βασικά βήματα δράσης που ακολουθούνται κατά την υιοθέτηση της συγκεκριμένης τεχνικής σχεδιασμού (Εικ. 19).



Εικ. 19: Μέθοδος Material Driven Design (Karana *et al.*, 2014; 2015).

## 1.9 Βιώσιμα Κτήρια

Κατά τον ευρέως διαδεδομένο ορισμό του Brundtland Report, “βιώσιμη είναι η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες της παρούσας γενιάς χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τη δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιούν τις δικές τους ανάγκες.” (World Commission on Environment and Development, 1987) Η έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης καλύπτει ένα ευρύ φάσμα θεμάτων όπως την περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, τομείς που επηρεάζουν όλες τις πτυχές της ζωής μας. Οι 17 Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ που περιλαμβάνονται στην Ατζέντα Βιώσιμης Ανάπτυξης του 2030 αποτελούν κατευθυντήριες γραμμές για μία μελλοντική και βέλτιστη συνειδητή ανάπτυξη.

Η κατασκευαστική βιομηχανία έχει ένα σημαντικό μερίδιο στην επίτευξη των στόχων αυτών (στο σύνολο τους οι στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης αγγίζουν τους 169) με την απανθρακοποίηση (decarbonization) του κτιριακού τομέα έως το 2050 να είναι κρίσιμη για την επίτευξη των περικοπών εκπομπών που έχουν τεθεί κατά τη συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement).

Ωστόσο, όπως δείχνει η Έκθεση Παγκόσμιας Κατάστασης Κτιρίων για το 2022 (2022 Buildings Global Status Report), ο κλάδος δεν έχει πραγματοποιήσει τις βαθιές συστημικές αλλαγές που απαιτούνται για να μπει στην πορεία προς αυτόν τον στόχο.

Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA – International Energy Agency), ο κατασκευαστικός τομέας είναι υπεύθυνος για τα:

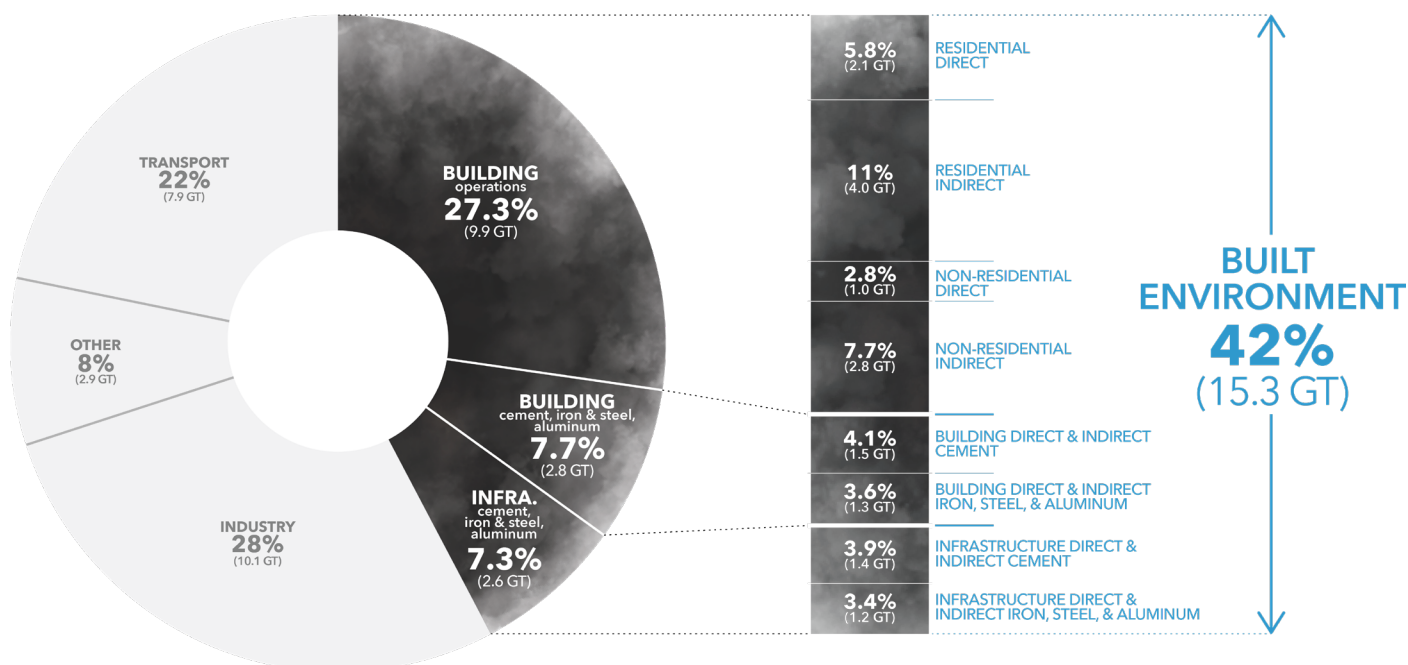
- 39% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που σχετίζονται με την ενέργεια και τις διεργασίες το 2018, με το 11% των οποίων να προέρχεται από την κατασκευή οικοδομικών υλικών και προϊόντων όπως χάλυβας,τσιμέντο και γυαλί;
- 37% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης;
- 40% της ρύπανσης του πόσιμου νερού και
- 23% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Ο τομέας σχετίζεται άμεσα με τους στόχους 7 (<https://sdg-tracker.org/energy>), 9 (<https://sdg-tracker.org/infrastructure-industrialization#targets>) και 11 (<https://sdg-tracker.org/cities>) (στους δύο τελευταίους εστιάζει η παρούσα διπλωματική εργασία) και μπορεί - εκτός από την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας - να μειώσει το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα εξετάζοντας εναλλακτικά υλικά και απανθρακοποιώντας το τσιμέντο (IEA, 2019; 2022) (Εικ. 20).

Η ανάπτυξη της περιβαλλοντικής τεχνολογίας με χρήση μυκήτων λευκής σήψης έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για περισσότερα από 20 χρόνια. Παρακλάδι αυτού, οι διάφορες βιοτεχνολογίες για τον έλεγχο της περιβαλλοντικής ρύπανσης και πιο συγκεκριμένα την επεξεργασία διαφόρων αποβλήτων και τη βιοαποκατάσταση μολυσμένων εδαφών (Gao *et al.*, 2010).

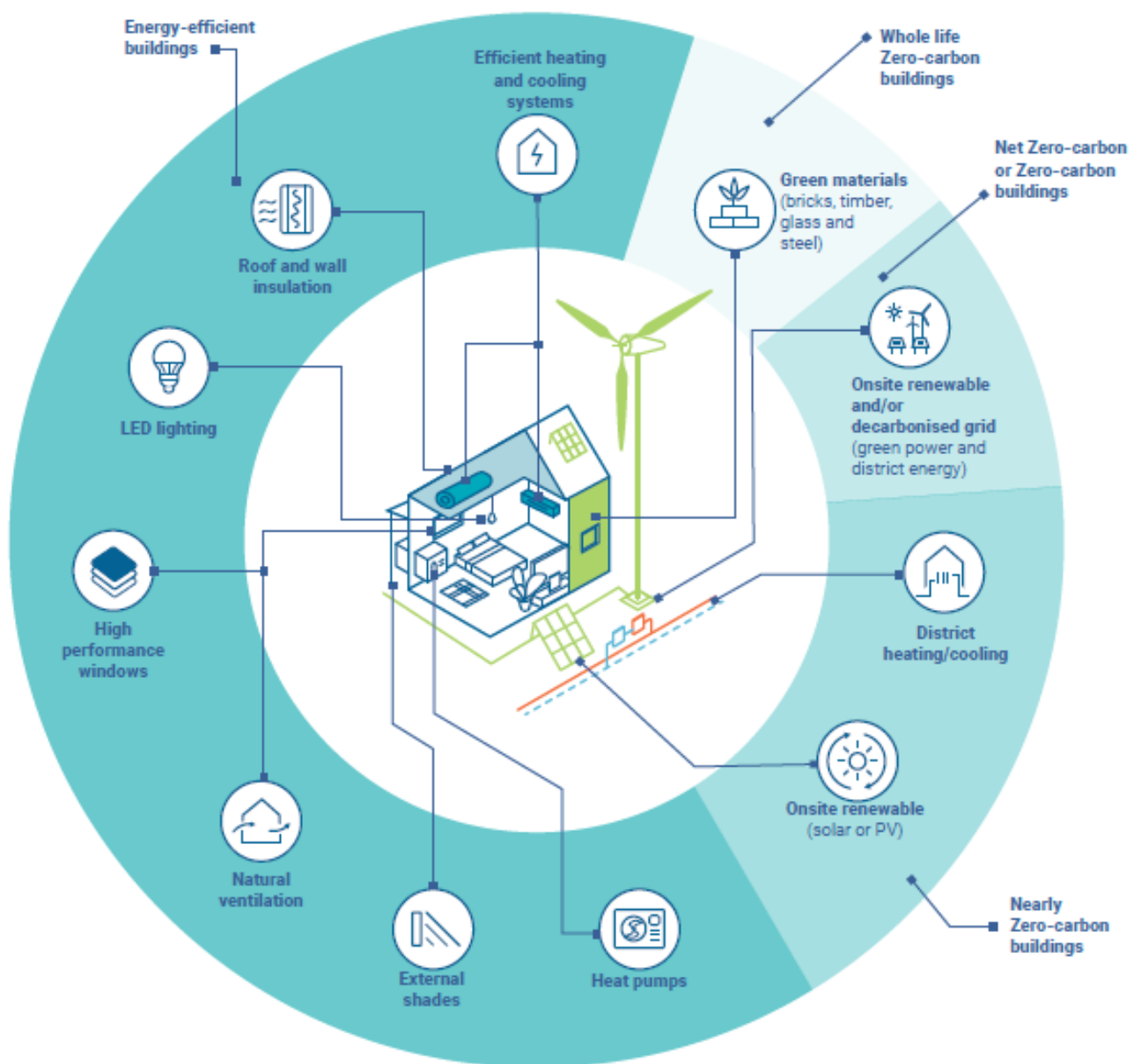
Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία με αφετηρία την ανάγκη για μια περιβαλλοντικά φιλική, τοπικά κατασκευάσιμη και συναρμολογούμενη, ενσωματωμένη στο εκάστοτε περιβάλλον αρχιτεκτονική ανάπτυξη (η οποία ξεκίνησε πάλι με το πέρας της περιόδου καραντίνας λόγω της πανδημίας), πραγματεύεται τη δημιουργία ενός τέτοιου εναλλακτικού βιο-σύνθετου δομικού υλικού.

## TOTAL ANNUAL GLOBAL CO<sub>2</sub> EMISSIONS Direct & Indirect Energy & Process Emissions (36.3 GT)



© Architecture 2030. All Rights Reserved.  
Analysis & Aggregation by Architecture 2030 using data sources from IEA & Statista.

**Εικ. 20α:** Παγκόσμιες ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Architecture 2030)



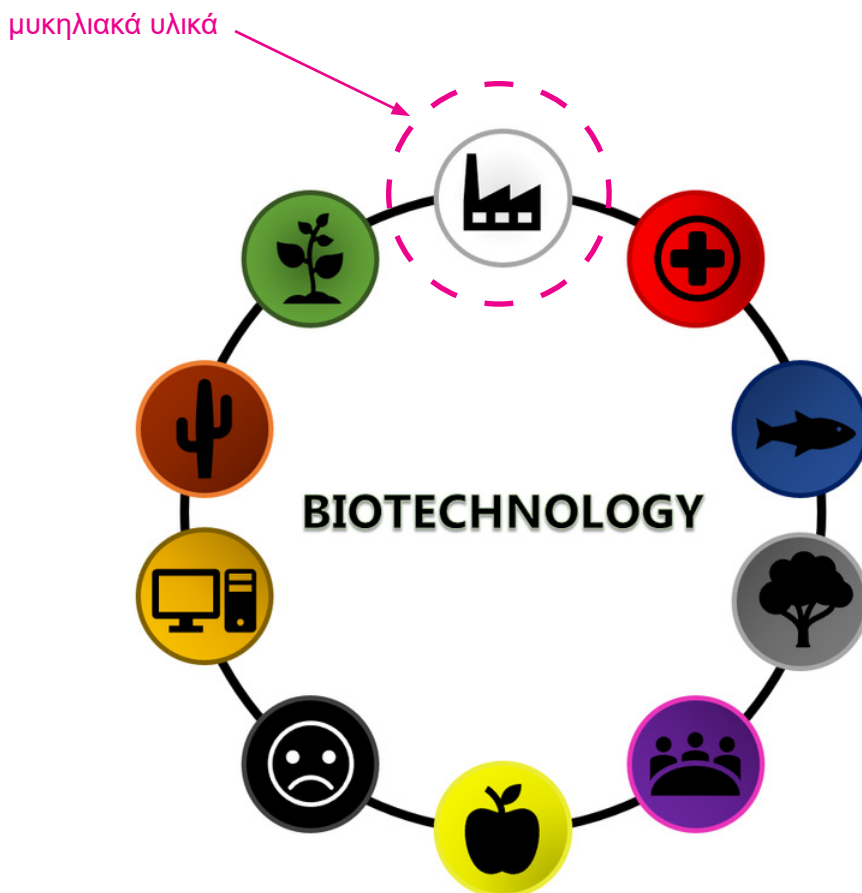
**Εικ. 20b:** Διαφορετικά επίπεδα κτηρίων μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα (zero-carbon buildings) (IEA, 2022)

## 1.10 Βιοτεχνολογία

Σύμφωνα με τον ορισμό του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD), βιοτεχνολογία χαρακτηρίζεται η εφαρμογή της επιστήμης και της τεχνολογίας σε χρήσιμα βιολογικά συστήματα, κυρίως ζωντανούς οργανισμούς-μικροοργανισμούς, όπως επίσης και μερών και προϊόντων αυτών (όπως ένζυμα) για την παραγωγή τόσο γνώσης όσο και χρήσιμων προϊόντων και υπηρεσιών προς όφελος του ανθρώπου (Eurostat, Statistics Explained; Convention on biological diversity, 1992).

Η βιοτεχνολογία ως μία από τις κύριες νέες τεχνολογίες που εμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1970, με τη χρήση βιοκαταλυτών (ενζύμων και μικροοργανισμών) αποτέλεσε έναν από τους βασικούς τεχνολογικούς μοχλούς για τον αναπτυσσόμενο τομέα της βιοοικονομίας (Heux *et al.*, 2015) (Εικ. 21). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, προκειμένου να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση σε αυτόν τον μάλλον ευρύ ορισμό, υιοθετήθηκε ένας συνδυασμός χρωμάτων που παρέχει ορισμούς της βιοτεχνολογίας ανάλογα με την περιοχή εφαρμογής της. Έτσι, υπάρχουν πλέον 10 διακριτές κατηγορίες βιοτεχνολογικών εφαρμογών και με βάση αυτό, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε πως το ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας εντάσσεται στην λευκή (βιομηχανική) βιοτεχνολογία αξιοποιώντας ένζυμα συγκεκριμένων μυκήτων που αποικοδομούν λιγνίνη με στόχο την ενίσχυση της ανάπτυξης και χρήσης πιο αειφόρων υλικών για τον κατασκευαστικό - οικοδομικό κλάδο - αλλά και της γκρίζας (περιβαλλοντικής) βιοτεχνολογίας.

Υπάρχει μία αυξανόμενη ανάγκη για βιωσιμότητα των συστημάτων παραγωγής που σέβονται το φυσικό περιβάλλον, βελτιώνουν την ποιότητα ζωής μας και ταυτόχρονα, είναι ανταγωνιστικά στην αγορά εργασίας. Και αυτό συμπεριλαμβάνει την ανάπτυξη νέων ή την τροποποίηση των ήδη υπάρχοντων διαδικασιών παραγωγής έτσι ώστε να μειώνουν ή/και να εξαλείφουν τη χρήση επικίνδυνων ουσιών, να ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας και την παραγωγή αποβλήτων και ιδανικά να ξεκινούν από ανανεώσιμες πρώτες ύλες (Soetaert & Vandamme, 2006).



Εικ. 21: Χρώματα βιοτεχνολογίας  
<https://steemit.com>



### 1.10.1 Βιοτεχνολογικές εφαρμογές μυκήτων στον κατασκευαστικό κλάδο

Οι μύκητες, πέρα από την τεράστια οικολογική τους σημασία ως αποικοδομητές της νεκρής οργανικής ύλης, έχουν αποτελέσει, τόσο στην αρχαιότητα, όσο και σήμερα, τα βιοτεχνολογικά εργαλεία για μια πληθώρα εφαρμογών, από τη διατροφή του ανθρώπου μέχρι την παραγωγή φαρμακευτικών ενώσεων, γεγονός που έχει οδηγήσει τους ερευνητές να αναφέρονται σε «μυκητοτεχνολογία» (Bennett, 1998).

Αν λοιπόν μύκητες μπορούν να διασπάσουν αποτελεσματικά βαριά μολυσμένα με διάφορους ρύπους εδάφη [όπως τη συσσώρευση σε πολύ υψηλό ποσοστό αρσενικού, μολύβδου και υδραργύρου (Acosta-Rodríguez *et al.*, 2018) ή ακόμα και αυτή ραδιενεργών στοιχείων (Chernobyl, 1996) (Dadachova *et al.*, 2007), αλλά και νικελίου και χαλκού από βιομηχανικές τοποθεσίες (όπως στη Ρωσία) (Bespalova *et al.*, 2006)], τότε γιατί να μη χρησιμοποιήσουμε τη δύναμη τους για να χτίσουμε τα μελλοντικά σπίτια από μυκήλιο? Οι μύκητες διαμορφώνουν και μεταμορφώνουν φυσικά περιβάλλοντα. Οι τελευταίοι διασφαλίζουν, όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, την τροφή τους μέσω ενός σύνθετου ενζυμικού συστήματος (βιολογικοί καταλύτες) που εκκρίνονται στην επιφάνεια στην οποία αναπτύσσονται. Έχουν εξελιχθεί για να τρέφονται με σχεδόν οποιαδήποτε οργανική ύλη, ανάμεσα στις οποίες είναι και η λιγνίνη (φυσική οργανική ένωση, βασικό πολυμερές ξύλου) η οποία όταν αναμειχθεί με γεωργικά υπολείμματα όπως φλοιοί φυτών αποτελεί ένα εξαιρετικό υπόστρωμα για την ανάπτυξη μυκηλιακών υλικών.

Η ιδέα των ανεπτυγμένων υλικών (grown materials) (Camere & Karana, 2017; Ciuffi, 2013; Montalti, 2010) προήλθε από τη βιοτεχνολογία όπου αρχικά αναπτύχθηκαν για τη δημιουργία βιολογικών ιστών όπως δέρμα και όργανα για ιατρικούς σκοπούς (Mironov *et al.*, 200; Karana *et al.*, 2018).

Το μυκήλιο λοιπόν έχει αναγνωριστεί ως φιλικό προς το περιβάλλον υποκατάστατο των συμβατικών υλικών και είναι επίσης γνωστό ως “living building material”.

Τα σύνθετα υλικά με βάση το μυκήλιο (mycelium-based composites (MBC) ή composite mycelium materials (CMM)) είναι μια πολλά υποσχόμενη κατηγορία σχετικά καινοτόμων υλικών που βασίζονται στο μυκηλιακό αποικισμό διαφόρων υποστρωμάτων. Καθώς η ανάπτυξη τους έγκειται στη βιολογική ανάπτυξη, αντί για ορυκτές πρώτες ύλες, τα MBC συγκεντρώνουν την προσοχή ως πιθανές εναλλακτικές λύσεις για ορισμένα ορυκτά υλικά. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα παραγωγής τους δείχνουν προς πιο βιώσιμες και κυκλικές πρακτικές (Rigobello *et al.*, 2022).

Τα σύνθετα υλικά με βάση το μυκήλιο μπορούν να καλλιεργηθούν με δύο εναλλακτικές μεθόδους; είτε αξιοποιώντας τις δυνατότητες του μυκηλίου να εμπλέξει (interlock) άλλα συστατικά στο δίκτυο του για το σχηματισμό ένα bulk υλικού είτε συλλέγοντας μυκήλιο από μία υγρή καλλιέργεια (καθαρό μυκήλιο) (Haneef *et al.*, 2017; Holt *et al.*, 2012).

Μία απ' τις πρώτες εταιρείες που πειραματίστηκε με το μυκήλιο για την “καλλιέργεια” υψηλής απόδοσης υλικών ήταν η “Ecovative” η οποία πλέον κατέχει και τη μεγαλύτερη mycelium farm στον κόσμο με εφαρμογές που περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται σε: βιοδιασπώμενη συσκευασία, μονωτικά υλικά, μόδα, τρόφιμα ([Ecovative](#)). Οι βασικοί πυλώνες της εταιρείας είναι τα υλικά προερχόμενα από μύκητες, η μηχανική και η βιο-κατασκευή (biofabrication).

Ακολουθούν κάποιες βιοτεχνολογικές βιοφιλικές εφαρμογές βιο-σύνθετων υλικών με βάση το μυκήλιο.



Soft Futures by AFJD



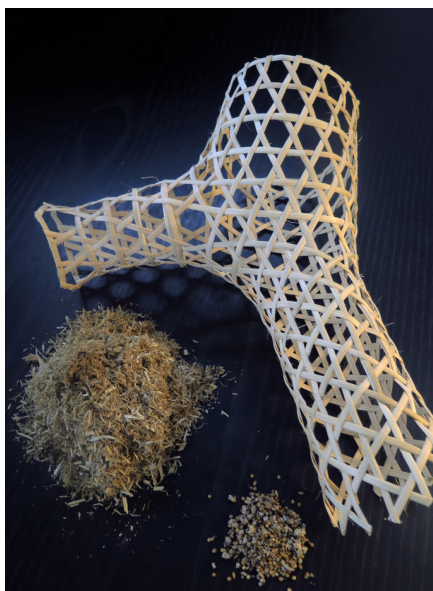
Mycotecture by Phil Ross



Material Loops by V. Meer



Just BioFiber (κατηγορία “hempcrete”)



FUNGAR, EU funded project

Το FUNGAR (**Fungal Architectures**) είναι ένα διεπιστημονικό ερευνητικό έργο που επιδιώκει να αναπτύξει ένα πλήρως ενσωματωμένο δομικό και υπολογιστικό ζωντανό υπόστρωμα χρησιμοποιώντας μυκήλιο με σκοπό την ανάπτυξη μιας "growh" αυτο-επιδιορθούμενης (self-repairing) αρχιτεκτονικής. Το ευφύες αυτό κτήριο θα αποτελείται από υλικά (βασικό εκ των οποίων το μυκήλιο αναπτυγμένο πάνω σε δομές με βάση την πλέξη "kagome") ικανά να αντιδρούν προσαρμοστικά σε αλλαγές στο φως, τη θερμοκρασία και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους καθιστώντας το μία τεράστια υπολογιστική μηχανή. Το έργο αποτελείται από αρχιτέκτονες (CITA, DK), επιστήμονες υπολογιστών/ βιοφυσικούς (UWE, UK), μυκητολόγους (UU, NL) και ειδικούς του κλάδου σε τεχνολογίες που βασίζονται σε μυκήλιο (MOGU, IT). (<http://www.fungar.eu/>)

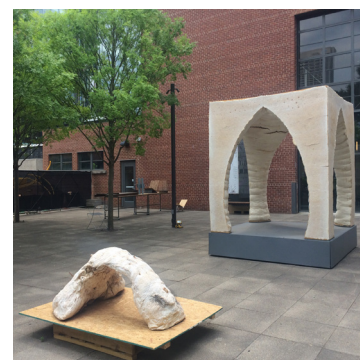


Mycoworks

Ένας απ'τους πρωτοπόρους της χρήσης μυκήτων σαν πρώτη ύλη για τη δημιουργία έργων γλυπτικής τέχνης είναι ο Phil Ross, συνδημιουργός της εταιρείας *Mycoworks* και εμπνευστής του όρου "Mycotecture". Η *Mycoworks* καλλιεργεί τούβλα από μυκήλιο και πριονίδι (μέσο με βάση την κυτταρίνη) αν και εξειδικεύεται σε υψηλής ποιότητας, μη ζωικά υλικά σε τομείς όπως: βιομηχανία μόδας, υποδήματα, αυτοκίνητα/χανιά και διακόσμηση. (<https://www.mycoworks.com/>)



*Mycelium Tectonics* by Gianluca Tabellini



*Monolith Mycelium Pavillion* by Jonathan Dessi-Olive, Georgia University of Technology, USA



Biohm, UK

Στόχος της εταιρείας είναι να δημιουργήσει ένα αναγεννούμενο (regenerative) χτισμένο περιβάλλον με τη χρήση κυκλικών υλικών και καινοτόμων κατασκευαστικών μεθόδων παραγωγής εξελίφοντας την έννοια των αποβλήτων. Μέσω τοπικών συνεργειών γίνεται χρήση απορριφθέντων γεωργικών προϊόντων μετατρέποντας τα σε νέα στοιχεία προστιθέμενης αξίας. Μία από τις καινοτόμες εναλλακτικές τους λύσεις είναι προϊόντα μόνωσης από μυκήλιο (ακουστικής και θερμικής) τα οποία αναπτύσσονται πάνω σε γεωργικά παραπροϊόντα με τη διαδικασία παραγωγής να έχει αρνητικό αποτύπωμα άνθρακα (carbon negative) δεσμεύοντας τουλάχιστον 16 τόνους άνθρακα το μήνα. (<https://www.biohm.co.uk/>)



## 1.11 Καινοτόμες προσεγγίσεις

Μία ενδιαφέρουσα οπτική της έννοιας της πλέξης έχει δώσει ο Yuichi Hirose, μηχανολόγος μηχανικός από την Ιαπωνία ο οποίος ανακάλυψε μία μέθοδο για να πλέκει συμπαγή αντικείμενα από τρισδιάστατα δεδομένα. Χρησιμοποιώντας τη νοοτροπία των εκτυπωτών τρισδιάστατης εκτύπωσης (3d printing machines), ο ίδιος ανέπτυξε μία “μηχανή συμπαγούς πλέξης” (solid knitting machine), η οποία αυτοματοποιεί τη συμπαγή πλέξη παράγοντας μία σειρά από διαφορετικά αντικείμενα (Εικ. 22).

Ο Hirose ξεκίνησε με αναλογική πλέξη η οποία συνδυάστηκε με ένα λογισμικό εξατομικευμένου σχεδιασμού (design customised) για τη δημιουργία στοιχείων όγκου (voxelize) και την κατάτμηση του σχεδίου σε επίπεδα (layering) ώστε να μπορέσει να παράξει το σχέδιο στο χέρι. Η ιδέα είναι ότι μπορούν να παραχθούν αντικείμενα, έπιπλα κ.ά τα οποία ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη τους να μπορούν να ξεμπλεχτούν και το νήμα να επαναχρησιμοποιηθεί για να φτιαχτεί κάτι καινούριο, και έτσι μιλάμε για κυκλική σχεδίαση με τεράστιες δυνατότητες.



Εικ 22: “Solid Knitting” από τον Yuichi Hirose

Οι έννοιες των volumetric design και των 3D textile materials (ανθρακονήματα, ενισχυμένα σύνθετα κ.ά) έχουν αποτελέσει αντικείμενα μελέτης στο βιομηχανικό κλάδο καθώς επιτρέπουν την προσαρμογή των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα σε πληθώρα εφαρμογών όπως λιγότερο υλικό, συνεχή και σταθερή αρχιτεκτονική νήματος και λιγότερα βήματα παραγωγής (Geerinck *et al.*, 2019; Zhalmuratova & Chung, 2020; Perera *et al.*, 2021; Gries *et al.*, 2022).

.....

Μια άλλη οπτική στην έννοια των μυκηλιακά βασιζόμενων σύνθετων έδωσε μία ομάδα ερευνητών της Material Balance Research (Πολυτεχνείο του Μιλάνου) η οποία θέλησε να βελτιώσει τη μηχανική αντίσταση του σύνθετου υλικού (και συγκεκριμένα την αντοχή σε θλίψη) με την εφαρμογή ενός παραδοσιακού συστήματος δόμησης, αυτό των καλαμιών ρατάν, υλικό οργανικό αλλά και εύκαμπτο και όλκιμο.

Σε παρόμοια με την παραπάνω διερεύνηση, μία ακόμη διαπανεπιστημιακή ομάδα αρχιτεκτόνων, κυρίως, συνδύασε έναν σκελετό από ρατάν μαζί με ίνες κάνναβης και ύφασμα γιούτα για να δημιουργήσει ένα πολυεπίπεδο πλαίσιο που αναπαριστά ένα λειτουργικό σκαμνί το οποίο μπορεί να υποστηρίξει ένα φορτίο είκοσι φορές το βάρος του (Εικ. 23). Η έρευνα “Mycomerger” (Εικ. 24) προτείνει την περαιτέρω αξιοποίηση των (ηχοαπορροφητικών αλλά όχι μόνο) δυνατοτήτων του πρωτοτύπου ως βάση για την ανάπτυξη μεγαλύτερης κλίμακας αρχιτεκτονικών εφαρμογών (Nguyen *et al.*, 2022).



Εικ. 23: “Woven Mycelium”



Εικ. 24: “Mycomerger”

## 1.12 Σκοπός μελέτης μεταπτυχιακής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η έρευνα, ανάπτυξη και παρουσίαση ενός νέου βιο-σύνθετου δομικού υλικού. Αυτό προσεγγίζεται με την υιοθέτηση της τεχνικής της πλέξης (knitting) φυσικών ινών κλωστικής κάνναβης σε προκατασκευασμένες μήτρες που λειτουργούν ως βάσεις πάνω στις οποίες θα πλεχτούν οι τρισδιάστατες δομές και στις οποίες θα αναπτυχθούν τα στελέχη συγκεκριμένων βασιδιομυκήτων από τη Συλλογή Καλλιεργείων Μυκήτων της Μυκητοθήκης ATHUM του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Τα τρία αυτά βασικά στοιχεία επιλέχθηκαν με βάση τις ιδιότητες τους και τις δυνατότητες που προσφέρουν σε αυτό τον πολλά υποσχόμενο ερευνητικό χώρο των φιλικών προς το περιβάλλον υλικών με συνειδητοποιημένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και κατασκευαστική ευελιξία.

Μετά από πειραματισμό με φυτικές ίνες που φέρουν κατάλληλες για τον ερευνητικό σκοπό εγγενείς ιδιότητες, έχουν χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα και με τις οποίες κατέχω πρότερη εμπειρία και τριβή, έγινε και η επιλογή της τελικής ίνας.

Ο τρόπος ανάπτυξης των σύνθετων αυτών υλικών δεν είχε προκαθοριστεί, οι πειραματισμοί όμως με διάφορες τεχνικές είχαν ως στόχο την επιλογή του τρόπου αυτού που επέτρεπε σχεδιαστική προσαρμοστικότητα, κατασκευαστική εφαρμογή και διαχρονική βιωσιμότητα.

Στην προσέγγιση υιοθετείται η μέθοδος της “σχεδίασης οδηγούμενης απ’το υλικό (material driven design) όπου τα υλικά αποτελούν το σημείο εκκίνησης της έρευνας και τα χαρακτηριστικά των οποίων διευκολύνουν και ορίζουν τη σχεδίαση πρωτοτύπων-συστημάτων.

Η τεχνική της πλέξης αποτελεί μία τέχνη που τείνει να παραγκωνιστεί μιας και οι σύγχρονες ανάγκες προστάζουν γρήγορες, εύκολα προσβάσιμες, scalable λύσεις για ένα ευρύ κοινό.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή της δημιουργίας μυκηλιακών βιοσύνθετων με εμβολιασμό στελεχών επιλεγμένων βασιδιομυκήτων σε ένα υπόστρωμα ινών κλωστικής κάνναβης.

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο αναπτύσσονται μυκηλιακά βιοσύνθετα με στόχο τη βελτίωση του οικοδομικού κλάδου και των πρώτων υλών που αυτός χρησιμοποιεί. Η παρούσα μελέτη θέλησε να αποσυνθέσει τα βασικά συστατικά των μυκηλιακών βιοσύνθετων και να αναπτύξει διαφορετικά εργαλεία ώστε να συνενώσει μία παραδοσιακή τέχνη με έναν πολλά υποσχόμενο ζωντανό οργανισμό.

Έμπνευση αποτέλεσαν κάποια από τα παρακάτω projects και συγκεκριμένα τα:

“**FUNGAR**” στα παρακάτω στοιχεία του:

- στην ανάπτυξη ενός βιο-σύνθετου υλικού με βάση το μυκήλιο και φυσικά υλικά,
- στο συνδυασμό των φυσικών πρώτων υλών μέσω της διαδικασίας της πλέξης (τεχνική “kagome“ από ίνες ρατάν (είδη φοίνικα της υποοικογενείας Calamoideae))
- στην ανέγερση ενός - μεγάλης κλίμακας - οικοδομήματος το οποίο ελέγχεται ως προς τις αποκρίσεις του στις περιβαλλοντικές μεταβλητές (εμείς αναλύσαμε διαφορετικές παραμέτρους μέχρι την περίοδο παράδοσης της εργασίας)

“**Mycelium Tectonics**” στα παρακάτω στοιχεία του:

- στη χρήση σχοινοϋ κάνναβης και συγκεκριμένα κανάβις και άλλων φυτικών ινών ως συστατικό του βιο-σύνθετου πολυμερικού υλικού,
- στο σχεδιασμό και πρωτοτυποποίηση βάσεων (μήτρες) πάνω στις οποίες σταθεροποιήθηκαν και διαμορφώθηκαν οι ίνες,
- στην εξερεύνηση των δυνατοτήτων των υλικών του σχεδιαστή ώστε να μπορέσει να συνδυάσει και να διεγείρει την οργάνωση του βιο-σύνθετου ως προς το χώρο και το χρόνο.  
(η ιστοσελίδα δεν είναι πλέον σε ισχύ)





## Κεφάλαιο 2. Υλικά και Μέθοδοι

### 2.1 Επιλογή και επεξεργασία μυκητολογικού υλικού

Τα στελέχη που επιλέχθηκαν προς μελέτη στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι βασιδιομύκητες λευκής σήψης και προέρχονται από τη Συλλογή Καλλιεργειών Μυκήτων της Μυκητοθήκης ATHUM του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Πειράματα πραγματοποιήθηκαν με εννιά στελέχη των ειδών *Cerrena unicolor*, *Daedaleopsis tricolor*, *Ganoderma applanatum*, *Ganoderma resinaceum*, *Ischnoderma resinosum*, *Lenzites betulina*, *Pleurotus ostreatus*, *Polyporus brumalis* και *Trametes pubescens*. Επιλέχθηκαν οι μύκητες *Lenzites betulina* (ATHUM 6823) και *Trametes pubescens* (ATHUM 6570).

Όλα τα στελέχη έχουν απομονωθεί από βασιδιοκάρπια που συλλέχθηκαν από την περιοχή της Ξάνθης στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της Αθανασίας Σεργεντάνη, 2019. Στις εικόνες παρουσιάζονται τα βασιδιοκάρπια από τα οποία απομονώθηκαν τα στελέχη που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία ενώ στην εικόνα 25 φαίνεται ο χάρτης των θέσεων δειγματοληψίας των βασιδιομυκήτων.



*Cerrena unicolor* (ATHUM 6565)



*Daedaleopsis tricolor* (ATHUM 6813)



*Ganoderma applanatum* (ATHUM 6525)



*Ganoderma resinaceum* (ATHUM 6825)



*Ischnoderma resinosum* (ATHUM 6817)



*Lenzites betulina* (ATHUM 6823)



*Pleurotus ostreatus* (ATHUM 5696)



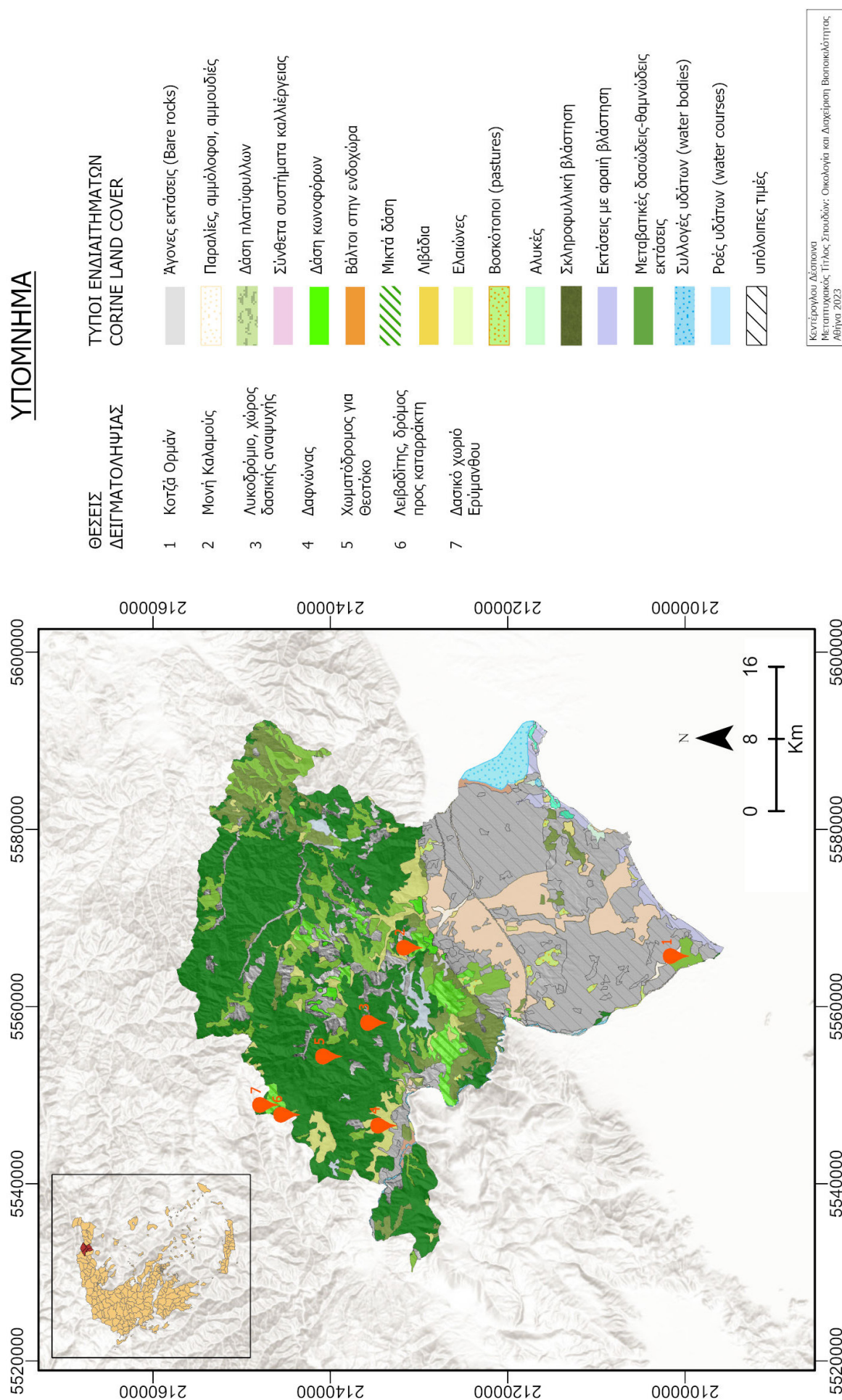
*Polyporus brumalis* (ATHUM 6536)



*Trametes pubescens* (ATHUM 6570)



# ΧΑΡΤΗΣ ΘΕΣΕΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΒΑΣΙΔΙΟΜΥΚΗΤΩΝ



**Εικ. 25:** Θέσεις συλλογής βασιδιομυκήτων από την κα Σεργεντάνη. Προσαρμοσμένο από <https://land.copernicus.eu/>

## 2.1.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός - χημικά αντιδραστήρια

Οι καλλιέργειες των μυκήτων πραγματοποιήθηκαν σε θάλαμο νηματικής ροής ESCO Airstream Class II Biohazard Safety Cabinet με ηλεκτρονικό λύχνο Bunsen OMM Galaxy 1, ενώ η συντήρησή τους έγινε σε ψυκτικό θάλαμο CDR CLD Walk-in DG /DX Cold Room στους 5οC.

Οι αποστειρώσεις πραγματοποιήθηκαν σε αυτόκαυστο SN FMS 07060101 3000W ελληνικής κατασκευής (Αφοί Μ. Ανδριανόπουλοι ΟΕ Αρ. Εγκρ. 83651 61) στις 2 atm πίεση και 121οC για 20 min.

Οι στερεές καλλιέργειες επωάστηκαν σε θάλαμο VELP FTC 90E Refrigerated Incubator είτε στους 25.3οC είτε στους 26οC (ανάλογα με το στέλεχος) σε σκότος, ενώ οι υγρές καλλιέργειες σε επωαστήρα ZHWY-200B Incubator Shaker στους 26οC και με 180 στροφές το λεπτό σε φυσικό φωτισμό.

Οι στερεοσκοπικές παρατηρήσεις έγιναν σε στερεοσκόπιο BREUKHOVEN BMS74957.

Για τα θρεπτικά μέσα χρησιμοποιήθηκαν PDA και τρυπτόνη της σειράς Difco και εκχύλισμα μαγιάς της σειράς Bacto της BD, άγαρ της AppliChem, εκχύλισμα βύνης, D(+)-γλυκόζη, σουκρόζη, NaNO<sub>3</sub>, KCl, NaCl, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>HSO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, ασπαραγίνη και CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O της Merk, πεπτόνη της Sigma-Aldrich, χλωραμφενικόλη της Alpha Aesar, στρεπτομυκίνη της Biochrom AG και προαποστειρωμένα τρυβλία πολυστυρενίου διαμέτρου 92 mm και ύψους 16 mm της Sarstedt. Το νερό για τις καλλιέργειες παράχθηκε με τον αποστακτήρα Water Distilling Apparatus της Schott.

Ο σχεδιασμός των τρισδιάστατων υποστηρικτικών σκαλωσιών έγινε στο λογισμικό πακέτο RhinoCeros 3D της Robert McNeel & Associates.

Πολλές από τις πρωτότυπες δομές υποστήριξης σχεδιάστηκαν και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Embrace orthopdecis του Νίκου Σαρρή με τη χρήση μηχανημάτων και φορητού εξοπλισμού του χώρου. Ανάμεσα σε αυτά έγινε χρήση των:

- ψαλίδι πάγκου λαμαρίνας,
- τροχός χειρός,
- rooster με σταθερή επιδαπέδια βάση ύψους 1,20 μέτρων, πλάτους 80 εκατοστών και μήκους 80εκ. και άξονα σε κλίση, μήκους 60 εκ. σε συνδυασμό με γυαλόχαρτο τραχύτητας 40,
- διάφορα εργαλεία χειρός.

## 2.1.2 Θρεπτικά υποστρώματα

Πρώτο και αναγκαίο βήμα για την έναρξη των καλλιεργειών και τη δημιουργία του υλικού, ήταν η αναβίωση των στελεχών των μυκήτων σε τρυβλία. Χρησιμοποιήθηκε μυκήλιο των εννέα ειδών που φυλάσσεται σε σωλήνες με θρεπτικό υλικό σε κλίση. Μετά την αναβίωση πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη των στελεχών σε στερεά και υγρά θρεπτικά υλικά.

### 2.1.2.1 Παρασκευή στερεού θρεπτικού μέσου

Για ένα λίτρο θρεπτικού υλικού προστέθηκαν 39 g σκόνης άγαρ δεξτρόζης πατάτας (PDA) σε μπουκάλι αντιδραστήριου του ενός λίτρου, πληρώθηκε με αποσταγμένο νερό το ένα τέταρτο του μπουκαλιού, ανακινήθηκε μέχρις ότου διαλυθεί η σκόνη και προστέθηκε νερό μέχρι λίτρο. Το θρεπτικό μέσο αποστειρώθηκε στο αυτόκαυστο και έπειτα επιστρώθηκε σε τρυβλία δίπλα σε λύχνο Bunsen (Εικ. 26).

### 2.1.2.2 Παρασκευή υγρού θρεπτικού μέσου

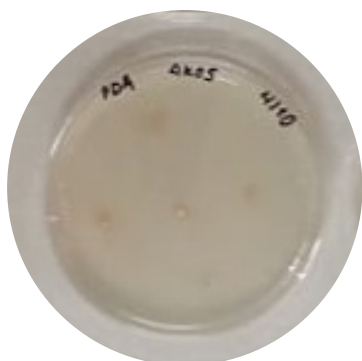
Η επιλογή των υγρών θρεπτικών μέσων έγινε με βάση τις εργασίες των Christie et al. (1978) και Gaunitz et al (2019) (Εικ. 27).

Η παραγωγή 1 L από το πρώτο θρεπτικό μέσο (Czaprek-Dox Broth) έγινε σύμφωνα με τους Ainsworth et al. (2008) ως εξής: παρασκευάστηκαν Stock solution A: διαλύθηκαν 4 gr  $\text{NaNO}_3$ , 1 gr  $\text{KCl}$ , 1 gr  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  και 0.2 gr  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  σε 100 mL νερό, Stock solution B: διαλύθηκαν 2 gr  $\text{K}_2\text{HSO}_4$  σε 100 mL νερό, Stock solution C: διαλύθηκαν 0.1 gr  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  σε 10 mL νερό, Stock solution D: διαλύθηκαν 0.05 gr  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  σε 10 mL νερό. Σε μεταλλικό σκεύος πάνω σε θερμαντική εστία προστέθηκαν 900 mL αποσταγμένο νερό, 30 gr σουκρόζη, 50 mL Stock solution A, 50 mL Stock solution A, 1 mL Stock solution C, 1 mL stock Solution D και ακολούθησε ανάδευση μέχρι ομογενοποίηση του μείγματος.

Η παραγωγή 1 L από το δεύτερο θρεπτικό μέσο έγινε σύμφωνα με τους ως εξής: Σε μεταλλικό σκεύος πάνω σε θερμαντική εστία προστέθηκαν 1 L αποσταγμένο νερό, 5 gr πεπτόνης, 3 gr εκχύλισμα ζύμης, 3 gr εκχύλισμα βύνης, 15 gr D(+)-γλυκόζης και ακολούθησε ανάδευση μέχρι ομογενοποίηση του μείγματος. Στη συνέχεια το κάθε υγρό θρεπτικό μέσο κατανεμήθηκε σε κωνικές φιάλες των 250 mL με 100 mL υγρό θρεπτικό μέσο ανά φιάλη για τις καλλιέργειες τόσο των αρχικών όσο και των τρισδιάστατων και μεγαλύτερης κλίμακας δοκιμών. Ακολούθησε σφράγιση με βαμβάκι και αποστείρωση στο αυτόκαυστο.

### 2.1.2.3 Παρασκευή κολλώδους θρεπτικού μέσου

Παρασκευάστηκε μία φυσική κόλλα με βάση το άμυλο (FabTextiles, Βαρκελώνη) όπου σε μεταλλικό σκεύος πάνω σε θερμαντική εστία προστέθηκαν 20 gr γλυκερίνης, 80 gr νερό, 1.6 gr άμυλο (εμπορίου) και 15ml λευκό ξύδι και ακολούθησε ανάδευση μέχρι ομογενοποίηση του μείγματος και εξάτμιση των υγρών στοιχείων (περίπου 10 λεπτά). Στη συνέχεια μία ποσότητα από το φυτικό βιοπλαστικό επιστρώθηκε σε γυάλινα τρυβλία όπου προστέθηκαν κομμάτια σχοινοίου σιζάλ σε άναρχη τοποθέτηση και τα τρυβλία αποστειρώθηκαν στο αυτόκαυστο (Εικ. 28).



Εικ. 26: Στερεό θρεπτικό μέσο

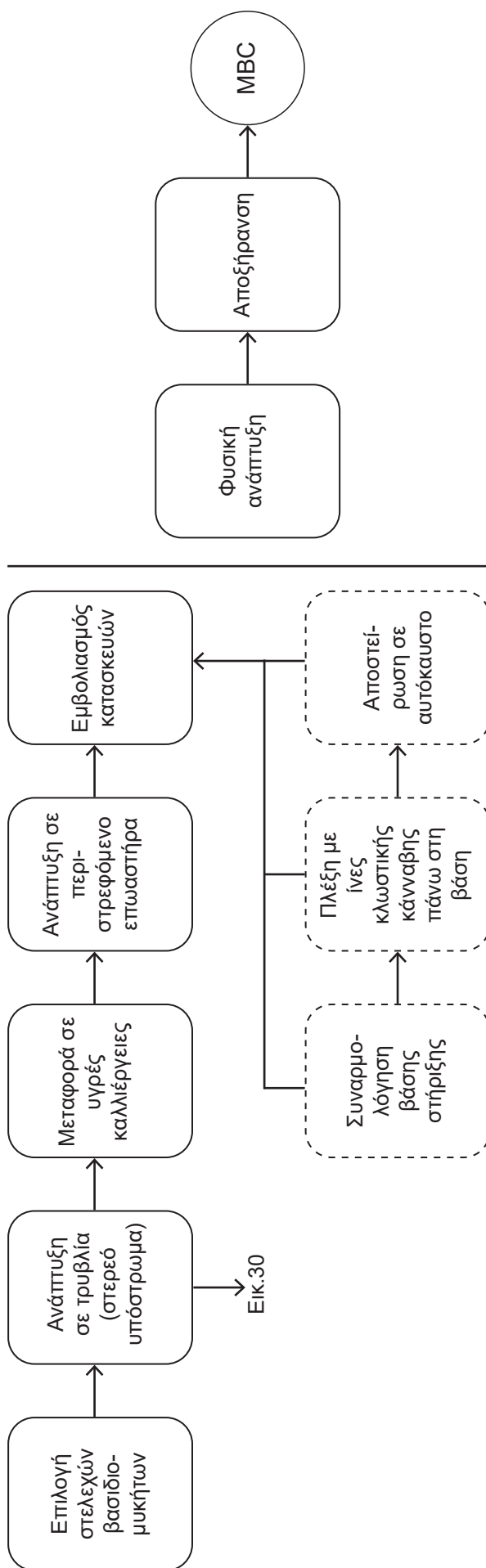


Εικ. 27: Υγρό θρεπτικό μέσο



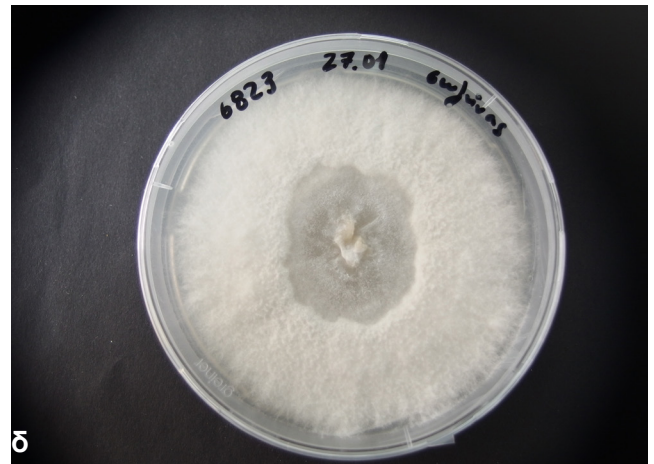
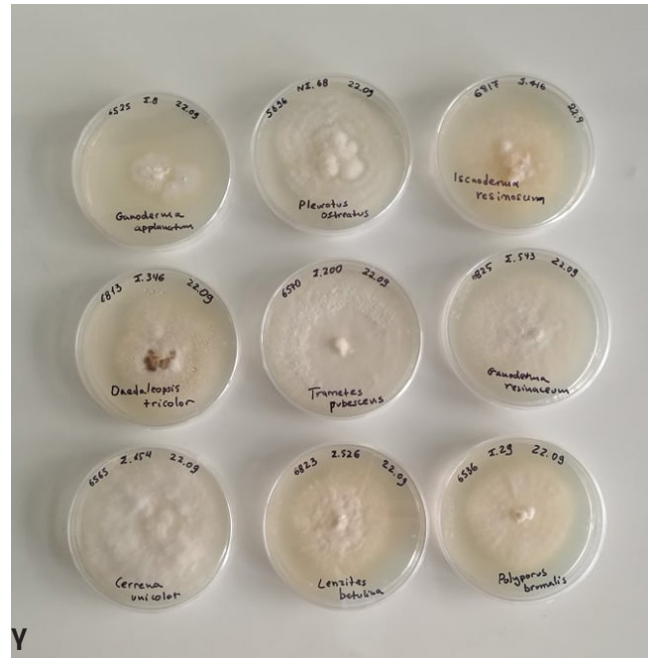
Εικ. 28: Κολλώδες θρεπτικό μέσο

Παρακάτω αποτυπώνεται διαγραμματικά η διαδικασία ανάπτυξης που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία όλων των πλεκτών κατασκευών (κυρίως τρισδιάστατων καθώς στις περισσότερες δισδιάστατες δεν έγινε χρήση υγρών θρεπτικών μέσων).



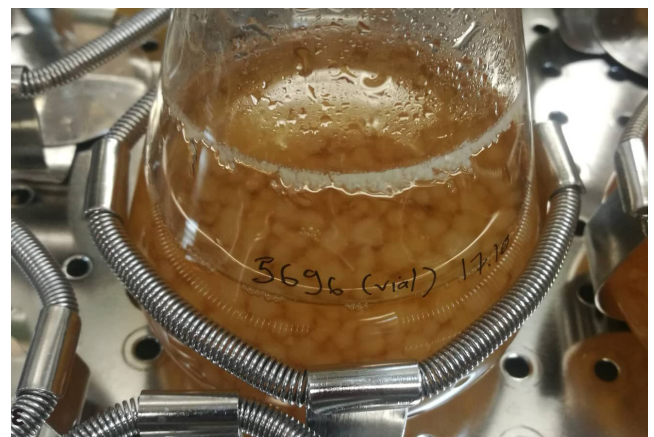
Εικ. 29: Διαδικασία ανάπτυξης των βιο-σύνθετων υλικών





**Εικ. 30:**

(α, β): εικόνες από τον επωαστικό θάλαμο του εργαστηρίου,  
 (γ): καλλιέργειες εννιά στελεχών που μελετήθηκαν,  
 (δ): ανακαλλιέργεια του βασιδιομύκητα *Lenzites betulina* από σωλήνα,  
 (ε): Λεπτομέρεια από την υγρή καλλιέργεια του μύκητα *Pleurotus ostreatus* στο τέλος της επώασης της υγρής καλλιέργειας (εικόνες από προσωπικό αρχείο)

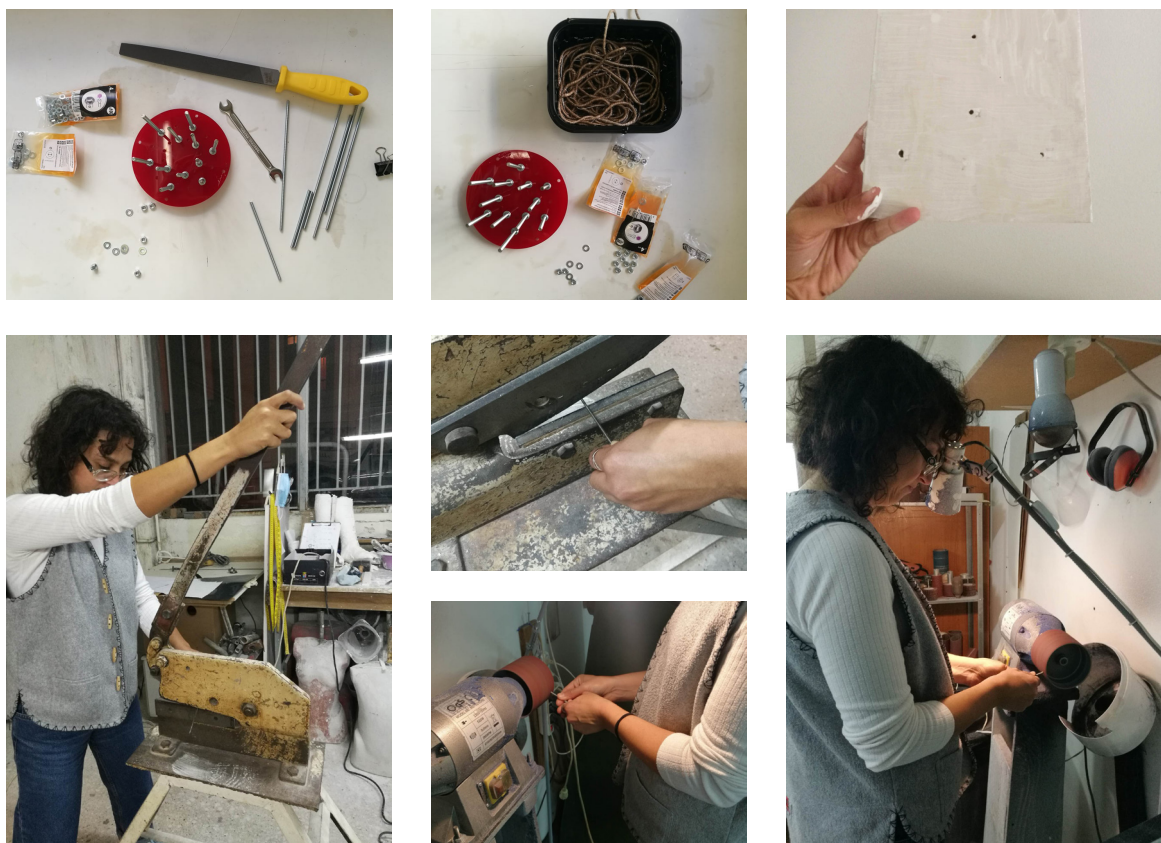


## 2.2 Κατασκευές

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν καθ'όλη τη διάρκεια των πειραματισμών με δισδιάστατες και τρισδιάστατες πλέξεις με βάση φυτικές ίνες ήταν (σε χρονολογική σειρά ξεκινώντας από τις πιο απλές δομές):

- διηθητικό χαρτί,
- ανοξείδωτο σύρμα πάχους 1 χιλιοστού,
- βαμβακερό δίχτυ,
- διάφανο πλέξιγκλας πάχους 3 χιλιοστών,
- μεταλλικές ντίζες διαμέτρου 3 χιλιοστών,
- παξιμάδια (αρχικά απλά έπειτα ασφαλείας διαφόρων διαμέτρων) και ροδέλες,
- μούφες ντίζας,
- ξύλα πάχους 15 και 20 χιλιοστών,
- βέργες αλουμινίου,
- μεταλλικές ανοξείδωτες ντίζες διαμέτρου 4 χιλιοστών,
- διάφανο πλέξιγκλας πάχους 5 χιλιοστών,
- διάφορα εργαλεία χειρός και άλλα υλικά που εξυπηρετούσαν τη δημιουργία πρωτοτύπων προς αξιοποίηση και προβληματισμό (Εικ. 31).

Παρακάτω υπάρχουν πιο αναλυτικά οι δοκιμές όπως αυτές διαδέχτηκαν η μία την άλλη με βάση τις παρατηρήσεις που κάθε φορά αποκόμιζα.



Εικ. 31: Εργαστήριο Embrace (Εικόνες από προσωπικό αρχείο)

## 2.3 Μήτρες για δισδιάστατες και τρισδιάστατες δοκιμές

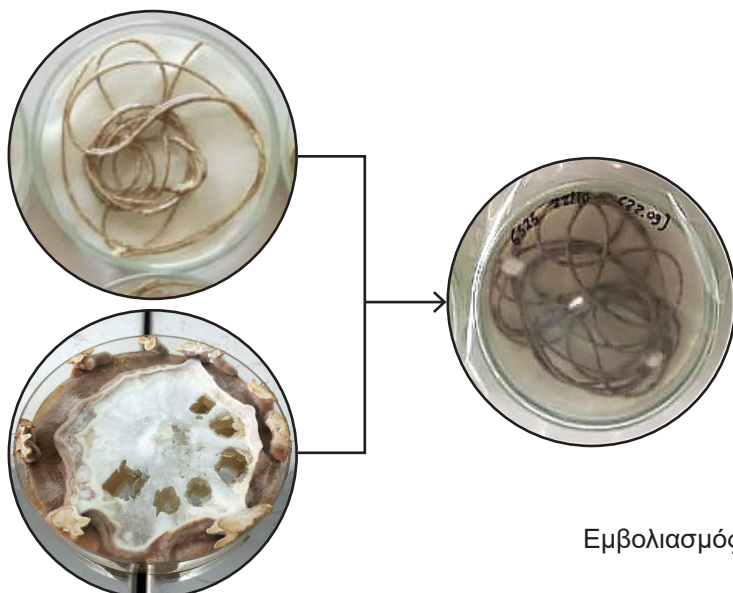
Εξερευνώντας την αλληλεπίδραση μεταξύ των φυτικών ινών με τα στελέχη βασιδιομυκήτων της Μυκητοθήκης ATHUM αξιοποιήθηκαν διαφορετικές δισδιάστατες και τρισδιάστατες γεωμετρίες και πάχη ινών.

### 2.3.1 Δισδιάστατες δοκιμές

#### 2.3.1.1 Δοκιμή 1

Χρησιμοποιήθηκαν γυάλινα τρυβλία στα οποία προστέθηκε αρχικά διηθητικό χαρτί για να διατηρήσει την υγρασία μέσα στο τρυβλίο. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε μικρό κομμάτι από σχοινί κάνναβης σε τυχαίο σχηματισμό αφού πρώτα είχε διαποτιστεί με αποσταγμένο νερό. Ακολούθησε ο εμβολιασμός κάθε τρυβλίου με κάθε ένα από τα επιλεγμένα στελέχη μαζί με 10 ml αποσταγμένο νερό με τη χρήση αυτόματης πιπέττας προσαρμοσμένου όγκου (Εικ. 32).

Χρειάστηκαν από 6 μέχρι 8 μέρες για να αναπτυχθούν. Συνολικά εμβολιάστηκαν εννέα τρυβλία με δύο είδη ινών κάνναβης, ένα μικρότερης και ένα μεγαλύτερης διαμέτρου. Μετά την ανάπτυξη τους όλα τα οικοδομήματα αποξηράνθηκαν σε ξηραντήρα ώστε να αδρανοποιηθεί το μυκήλιο και να μην καρποφορήσει.



**Εικ. 32:**  
Εμβολιασμός με *Ganoderma applanatum* (ATHUM 6525)

#### 2.3.1.2 Δοκιμή 2

Στη συνέχεια, βασιζόμενη στις παρατηρήσεις των πρώτων δοκιμών, δημιουργήθηκαν μικρές κατασκευές από ανοξείδωτο σύρμα και κλωστική κάνναβη όπου ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία. Δεν χρησιμοποιήθηκε διηθητικό χαρτί παρά μόνο διάβρωση με αποσταγμένο νερό. Οι κατασκευές ήταν τόσο σε δύο διαστάσεις (έγινε χρήση γυάλινου τρυβλίου) όσο και σε τρεις (έγινε χρήση γυάλινου βάζου διαστάσεων 8 x 8 x 10 εκατοστών περίπου) (Εικ. 33).



**Εικ. 33: (α)** Εμβολιασμός δισδιάστατης πλέξης με σύρμα σε γυάλινο τρυβλίο με *Cerrena unicolor* (ATHUM 6565)



**Εικ. 33: (β)** Εμβολιασμός τρισδιάστατης πλέξης με σύρμα σε γυάλινο βάζο με *Cerrena unicolor* (ATHUM 6565)



## 2.3 Μήτρες για δισδιάστατες και τρισδιάστατες δοκιμές (συνέχεια)

Εξερευνώντας την αλληλεπίδραση μεταξύ των φυτικών ινών με τα στελέχη βασιδιομυκήτων της Μυκητοθήκης ATHUM αξιοποιήθηκαν διαφορετικές δισδιάστατες και τρισδιάστατες γεωμετρίες και πάχη ινών.

### 2.3.2 Τρισδιάστατες δοκιμές

#### 2.3.2.1 Δοκιμή 1

Εδώ υιοθετήθηκε μία τελείως διαφορετική προσέγγιση πλαισίου ανάπτυξης το οποίο παρέπεμπε σε κυλινδρικό σωληνοειδές δοκίμιο χωρίς ενδιάμεση πλέξη.

Ο πλεγμένος κύλινδρος στηρίζεται σε μια συναρμολογούμενη ξύλινη βάση αποτελούμενη από δύο επιφάνειες πάχους 2,5 εκατοστών οι οποίες συγκρατούνται με τέσσερις μεταλλικές (αλουμινένιες) ντίζες χωρίς σπείρωμα. Σε κυκλική διατομή εσωτερικά των δύο ξύλινων βάσεων έχουν τοποθετεί 22 γάντζοι  $\varnothing 3,5$  εκατοστών.

Οι ίνες πλέχθηκαν σε έναν κυρίως άξονα πλέξης με κάθετη πλέξη μόνο στο κέντρο. Η διαδικασία ανάπτυξης του δοκιμίου ακολούθησε και εδώ το προηγούμενο βασικό πρωτόκολλο.

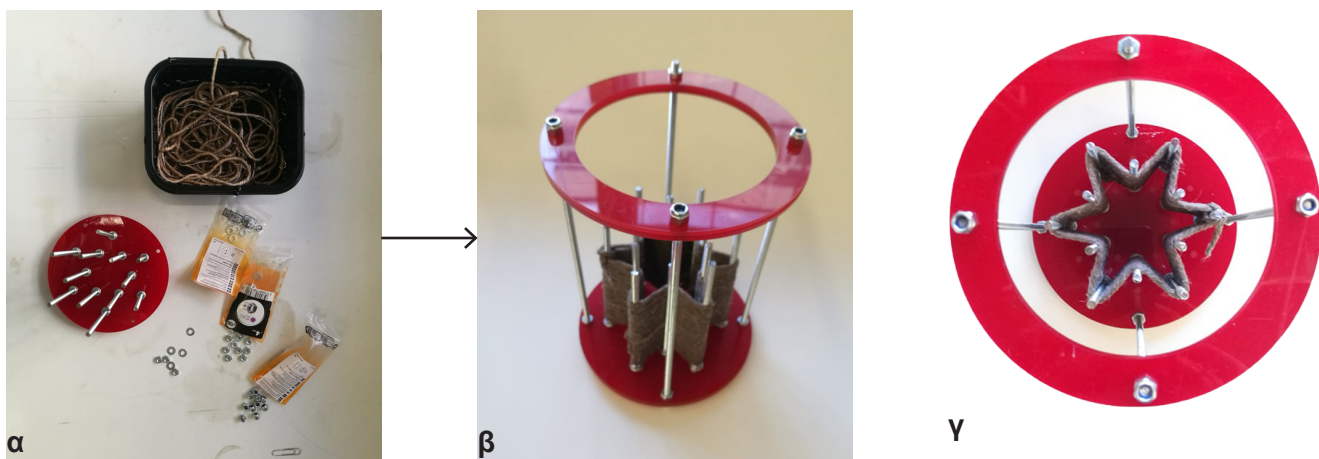


**Εικ. 34:** Δοκίμιο πλεγμένο και διαβρεγμένο έτοιμο για εμβολιασμό

#### 2.3.2.2 Δοκιμή 2

Η επόμενη δοκιμή περιλάμβανε τη χρήση διαφορετικών υλικών και την πλέξη τόσο με ίνες κάνναβης όσο και γιούτας. Χρησιμοποιήθηκαν πλέξιγκλας πάχους 3 χιλιοστών, μεταλλικές βέργες (ντίζες) διαμέτρου 4 χιλιοστών με σπείρωμα και παξιμάδια σταθεροποίησης (απλά και ασφαλείας).

Το πλέξιγκλας κόπηκε στο εργαστήριο ΠΟΙΩ του δήμου Αθηναίων σε μηχανή κοπής λέιζερ 150W SK1390 ενώ οι ντίζες κόπηκαν σε γωνιακό τροχό χειρός και η συνολική συναρμολόγηση έγινε με εργαλεία χειρός. Εδώ, χρησιμοποιήθηκε λινό σχοινί το οποίο ήταν εμποτισμένο σε κρασί (δεν έγινε στα πλαίσια του συγκεκριμένου πειράματος οπότε και δεν μελετήθηκε περαιτέρω αν ο εμποτισμός έπαιξε κάποιο ενισχυτικό ρόλο στην ανάπτυξη του μυκηλίου) και οι ντίζες τοποθετήθηκαν σε σχήμα αστεριού σε οριζόντια μόνο πλέξη. Οι διαστάσεις ήταν περί τα 60 x 60 χιλιοστά και ο μύκητας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο *Cerrena unicolor*. Η διαδικασία ανάπτυξης του δοκιμίου ακολούθησε και εδώ το προηγούμενο βασικό πρωτόκολλο.



**Εικ. 35:** (α) Συγκέντρωση υλικών και προετοιμασία για δημιουργία πρωτοτύπου, (β) Δοκίμιο πλεγμένο και διαβρεγμένο έτοιμο για εμβολιασμό, (γ) Κάτοψη κατασκευής



### 2.3.2.3 Δοκιμή 2 Συνέχεια

Ακολούθησαν και άλλοι πειραματισμοί με σχήματα πλέξης τόσο με ίνες γιούτας όσο και κλωστικής κάνναβης.

Τόσο η μέθοδος ανάπτυξης όσο και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν παρέμειναν τα ίδια με την προηγούμενη δοκιμή ενώ αυτό που διαφοροποιήθηκε ήταν η πλέξη και τα σχήματα των πλέξεων. Και εδώ η ανάπτυξη του υλικού καθ' ύψος παρέμεινε σε οριζόντια μόνο διάταξη με κάποιες κάθετες “ασφαλίσεις” με σχοινί κάνναβης για τη συγκράτηση του block σαν σύνολο.



**Εικ. 36:** Δοκίμιο με ίνες γιούτα στην οριζόντια πλέξη και ίνα κλωστικής κάνναβης στην κάθετη συμπληρωματική σταθεροποίηση (κυκλική διάταξη)



**Εικ. 37:** Δοκίμιο με ίνες γιούτα στην οριζόντια πλέξη και ίνα κλωστικής κάνναβης στην κάθετη συμπληρωματική σταθεροποίηση (ορθογώνια διάταξη)

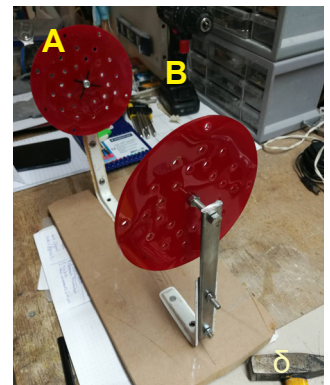
### 2.3.3 Άλλες Δοκιμές

Έγιναν και κάποιες προσπάθειες προσέγγισης των μυκηλιακών βιο-σύνθετων με διαφορετικούς τρόπους πλέξης ή/και πάνω σε ανόμοιες βάσεις στήριξης. Στις εικόνες α-ζ παρουσιάζεται η ανάπτυξη μίας επιτραπέζιας κυλινδρικής βάσης η οποία επέτρεπε την πλέξη σε σωληνοειδές ανάπλυγμα παρόμοιο με αυτό της δοκιμής 1 με διαφορετική όμως πλέξη. Εδώ ακολουθήθηκε, *sensu lato*, η αρχή λειτουργίας της παραδοσιακής ύφανσης με στημόνι και υφάδι καθώς η πλέξη γινόταν σε οριζόντια και κάθετη κατεύθυνση με κυκλική όμως φορά.

Για την πλήρωση με οριζόντιας κατεύθυνσης ίνες, χρησιμοποιήθηκε ένα μακρύ νήμα το οποίο περάστηκε μέσα από τις τρύπες των δύο στρογγυλών πλέξιγκλας αντικρουστά ξεκινώντας από την Α στη Β και ούτω καθ'εξής. Για να αφαιρεθεί το δοκίμιο κόπηκαν τα σημεία τα οποία εφάπτονταν στις κυλινδρικές βάσεις και η συνολική στήριξη παρέμεινε στην επιφάνεια συγκράτησης.

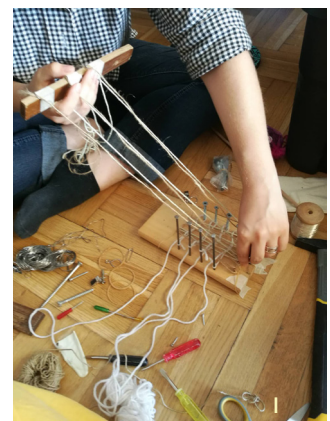
Μία άλλη προσέγγιση, σε πολύ πρώιμο στάδιο εμφανώς, ήταν η αποδόμηση της έννοιας της δισδιάστατης ύφανσης σε αργαλειό και η προσαρμογή της έτσι ώστε να μπορέσει να υποστηρίξει τη χωρική ανάπτυξη ενός γεωμετρικά πιο σύνθετου block (εικόνα η).

Τέλος, έγινε μια ακόμη προσπάθεια διαφορετικής πλέξης πάνω στη βάση των προηγούμενων δοκιμών (δοκιμή 2 και δοκιμή 2 συνέχεια) έτσι ώστε να συμπλέκονται (interlock) οι ίνες επιτρέποντας την ογκομετρική ανάπτυξη ενός συμπαγούς δοκιμίου (εικόνα θ).



**Εικ. 38:** (α - ζ): Κυλινδρική ύφανση σε σταθερή βάση, η: εναλλακτική πλέξη στη βάση της “δοκιμής 2”, θ: Self-standing πλέξη, ι: Primitive πρωτότυπο ενός μικρού χειροποίητου τρισδιάστατου αργαλειού

Ειδικά στην περίπτωση “θ”, η λύση αυτή προσπαθεί να εντάξει δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, αυτή του πιο αποτελεσματικού πλαισίου ανάπτυξης από άποψη υλικού, χρόνου και πολυπλοκότητας πλέξης όσο και αποδοτικότητας της δομής στο σύνολο της & αυτή της σύλληψης, σχεδίασης και πρωτοτυποποίησης ενός βασικού επιπέδου, προσαρμοσμένου στην ανάγκη της παρούσας μεταπτυχιακής μελέτης τρισδιάστατου αργαλειού.



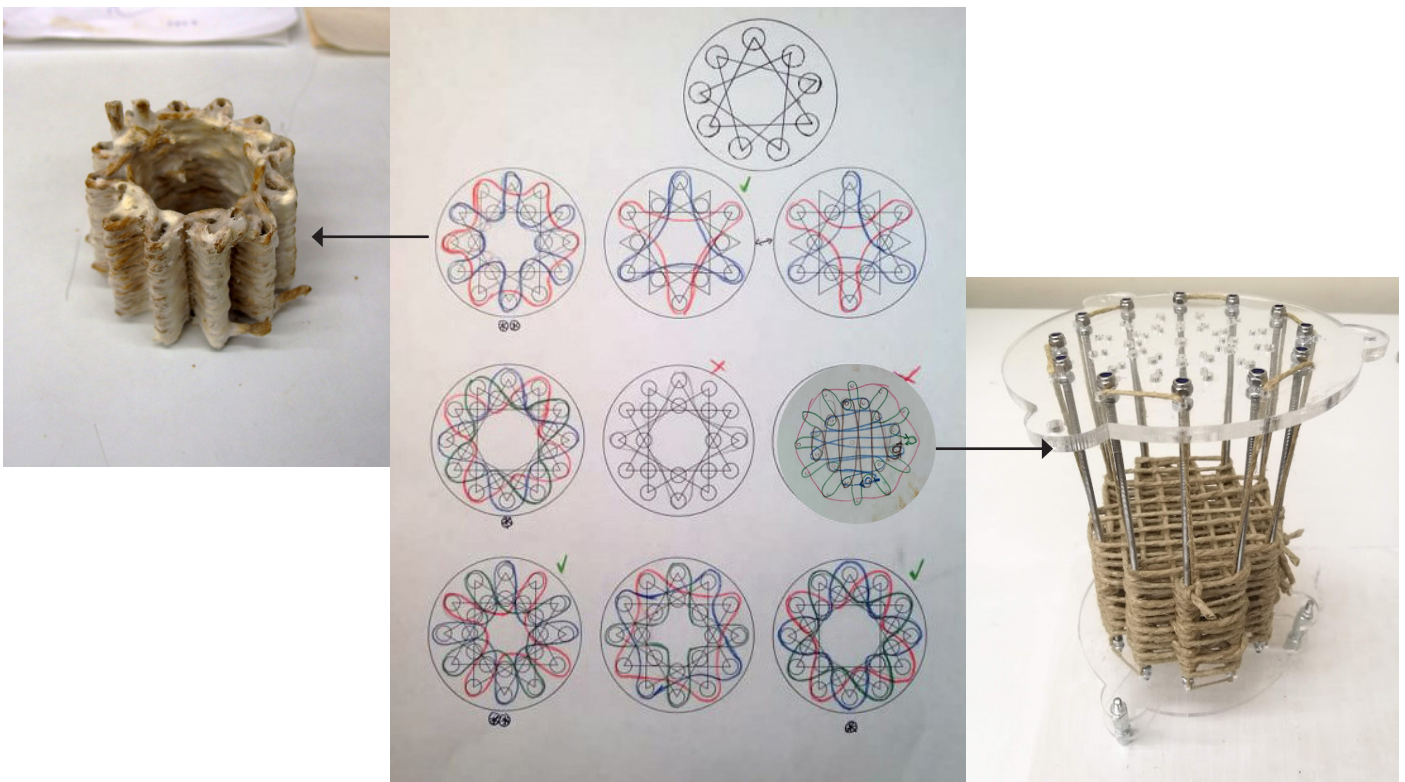


### 3.3 Επιλογή σχεδίου προς περαιτέρω αξιολόγηση

Οι τελικές υποστηρικτικές κατασκευές αποτελούν ελαφρώς βελτιωμένες μετατροπές των τρισδιάστατων δοκιμών 2. Το πλέξιγκλας των τριών χιλιοστών αντικαταστάθηκε από αντίστοιχο διάφανο των πέντε (5) χιλιοστών, ενώ χρησιμοποιήθηκαν ανοξείδωτες ντίζες μικρότερης διαμέτρου (4 χιλιοστά) και τροποποιήθηκε στην πορεία ο τρόπος πλέξης. Οι ντίζες εδώ κόπηκαν με μεικτές τεχνικές, τόσο σε ψαλίδι λαμαρίνας ίσιας κοπής όσο και με γωνιακό τροχό χειρός. Το πλέξιγκλας κόπηκε και πάλι με τη διαδικασία του laser cutting όπως και στις προηγούμενες δοκιμές. Αυτή τη φορά, συνεργάστηκα με το συνδρομητικό πολυεργαστήριο "Athens Makerspace" όπου και κόψαμε το υλικό με το μηχάνημα κοπής Laser, BRM6090 CO2. Τα σχέδια δημιουργήθηκαν στο λογισμικό AutoCAD 2021.

Σχεδιάστηκε επίσης μία custom βάση σταθεροποίησης των υπό πλέξη σκαλωσιών για επιτραπέζια πλέξη. Η βάση αποτελούνταν - όπως φαίνεται και στην εικόνα - από μία ξύλινη επιφάνεια πάχους δεκαοκτώ (18) χιλιοστών όπου στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τρεις οπές μέσα στις οποίες κολλήθηκαν τρία ίσα κομμάτια ντίζας διαμέτρου πέντε (5) χιλιοστών. Εκεί πάνω συγκρατήθηκε με μούφες (είδος μακρόστενο παξιμαδιού) για ντίζες πλέξιγκλας σε σχήμα τριγώνου για να εξασφαλιστεί η απόσταση από τη βάση και η ασφαλέστερη και ευκολότερη σταθεροποίηση της υπό πλέξης δομής. Στις τελικές αναπτύξεις χρησιμοποιήθηκε μόνο σχοινί κάνναβης διαμέτρου 4 χιλιοστών. Η διαδικασία είναι η ίδια που ακολουθούνταν και στις προηγούμενες δοκιμές.

Για τις τελικές αξιολογήσεις επιλέχθηκαν δύο είδη πλέξης, ένα με συμπαγές γέμισμα (από εδώ και στο εξής "solid weaved brick") και ένα όπου τα τοιχώματα δημιουργούσαν κάποιου είδους "νεύρα" με το κέντρο τους να είναι κενό ("vacuum weaved brick") όπως φαίνεται στις εικόνες παρακάτω. Τα δοκίμια ήταν κυκλικής περιόδου διαμέτρου με διαστάσεις 80 x 80 x 60 χιλιοστά (Μήκος x Πλάτος x Ύψος). Τα δύο πλεκτά "blocks" διέφεραν, κατά κύριο λόγο, ως προς τον τρόπο πλέξης καθώς επίσης και ως προς την ποσότητα υλικού που χρησιμοποιήθηκε και συνεπώς το βάρος των δοκιμίων. Στα δύο είδη βιοσύνθετων ο εμβολιασμός έγινε με τους μύκητες *Trametes pubescens* (ATHUM 6570) και τον *Lenzites betulina* (ATHUM 6823) σε ποσότητα 15ml και την προσθήκη 15ml αποσταγμένου νερού μετά από έλεγχο 3-4 ημερών μετά τον αρχικό εμβολιασμό για τη διατήρηση της απαραίτητης υγρασίας για την ανάπτυξη του μύκητα.



## 2.4 Μηχανικές Ιδιότητες

Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε περαιτέρω την εφαρμοσιμότητα και πρακτικότητα των βιο-σύνθετων οικοδομημάτων της παρούσας εργασίας προχωρήσαμε σε μία σειρά διεργασιών - ελέγχων προσομοίωσης ρεαλιστικών σεναρίων καταπόνησης των υπό μελέτη δοκιμίων. Οι έλεγχοι αυτοί έγιναν τόσο σε φυσικές συνθήκες όσο και σε ελεγχόμενο περιβάλλον όπως και σε εργαστηριακό περιβάλλον και αποτέλεσαν τη βάση για ποιοτικό έλεγχο των δομών που αναπτύχθηκαν κατά την έρευνα.

### 2.4.1 Δοκιμές θλίψης

Δύναμη θλίψης ή συμπίεσης (compression force  $F$ ) είναι μία κατάσταση εντατικής αξονικής καταπόνησης ενός παραμορφώσιμου στερεού σώματος. Ένα στοιχείο καταπονείται σε θλίψη, όταν στον άξονα του ασκούνται δύο ίσες και αντίρροπες δυνάμεις οι οποίες οδηγούν σε μείωση του μήκους και σε διόγκωση της αρχικής διατομής [υπό την προϋπόθεση ότι αυτό δεν υφίσταται λυγισμό] (Γ. Γκρός., 2002). Ουσιαστικά, περιγράφει την αντίσταση ενός υλικού στη σύνθλιψη με κατακερματισμό (εφόσον πρόκειται για ψαθυρό υλικό) (υπολογίζεται σε MPa).

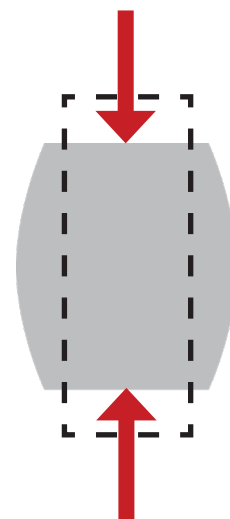
Ο τύπος υπολογισμού είναι:

$$\sigma = \frac{F}{\alpha}$$

, με  $\sigma$  τη θλιπτική τάση,  $F$  την εξωτερική δύναμη και  $\alpha$  το εμβαδόν διατομής (Γ.Ι. Τσαμασφύρος, 1990).

Οι μηχανικές δοκιμές θλίψης έγιναν στο Εργαστήριο “Ολοκληρωμένου Βιομηχανικού Σχεδιασμού” του τμήματος Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου (Σύρος) υπό την καθοδήγηση του Νικόλαου Ζαχαρόπουλου και τη βοήθεια του Νικόλαου Πολιτόπουλου (Ειδικό Τεχνικό και Εργαστηριακό Προσωπικό (ΕΤΕΠ)).

Οι δοκιμές έγιναν στη μηχανή ελέγχου μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών υλικών SHIMADZU testing machine AG-X μέγιστης δυναμικής φόρτισης/ ισχύος 100 kN (Εφελκυσμός μεταλλικών υλικών, Θλίψη ψαθυρών υλικών) [1].



Στόχος ήταν να καταγράψουμε την ακαμψία της δομής στο σύνολο της μέσω της παρατήρησης της παραμόρφωσης της κατά τη συμπίεση της με ένα συγκεκριμένο φορτίο.

Τόσο οι αρχικές όσο και οι νέες διαστάσεις (το ύψος κυρίως ήταν αυτό που ενδιέφερε) σε δύο χρονικές στιγμές - αμέσως μετά τη συμπίεση και μετά από διάστημα ενάμιση μήνα - των δομών φαίνονται στον πίνακα της σελίδας 66. Αναπτύχθηκαν 20 δοκίμια δύο διαφορετικών πλέξεων (10 για κάθε είδος πλέξης) ως ο ελάχιστος αριθμός για να είναι μετρήσιμα και σχετικά αξιόπιστα τα αποτελέσματα. Τα τελευταία αποτυπώθηκαν με τη μορφή διαγραμμάτων δύναμης - μετατόπισης των δομικών στοιχείων όπως ακολουθούν παρακάτω.

Αυτό που εξετάζουμε είναι κυρίως η δομή ως πολυμερικό σύνθετο υλικό στο σύνολο της και όχι τα χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων των αναπτυκτών δομών (ίνες κάνναβης και μυκήλιο). Θέλουμε να μετρήσουμε και στην πορεία αξιολογήσουμε την ακαμψία της και την ιξωδοελαστική της συμπεριφορά δηλαδή το κατά πόσο θα επανέλθει στην προηγούμενη της μετατόπισης κατάσταση.



## 2.4 Μηχανικές Ιδιότητες (συνέχεια)

### 2.4.2 Δοκιμή αποδόμησης σε φυσικές και ημι-ελεγχόμενες συνθήκες

Μία ακόμη παράμετρος που θέλαμε να εξετάσουμε ήταν η αποικοδόμηση σε φυσικό περιβάλλον και σε ημι-ελεγχόμενες συνθήκες. Για τη διάσπαση σε φυσικό περιβάλλον αναπτύχθηκαν 2 μικρά βιο-τούβλα ενώ για διάσπαση σε ημι-ελεγχόμενες συνθήκες αναπτύχθηκαν 3 δοκίμια. Οι δύο δοκιμές φυσικού εδάφους των βιοσύνθετων υλικών διεξήχθη για διαφορετικό αριθμό ημερών όπως φαίνεται παρακάτω. Η μέθοδος δοκιμής κομποστοποίησης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βαθμού και του ρυθμού αναερόβιας βιοαποικοδόμησης των βιο-σύνθετων πολυμερών της παρούσας μελέτης που εκτίθενται σε ελεγχόμενο περιβάλλον κομποστοποίησης.

#### 2.4.2.1 Αποδόμηση σε φυσικό περιβάλλον

**Διαστάσεις:** 40 x 40 x 25 χιλιοστά (Μήκος x Πλάτος x Ύψος)

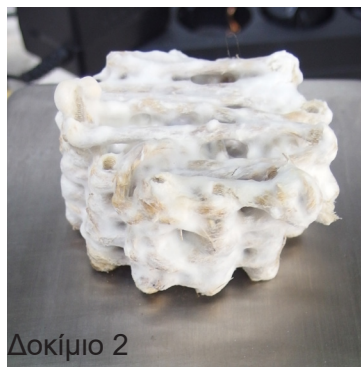
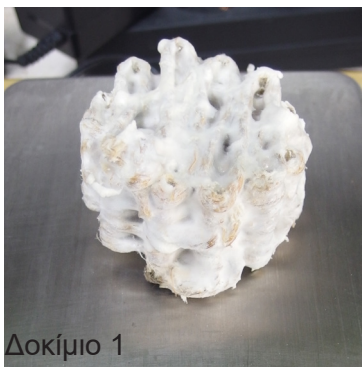
**Βάρος:** Δοκίμιο 1 - 24,5 γραμμάρια

Δοκίμιο 2 - 24,2 γραμμάρια

**Διαδικασία τοποθέτησης:** Τα δοκίμια θάφτηκαν σε προαύλιο χώρο κοντά στο εργαστήριο του τομέα μπροστά από ένα πεύκο σε βάθος περί τα δέκα εκατοστά.

**Αρχική τοποθέτηση:** 15.02.2023

**Συνθήκες αποδόμησης:** Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στις 15 Φεβρουαρίου 2023 σε περιοχή με πεύκα (37°57'58.1"N 23°47'12.8"E) πλησίον του εργαστηρίου.



#### 2.4.2.2 Αποδόμηση σε ημι-ελεγχόμενες συνθήκες

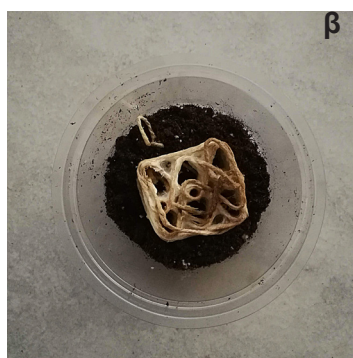
**Διαστάσεις:** 40 x 30 x 15 χιλιοστά (Μήκος x Πλάτος x Ύψος)

**Βάρος:** Λιγότερο από 10 γραμμάρια (δεν υπάρχει ακριβής μέτρηση για τα τρία δοκίμια)

**Διαδικασία τοποθέτησης:** Σε πλαστικό δοχείο ανοίχτηκαν τρύπες ώστε να μπορεί να γίνεται στράγγιση καθώς γινόταν διάβρωση κάθε περίπου 10 μέρες. Προστέθηκε μικρή ποσότητα χώματος (α) πάνω απ'την οποία τοποθετήθηκε το κάθε δοκίμιο (β) το οποίο εν συνεχεία καλύφθηκε με χώμα (γ).

**Αρχική τοποθέτηση:** 27.12.2022

**Συνθήκες αποδόμησης:** Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε μπαλκόνι (κεντρική Αθήνα) εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν καθ'όλη τη διάρκεια της τοποθέτησης.



## 2.4 Μηχανικές Ιδιότητες (συνέχεια)

### 2.4.3 Δοκιμή καύσης

Επίσημες δοκιμές των ιδιοτήτων πυραντοχής μυκηλιακών βιο-σύνθετων υλικών έχουν γίνει μόνο σε περιορισμένα υλικά όπως αυτά που μελετάμε με χαρακτηριστικό υλικό την ασβεστοκάνναβη (ή δομική κάνναβη). Η τελευταία αποτελεί ένα σχετικά καινούριο υλικό, ελαφρύ, ανακυκλώσιμο, μη τοξικό διαπνέον, οικολογικά ανανεώσιμο και ελαφροβαρές θερμομονωτικό βιο-σύνθετο με αρνητικό δείκτη εκπομπής ρύπων που μπορεί να ρυθμίζει την υγρασία στο εσωτερικό του κτιρίου, βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα του αέρα. Παράγεται από την εντεριώνη (το εσωτερικό του κορμού) του φυτού *Cannabis sativa L.* ανεμειγμένο με υδραυλική άσβεστο (Minoeco, 2023; Τσιγκόπουλος, 2019).

Αξίζει να αναφέρουμε πως στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής υπάρχει μία τυπική μέθοδος δοκιμής των χαρακτηριστικών επιφανειακής καύσης δομικών υλικών, η *ASTM E84-19B*. Ο σκοπός αυτής της μεθόδου δοκιμής είναι να προσδιορίσει τη σχετική συμπεριφορά καύσης του υλικού παρατηρώντας την εξάπλωση της φλόγας κατά μήκος του δείγματος (UKHempcrete, 2014; Hempitecture, 2020; ASTM, 2023).

Ένας δείκτης που χρησιμοποιείται ακόμη για την αξιολόγηση της θερμομονωτικής αποτελεσματικότητας ανά μονάδα επιφάνειας δομικών υλικών είναι το R-value. Όσο πιο υψηλή η τιμή, τόσο λιγότερη θερμότητα μπορεί να περάσει από το υλικό διατηρώντας ένα σπίτι ζεστό το χειμώνα και δροσερό το καλοκαίρι. Η βιβλιογραφία παρουσιάζει αποκλίσεις στα εύρη της θερμικής αντίστασης, με αυτές του τσιμέντου να είναι γύρω στο 0.1 με 0.2 για κάθε ίντσα ενώ για την ασβεστοκάνναβη κυμαίνεται μεταξύ 1.7 με 4.8 ([1], [2], [3], Stanwix & Sparrow, 2014).

Στόχος είναι να δημιουργήσουμε βιο-υλικά τα οποία είναι μη εύφλεκτα, με την απόδοση της αντοχής στη φωτιά να βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου όσο τα μοντέλα μας βελτιώνονται σε γεωμετρία, αναλογία υλικών και συνολικής απόδοσης.

Για το παρόν πείραμα έγινε χρήση του φλογίστρου Cooks Torch Pro-Grip CT-770 Turbo Flame 1300°C σε τουλάχιστα δύο δοκίμια από κάθε πλέξη.



Εικ. 39: Φλόγιστρο Cooks Torch

# Κεφάλαιο 3.

## Αποτελέσματα και Συζήτηση

### 3.1 Δισδιάστατες δοκιμές

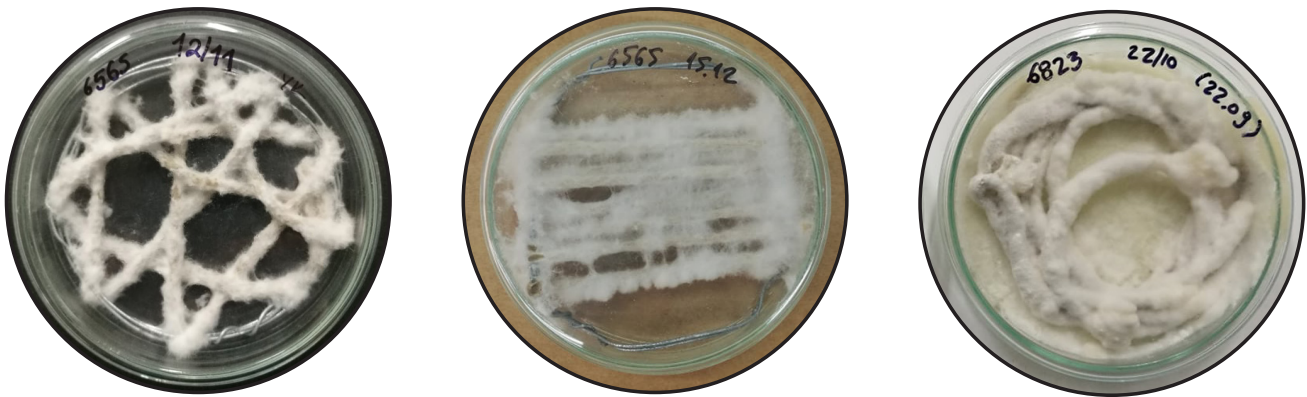
#### 3.1.1 Δοκιμή 1

Ο χρόνος ανάπτυξης διέφερε ανάλογα με το είδος του μύκητα που χρησιμοποιήθηκε με ένα εύρος ανάπτυξης μεταξύ 4 ημερών (για τα στελέχη με γρήγορη μυκηλιακή ανάπτυξη) και 8 ημερών (για τα στελέχη με πιο αργή ανάπτυξη).

Η επιφάνεια κάλυψης διέφερε με κάποιους μύκητες όπως ο *Pleurotus ostreatus*, ο *Lenzites betulina*, ο *Trametes rubescens* και ο *Cerrena unicolor* να αναπτύσσονται ομοιόμορφα και με πλούσιο βαμβακώδες μυκήλιο πάνω στις ίνες κάνναβης (Εικ. 40).

Στις περιπτώσεις που η διαμόρφωση των ινών μέσα στα γυάλινα τρυβλία άφηναν κενά, αυτά, παρατηρήθηκε ότι καλύπτονταν - ως ένα βαθμό - από τα μυκήλια των ανωτέρω στελεχών.

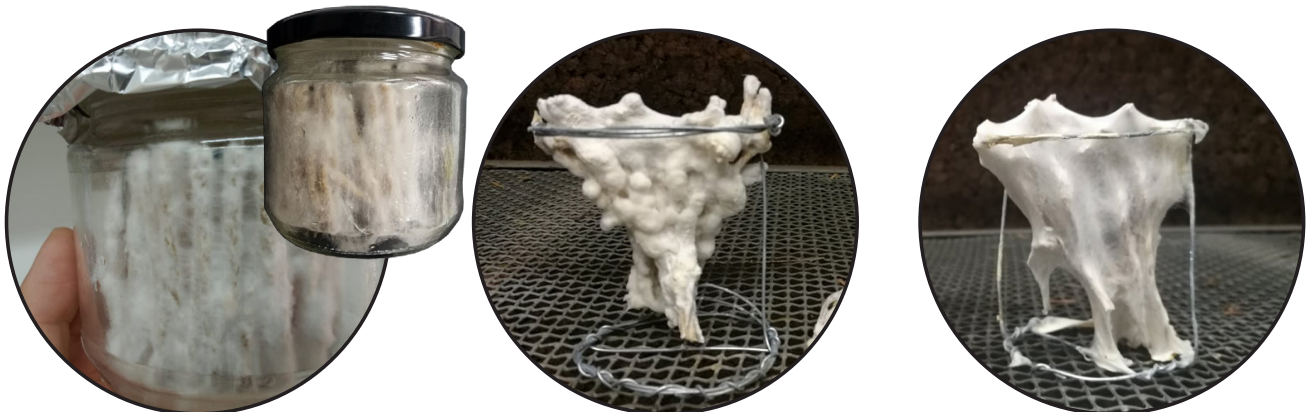
Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε ανοξειδωτο σύρμα, δε φαίνεται να επηρεάστηκε η ανάπτυξη του μυκηλίου.



**Εικ. 40:** Τοποθέτηση ινών κλωστικής κάνναβης σε γυάλινα τρυβλία και ανάπτυξη μυκηλίου των μυκήτων (α) *Cerrena unicolor* (ATHUM 6565), (β) *Cerrena unicolor* (ATHUM 6565), (γ) *Lenzites betulina* (ATHUM 6823)

#### 3.1.2 Δοκιμή 2

Οι συρμάτινες κατασκευές αφέθηκαν να επωαστούν μέσα στα γυάλινα βάζα και αφαιρέθηκαν μόνο για το στάδιο της αποξήρανσης. Και εδώ δοκιμάστηκαν τόσο τυχαίες διαμορφώσεις των ινών κλωστικής κάνναβης (Εικ. 41 (β), (γ)) όσο και σε παράλληλη τοποθέτηση - πλέξη ανάμεσα στις δύο πλευρές του σύρματος (Εικ. 41 (α)). Και εδώ παρατηρήθηκαν τα ίδια με τη δοκιμή 1 (παραπάνω).



**Εικ. 41:** Τοποθέτηση ινών κλωστικής κάνναβης σε γυάλινα βάζα και ανάπτυξη μυκηλίου των μυκήτων (α) *Cerrena unicolor* (ATHUM 6565) - παράλληλη διάταξη, (β) *Lenzites betulina* (ATHUM 6823) και (γ) *Pleurotus ostreatus* (ATHUM 5696) - τυχαία διάταξη



## 3.2 Τρισδιάστατες δοκιμές

### 3.2.1 Δοκιμή 1

Ο εμβολιασμός (με υγρή καλλιέργεια) του δοκιμίου αυτού παρουσίασε μεγαλύτερη δυσκολία λόγω της διάστασης και της επιφάνειας που έπρεπε να δεχθεί εμβόλιο έτσι ώστε να αναπτυχθεί σε ρυθμούς ανάλογους με αυτούς των προηγούμενων πειραμάτων. Το μυκήλιο κάλυψε μικρά σε μέγεθος κενά μεταξύ των ινών ενώ συνολικά η κατασκευή παρουσίασε κάποια δυσκαμψία αλλά περιορισμένη μιας και δεν υπάρχει υλικό που να την υποστηρίζει εσωτερικά.

Το δοκίμιο μετά από έξι μέρες επωασμού του μυκηλιακού στελέχους μεταφέρθηκε στο ξηραντήριο και δεν έχει παρατηρηθεί έκτοτε κάποια αλλοίωση της εικόνας του (με το πέρασ περισσότερου του ενός έτους).



Εικ. 42: Δοκιμή 1

### 3.2.2 Δοκιμή 2

Εδώ χρησιμοποιήθηκε σχοινί από λινάρι το οποίο από προηγούμενα πειράματα είχε εμποτιστεί με κόκκινο κρασί - παράγοντας που δε μελετήθηκε το αν και ποιο ρόλο έπαιξε στη βαμβακώδη υφή και ομοιόμορφη ανάπτυξη του μυκηλίου που κάλυψε το δοκίμιο πλήρως.

Το δοκίμιο αυτό - καθώς η πλέξη ήταν μόνο διαμήκης χωρίς κάποια εγκάρσια τοποθέτηση ίνας αποχωρίστηκε με την πρώτη μετατόπιση παρόλ' αυτά η ανάπτυξη του μυκηλίου μέχρι και σήμερα παραμένει αναλλοίωτη χωρίς να χρειαστεί να προστεθεί κάποιο συντηρητικό (Εικ. 43).



Εικ. 43: Δοκιμή 2

### 3.2.3 Δοκιμή 2 συνέχεια

Ακολουθώντας τις παρατηρήσεις των προηγούμενων πειραμάτων, κατασκευάστηκαν συμπληρωματικά δοκίμια που έφεραν τόσο διαμήκη όσο και - κάποια - εγκάρσια πλέξη για καλύτερη στήριξη καθ' ύψος (Εικ. 44, 45).

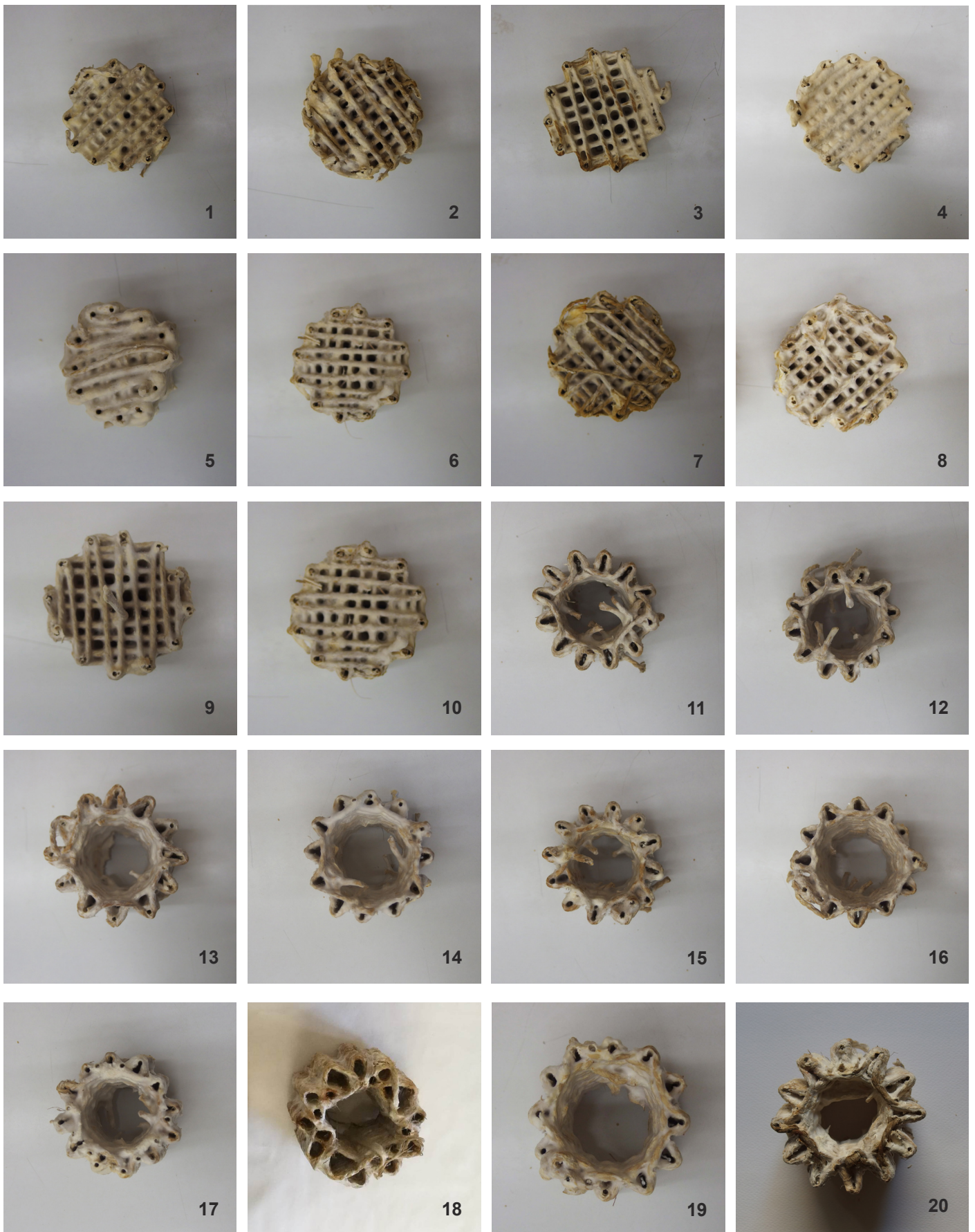


Εικ. 44: Δοκιμή γ - ορθογώνια



Εικ. 45: Διάφορες δοκιμές





Στην εικόνα 46 είναι τα είκοσι πλεκτά δοκίμια τα οποία αναπτύχθηκαν και αξιολογήθηκαν. Πρόκειται για δέκα δομές για κάθε μια από τις δύο διαφορετικές πλέξεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

**Εικ. 46:** Αναπτυγμένες κατασκευές προς μηχανική αξιολόγηση. Ο εμβολιασμός έγινε με δύο στελέχη βασιδιομυκήτων:

*Trametes pubescens* (ATHUM 6570): 2, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19  
*Lenzites betulina* (ATHUM 6823): 1, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 16, 20



**Εικ. 47:** Βιο-σύνθετα συμπαγούς πλέξης τοποθετημένα στο ξηραντήριο για αδρανοποίηση του μύκητα και αποξηραμένα δοκίμια κενής πλέξης λίγο πριν την απομάκρυνση τους από τη βάση.



### 3.4 Δοκιμές Θλίψης

Παρακάτω παραθέτω τα διαγράμματα δύναμης μετατόπισης για τις δύο περιπτώσεις πλέξεων για το σύνολο των δοκιμίων καθώς αυτά παρουσιάζουν διαφορές τις οποίες και θα αναλύσουμε παρακάτω.

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση του ελέγχου συμπίεσης των δοκιμίων, θα ήθελα να αναφέρω πως το μυκήλιο θεωρείται ένα αναδυόμενο βιο-υλικό το οποίο καλύπτει μία ποικιλία υλικών κατηγοριών όσον αφορά τη μηχανική του συμπεριφορά. Έτσι, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, γίνεται μια τοποθέτηση των μυκηλιακών βιοσύνθετων ανάμεσα σε άλλα υλικά με βάση το μέτρο ελαστικότητας τους (Young's modulus, GPa) σε συνάρτηση με την πυκνότητάς τους (Density, Kg/m<sup>3</sup>) (Εικ. 48).

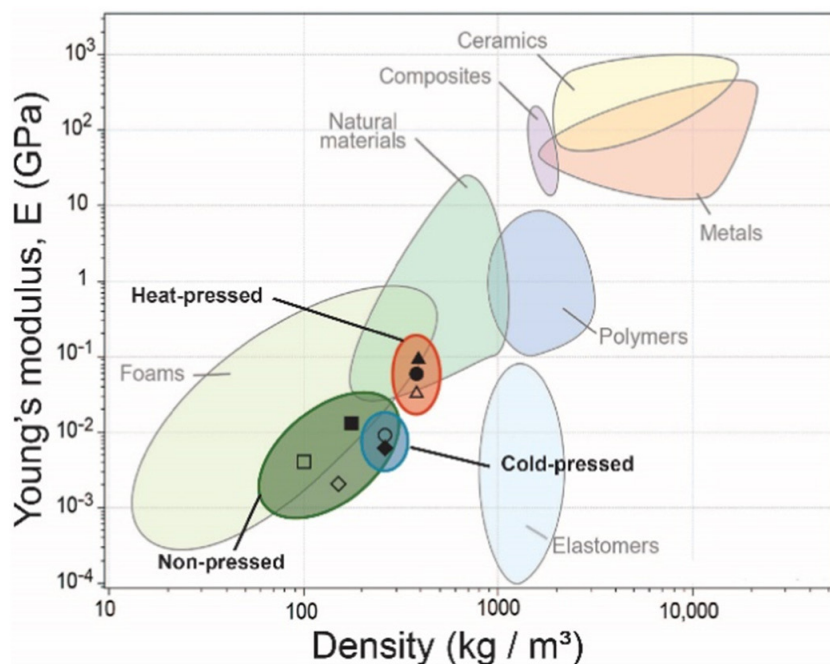
Επανερχόμενη στις δοκιμές θλίψης λοιπόν, και όπως αναφέραμε και προηγουμένως, αξιολογήθηκαν 20 δοκίμια δύο διαφορετικών πλέξεων (10 δοκίμια για κάθε είδος πλέξης) εμβολιασμένα με δύο είδη βασιδιομυκήτων, τον *Trametes pubescens* (ATHUM 6570) και τον *Lenzites betulina* (ATHUM 6823) (Εικ. 49). Τα δοκίμια εμβολιάστηκαν με τα δύο διαφορετικά στελέχη σε διαφορετική αναλογία για το κάθε είδος πλέξης με το ποσοστό των εμβολιασμών συνολικά να είναι ισοδύναμος (τα μισά δοκίμια εμβολιάστηκαν με τον έναν μύκητα και τα άλλα μισά με τον άλλο). Για τα μεν "solid weaved bricks" η αναλογία ήταν 4-6 (*Trametes pubescens* - *Lenzites betulina*) ενώ για τα "vacuum weaved bricks" ήταν 6-4 (*Trametes pubescens* - *Lenzites betulina*). Αυτή η παράμετρος δεν ελήφθη υπόψη κατά την υποβολή των δοκιμίων σε δοκιμές θλίψης.

Στα διαγράμματα οι δύο μεταβλητές είναι η μετατόπιση (Disp.) που μετριέται σε χιλιοστά (mm) και η δύναμη (Force) που μετριέται σε Newton (N). Στο επάνω μέρος του κάθε διαγράμματος υπάρχει ένας πίνακας ο οποίος αναφέρει χαρακτηριστικά τις τιμές που το εκάστοτε δοκίμιο κατάφερε έχοντας ως δεδομένη τη μετατόπιση στα 50 χιλιοστά (το αρχικό ύψος των δοκιμίων ήταν 60 χιλιοστά).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο κέντρο της κυλινδρικής μεταλλικής βάσης αφού πρώτα αφαιρέθηκαν τυχόν κομμάτια εμβολιασμένων ινών που μπορεί να εξείχαν σημαντικά από τα δοκίμια. Έπειτα, το έμβολο ξεκινάει να συμπίεζει το δοκίμιο με σταθερό ρυθμό 0,00651/ δευτερολέπτου προς τα κάτω μέχρις ότου να επιτευχθεί η μετατόπιση που είχαμε ορίσει αρχικά δηλαδή τα 50 χιλιοστά, το 77% περίπου του αρχικού τους ύψους. Τότε, το πείραμα έχει ολοκληρωθεί και το έμβολο απομακρύνεται στην αρχική του θέση.

Ο χρόνος όπως και η συμπεριφορά διαφέρει ανάλογα με το δοκίμιο, αυτό που θέλουμε να δούμε είναι αν οι δύο διαφορετικές πλέξεις επηρέασαν διαφορετικά την παραμόρφωση των δοκιμίων.

Ακολουθεί σχολιασμός για ένα από τα δοκίμια κάθε διαφορετικής πλέξης με τα υπόλοιπα δοκίμια να παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά κατά τη δοκιμή θλίψης. Τα υπόλοιπα διαγράμματα βρίσκονται στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας.



Εικ. 48: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας (Young's modulus (GPa)) - πυκνότητας (density (kg/m<sup>3</sup>)) διαφόρων κατηγοριών υλικών όπου τα σύνθετα υλικά που εντάσσουν φυσικές πρώτες ύλες όπως είναι και τα μυκηλιακά υλικά αντιπροσωπεύονται με τα σχήματα ▲ △ ● (Appels et al., 2019)



**Εικ. 49:** (α, δ, η, ι) Δοκίμια τοποθετημένα στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη της δοκιμής, (β, ε, θ, κ) συμπιεσμένα δοκίμια μετά τη δοκιμή θλίψης, (γ, στ, μ) κούφια δοκίμια με το φαινόμενο του λυγισμού μετά τη συμπίεση, (λ) δοκίμια συσκευασμένα και έτοιμα προς αξιολόγηση. (υ) συμπαγές δοκίμιο προ αξιολόγησης.



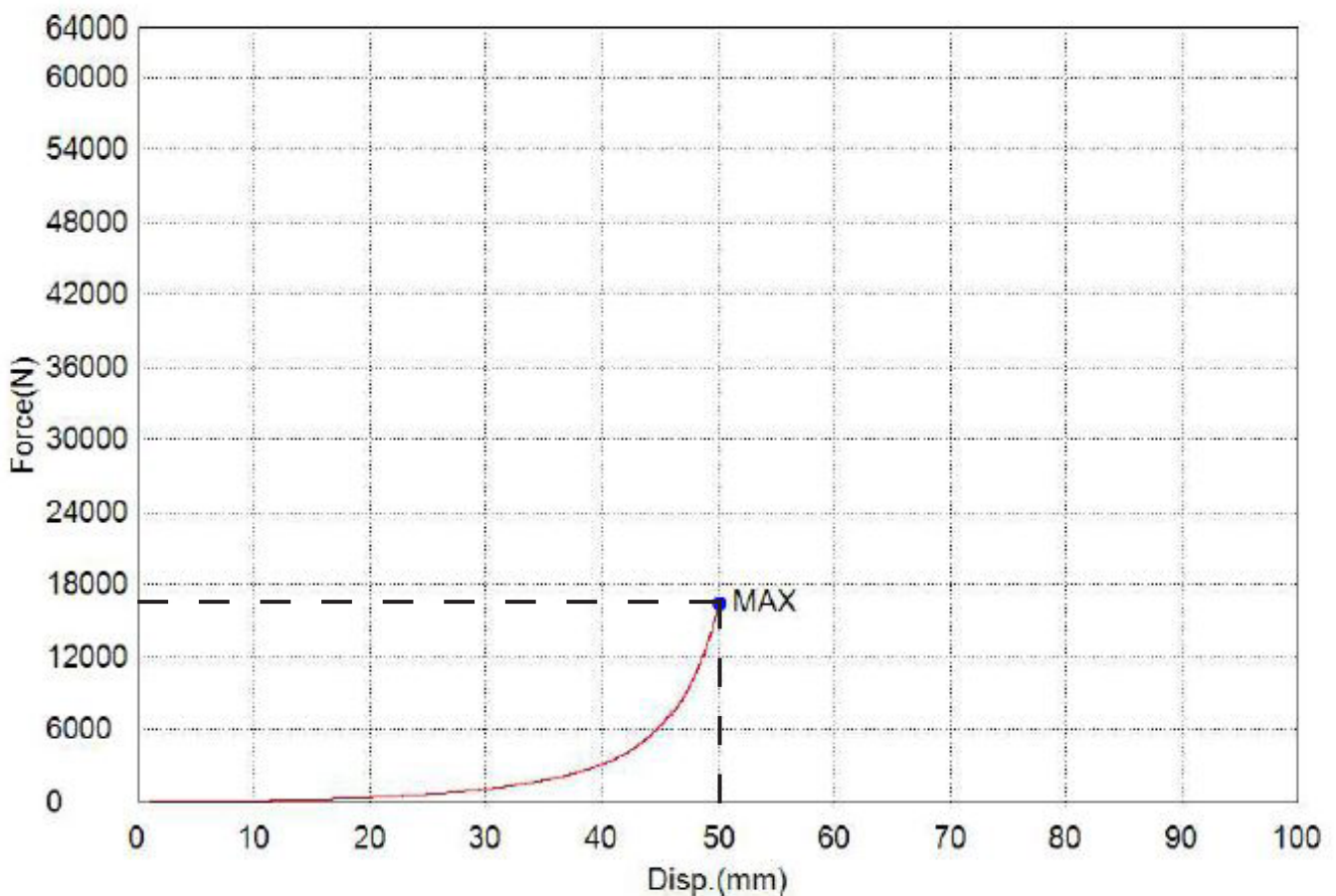
## // ΔΟΚΙΜΙΟ 1 - ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΠΛΕΞΗ

Το παρόν δοκίμιο εμβολιάστηκε το Νοέμβριο του 2022 με το βασιδιομύκητα *Trametes pubescens* (ATHUM 6570) με τον αριθμό "10" κατά την μηχανική δοκιμή συμπίεσης.

Για τη μετατόπιση που είχαμε ορίσει, η δύναμη του συγκεκριμένου δοκιμίου έφτασε τα 16.5kN περίπου. Στο παρόν διάγραμμα φαίνεται πως η δύναμη  $F$  (N) σε συνάρτηση με τη μετατόπιση Displacement (mm) δεν έχουν γραμμική σχέση. Το διάγραμμα είναι μη γραμμικό καθώς τα μεγέθη δεν αυξάνονται ανάλογα. Η συμπεριφορά του δικτυώματος (Disp.) είναι υπεργραμμική ή υπερελαστική (hyperelastic) και όχι γραμμικά ελαστική (ανακτιήσιμη) καθώς τόσο τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί (ίνες κλωστικής κάνναβης, μυκήλιο) όσο και η γεωμετρική σύνδεση μεταξύ τους μέσω της πλέξης αποκρίνονται στην πολύ μεγάλη παραμόρφωση που έχουμε ορίσει με ελαστική απόκριση δηλαδή, επανέρχεται (το σύνθετο υλικό), ως ένα βαθμό, στην πρότερη της συμπίεσης κατάσταση αλλά με χρονική καθυστέρηση. Χαρακτηριστικό υπερελαστικό υλικό είναι το καουτσούκ και άλλα ελαστομερή.

Αν θεωρήσουμε το αναπτυκτό βιοσύνθετο ως ένα ενιαίο διαμορφωμένο μυκήλιο (όπως αναφέραμε προηγουμένως) τότε αυτό εμφανίζει μία ανομοιομορφία τόσο ως προς το υπόστρωμα (φυτικές ίνες), το συνδετικό βιο-υλικό (μυκήλιο) αλλά και προς τη μεταξύ τους σχέση (πλέξη) τα οποία στο σύνολο τους εμποδίζουν την αργή (ελαστική συμπεριφορά) επαναφορά του δοκιμίου στο αρχικό του ύψος (ιξώδης συμπεριφορά). Μπορεί να έχουμε χαρακτηρίσει το παρόν δοκίμιο ως δοκίμιο "συμπαγούς πλέξης" όμως αυτό δε σημαίνει πως μιλάμε για "συμπαγές μυκήλιο" το οποίο θα εμφανίσει διαφορετική μηχανική συμπεριφορά.

Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm <sup>2</sup>	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm	Max_Stroke Strain Calc. at Entire Areas %
1_1	16361,7	2,55651	50,0144	76,9453





Το επόμενο δοκίμιο είναι αντιπροσωπευτικό των επόμενων δέκα δοκιμίων και αποτελεί μια διαφορετική γεωμετρία που αφήνει ένα κενό εσωτερικά του όγκου, καθιστώντας το διάτρητο. Χρησιμοποιήθηκε περίπου 15% λιγότερο υλικό σε σχέση με τα προηγούμενα δέκα συμπαγή τούβλα (περίπου 12 μέτρα σχοινί σε σχέση με τα 14 μέτρα των δοκιμίων συμπαγούς πλέξης).

Εδώ παρατηρείται ένα φαινόμενο το οποίο δε συναντήσαμε προηγουμένως, αυτό του λυγισμού (buckling). Λυγισμός ως δομική αστοχία είναι η απώλεια σταθερότητας (εμφανίζεται ως κάμψη του μηχανικού συστήματος) που συμβαίνει όταν το εφαρμοσμένο φορτίο θλίψης φτάνει μία συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή που οδηγεί σε αλλαγή του σχήματος του δοκιμίου. Στο σημείο αυτό (σημείο αστοχίας ή κρίσιμο σημείο λυγισμού,  $P_{cr}$ ), το θλιπτικό φορτίο είναι μεγαλύτερο από αυτό που αντέχει το δοκίμιο σε απλή θλίψη.

## // ΔΟΚΙΜΙΟ 2 - ΚΕΝΗ ΠΛΕΞΗ

Το παρόν δοκίμιο εμβολιάστηκε το Δεκέμβριο του 2022 με το βασιδιομύκητα *Trametes pubescens* (ATHUM 6570) με τον αριθμό "11" κατά την μηχανική δοκιμή συμπίεσης.

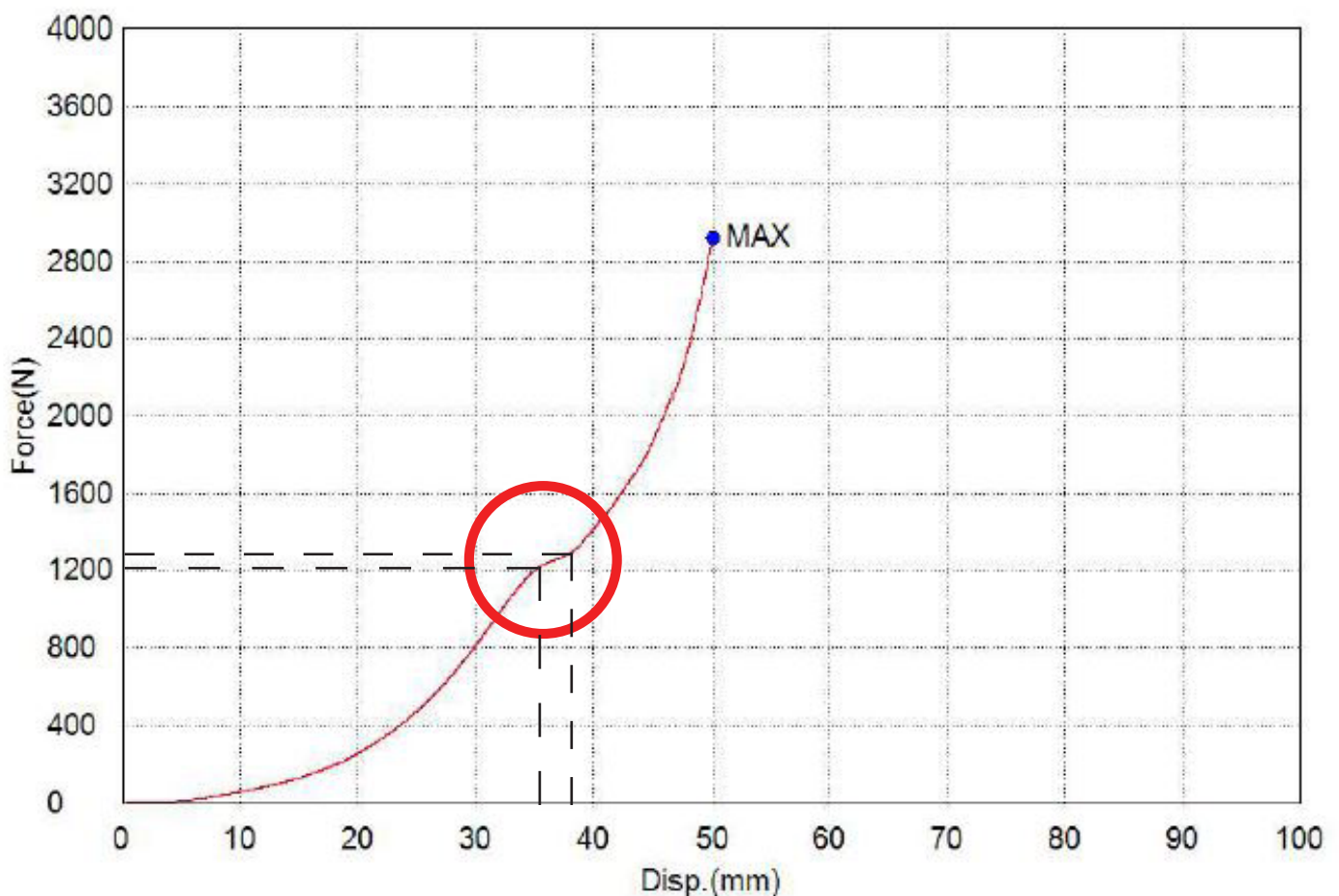
Μια ανάλογη με το συμπαγές δοκίμιο υπερελαστική συμπεριφορά συναντάμε και στο δοκίμιο κενής πλέξης του οποίου η δύναμη έφτασε περίπου τα 1200N με τη μετατόπιση να έχει φτάσει τα 36 χιλιοστά του αρχικού ύψους. Μετά από αυτό το σημείο κάμψης το δοκίμιο συνεχίζει να καταρρέει χάνοντας την ευστάθειά του. Λόγω των νεύρων που φέρει η συγκεκριμένη γεωμετρία, ο λυγισμός (περιοχή εντός του κύκλου), το σημείο δηλαδή που πλέον δε μπορεί το δοκίμιο να αντισταθεί στην τάση που εφαρμόζουμε, εμφανίζεται ως επάλληλη παραμόρφωση (εικόνα δεξιά).

Ουσιαστικά, λυγισμός εμφανίζεται καθώς η πλέξη του δοκιμίου δεν του επιτρέπει να απορροφήσει την υψηλή θλιπτική τάση που του εφαρμόζουμε με αποτέλεσμα την πλάγια εκτροπή του παρόμοια με αυτή που προκαλείται στις δοκούς.

Εδώ το δοκίμιο έφτασε στη μέγιστη παραμόρφωση στα 2900N περίπου, πολύ χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του δοκιμίου συμπαγούς πλέξης καθώς πρόκειται για μια πιο εύκαμπτη δομή.



Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm <sup>2</sup>	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm	Max_Stroke Strain Calc. at Entire Areas %
1_1	2922,81	0,45669	50,0144	76,9452





## 3.5 Αξιολόγηση διαγραμμάτων

### 3.5.1 Συμπαγής πλέξη (Solid weaved brick)

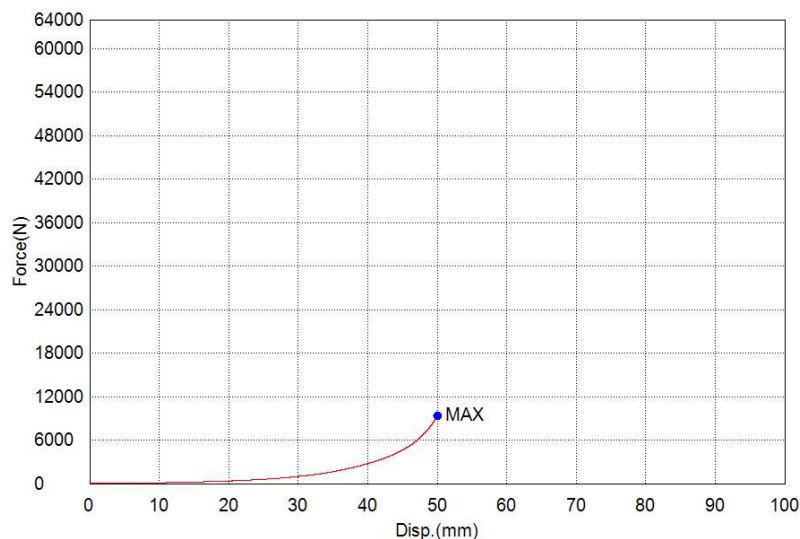
Έχοντας αξιολογήσει ποιοτικά δέκα δοκίμια, συγκεντρώσαμε τα δεδομένα αυτά έτσι ώστε να μπορέσουμε να βγάλουμε ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα τιμών που να περιγράφει τη συμπεριφορά του δοκιμίου με τη συμπαγή πλέξη σε αντοχή σε θλίψη.

Το διπλανό διάγραμμα επιλέχθηκε στο σύνολο των διαγραμμάτων μιας και αποτελεί ένα τυπικό διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης με το μέγιστο δυνατό φορτίο να φτάνει τα 9500N περίπου μέχρι όπου η παραμόρφωση να φτάσει στο ζητούμενο μέγεθος (50 χιλιοστά).

Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως εκθετική συνάρτηση όπου όσο αυξάνονται οι τιμές της παραμέτρου στον άξονα γγ' τόσο αυξάνονται οι τιμές στον οριζόντιο άξονα χχ'.

Το συγκεκριμένο διάγραμμα αναφέρεται σε δοκίμιο που έχει εμβολιαστεί με το μύκητα *Lenzites betulina*.

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm <sup>2</sup>	mm	%
1_1	9303,98	1,45375	50,0144	76,9452



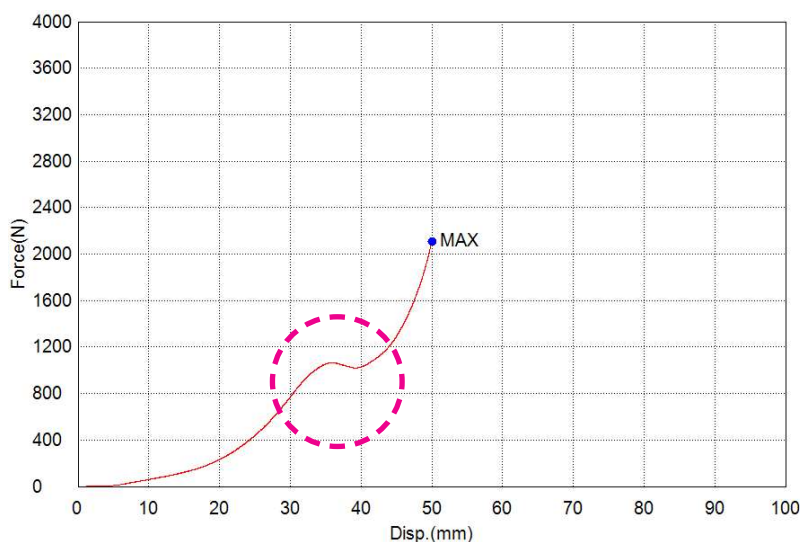
### 3.5.2 Κενή πλέξη (Vacuum weaved brick)

Εδώ τα δοκίμια παρουσίασαν τελείως διαφορετική συμπεριφορά καθώς λόγω της απουσίας υλικού εσωτερικά του δοκιμίου, αυτά υπέστησαν και το φαινόμενο του λυγισμού η οποία φαίνεται στη διπλή καμπύλη κάπου στο μέσο της συνολικής δύναμης που ασκήθηκε.

Το παρόν δοκίμιο (εμβολιασμός με στέλεχος του μύκητα *Lenzites betulina*) δέχτηκε μέγιστο φορτίο στα 2100N περίπου το οποίο δεν ήταν η καλύτερη επίδοση των δοκιμίων με κενή πλέξη. Αποτελεί όμως, όπως και παραπάνω, μία αντιπροσωπευτική γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων της δοκιμής θλίψης.

Το δοκίμιο υπέστη μία σταθερή δύναμη παραμόρφωσης με φορτίο μέσης τιμής τα 1000N περίπου όπου άρχισε να χάνει τη σταθερότητα του με αποτέλεσμα τα νεύρα που βρίσκονται εξωτερικά του δοκιμίου να καμπυλώσουν με μία συγκεκριμένη διεύθυνση και τότε πλέον, όταν η παραμόρφωση άγγιξε τα 40 χιλιοστά, το δοκίμιο συνέχισε να σκεβρώνει με ταχύτερο ρυθμό.

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm <sup>2</sup>	mm	%
1_1	2111,79	0,32997	50,0144	76,9452



Δοκίμια	Αρχικό Ύψος (σε χιλιοστά)	Ύψος ακριβώς μετά τη δοκιμή (σε χιλιοστά)	Ύψος μετά από 6 μήνες	Παρατήρηση
1	60	25	35	<p>Τα ύψη μπορεί να εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ 59-64 χιλιοστά.</p> <p>Οι διαφορές στα ενδιάμεσα ύψη (τα ύψη ακριβώς μετά τη δοκιμή) διαφέρουν επίσης και είναι αποτέλεσμα ποικίλων παραγόντων. Τα δοκίμια είναι φτιαγμένα στο χέρι οπότε η πλέξη δεν είναι ποτέ ακριβώς η ίδια, η υγρή καλλιέργεια δεν ήταν πάντα το ίδιο "φρέσκια", οι σακούλες επωασμού αφήνουν ένα ποσοστό οξυγόνου να εισέρχεται που μπορεί να διαφέρει.</p>
2	60	21	32	
3	60	33.5	40	
4	60	40	45 (πολύ αέραιη εμφάνιση)	
5	60	37	38	
6	60	33	δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο καύσης	
7	60	36	45	
8	60	35	δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο καύσης	
9	60	30	50	
10	60	33	40	
11	60	39.2	45	<p>Και εδώ υπήρχαν μικρές διαφοροποιήσεις στα ύψη κατά την πλέξη των βιο-δομών.</p> <p>Οι δομές αυτού του είδους πλέξης εμφανίζουν όπως αναφέραμε ήδη και το φαινόμενο του λυγισμού καθώς δεν υπάρχει εσωτερικό υλικό ώστε να κατανεμηθούν ομοιόμορφα οι δυνάμεις κατά τη δοκιμή θλίψης.</p>
12	60	38.3	54	
13	60	40	50	
14	60	46.2	52	
15	60	40	45	
16	60	42.5	45	
17	60	45	48	
18	60	30	32	
19	60	35	45	
20	60	35	43	

**Πίνακας 3:** Παραμόρφωση (ύψος ακριβώς μετά τη δοκιμή) και επαναφορά (ύψος μετά από 6 μήνες) βιο-δομών λόγω θλιπτικής τάσης

### 3.6 Δοκιμή αποδόμησης σε φυσικές και ημι-ελεγχόμενες συνθήκες

Μία ακόμη παράμετρος που θέλαμε να εξετάσουμε ήταν η αποικοδόμηση σε φυσικό περιβάλλον και σε ημι-ελεγχόμενες συνθήκες. Για τη διάσπαση σε φυσικό περιβάλλον αναπτύχθηκαν 2 μικρά δοκίμια ενώ για διάσπαση σε ημι-ελεγχόμενες συνθήκες αναπτύχθηκαν 3. Οι δύο δοκιμές φυσικού εδάφους των βιοσύνθετων υλικών διεξήχθη για διαφορετικό αριθμό ημερών όπως φαίνεται παρακάτω. Η μέθοδος δοκιμής κομποστοποίησης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βαθμού και του ρυθμού αερόβιας βιοαποικοδόμησης των βιο-σύνθετων πολυμερών της παρούσας μελέτης που εκτίθενται σε ελεγχόμενο περιβάλλον κομποστοποίησης.

#### 3.6.1 Αποδόμηση σε φυσικό περιβάλλον

##### Συχνότητα ελέγχου:

- αρχική τοποθέτηση: 15 Φεβρουαρίου 2023
- ενδιάμεσος έλεγχος: 19 Απριλίου 2023
- αφαίρεση δοκιμίων: 22 Σεπτεμβρίου 2023

##### Συνθήκες αποδόμησης:

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στις 15 Φεβρουαρίου 2023 σε περιοχή με πεύκα ( $37^{\circ}57'58.1''\text{N}$   $23^{\circ}47'12.8''\text{E}$ ) (Εικ. 50) πλησίον του εργαστηρίου χωρίς καμία παρεμβολή στη διαδικασία αποδόμησης. Η περιοχή έχει αρκετή υγρασία τους φθινοπωρινούς μήνες παρόλ' αυτά, στον έλεγχο που έγινε φάνηκε πως δεν είχε επηρεαστεί σχεδόν καθόλου ούτε το βάρος ούτε η εμφάνιση τους (Εικ.51 a,b).



Εικ. 50: Θέση ταφής δοκιμίων κατά τη δοκιμή αποικοδόμησης σε φυσικές συνθήκες



Εικ. 51: a,b: Δοκίμια σε αποσύνθεση κατά τον ενδιάμεσο έλεγχο.  
c,d: Δοκίμια κατά την αφαίρεση τους από το χώμα μετά το πέρας των 7 μηνών.



### 3.6.2 Αποδόμηση σε ημι-ελεγχόμενες συνθήκες

#### Συχνότητα ελέγχου:

- αρχική τοποθέτηση: 27 Δεκεμβρίου 2022
- ενδιάμεσος έλεγχος: μέσα Μαρτίου 2023
- αφαίρεση δοκιμίων: 17 Ιουνίου 2023

Οι φωτογραφίες (α', β', γ') παρουσιάζουν τα τρία δοκίμια μετά την αφαίρεση τους από το χώμα.

Τα δοκίμια ήταν ευδιάλυτα, διαλύονταν στο χέρι χωρίς να έχουν εμφανίσει κανένα σημάδι επιμόλυνσης, ενώ το σχήμα τους είχε παραμείνει ακέραιο (Εικ. 52).

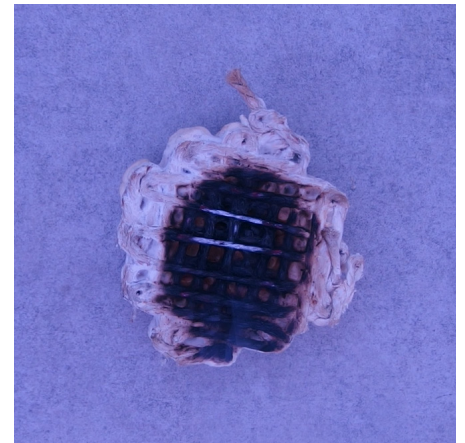
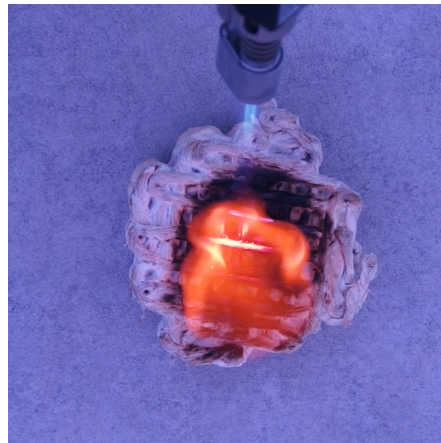
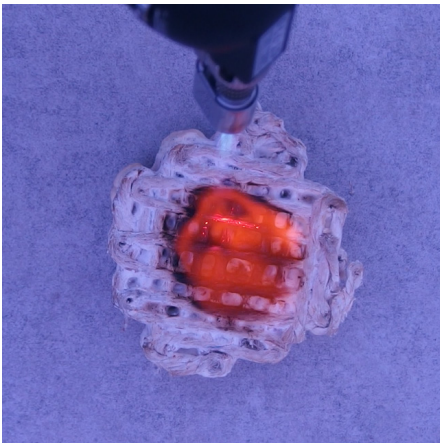
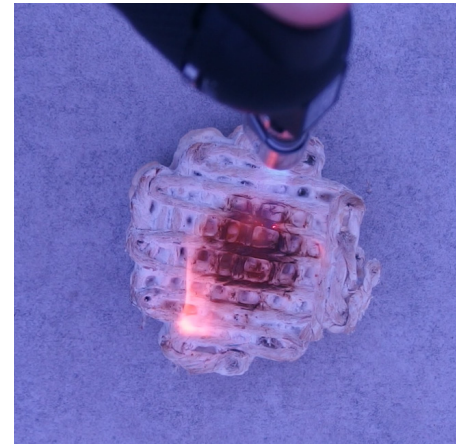
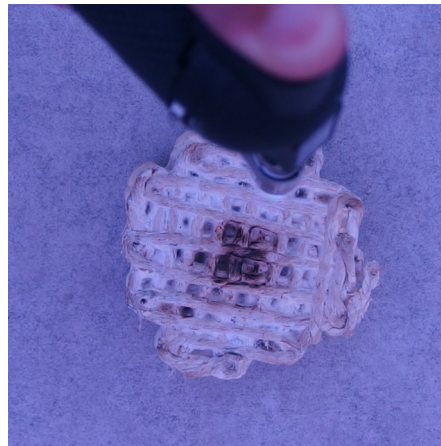
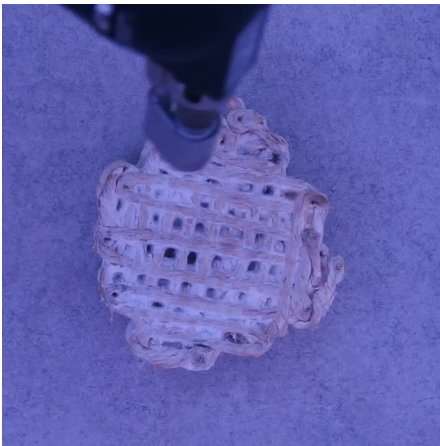


Εικ. 52: Δοκίμια μετά την αφαίρεση τους από το χώμα

### 3.7 Δοκιμή αντοχής σε καύση

Η μία πλευρά του δοκιμίου εκτέθηκε στη φωτιά και αντιστάθηκε για 90 δευτερόλεπτα όσον αφορά τη συνολική ακεραιότητα, τη θερμομόνωση και την ποιότητα καύσης και δεν εμφανίστηκε ανάφλεξη. Η κάτω πλευρά του δοκιμίου ήταν ελαφρώς θερμή ενώ η μυρωδιά ταυτίζονταν με αυτή ενός καμμένου φυσικού υλικού.

Καθώς το δοκίμιο δεν είναι τελείως συμπαγές εμφανίζοντας κάποια κενά, η φωτιά επικεντρώνεται στα σημεία που συναντάει πρώτα κατά την εξ'αποστάσεως επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου.



# Κεφάλαιο 4.

## Συμπεράσματα και προοπτικές

### 4.1 Συμπεράσματα υλικών & μεθόδων

#### 4.1.1 Γενικά συμπεράσματα

Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας η μελέτη γύρω από αναπτυσσόμενα δομικά blocks με βάση το μυκήλιο επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και πρωτοτυποποίηση μιας σύνθετης αρχιτεκτονικής που επιτρέπει την αποτελεσματική εξερεύνηση της τρίτης διάστασης από το βιο-σύνθετο υλικό της κάνναβης. Τα grown blocks εμφανίζουν κάποιο βαθμό ελαστικής παραμόρφωσης που σε πολλές περιπτώσεις παρέμεινε και έτσι μιλάμε για πλαστική - μη αναστρέψιμη - παραμόρφωση η οποία οφείλεται στην ευκαμψία της πολυμερικής δομής λόγω τόσο των επιμέρους υλικών όσο και της τεχνικής πλέξης.

Μέσα από τις διάφορες φάσεις διερεύνησης της κατάλληλης υποστηρικτικής δομής, έγινε μια προσπάθεια βελτιστοποίησης των αρχικών δοκιμών μέσω της καλύτερης αξιοποίησης των υλικών πρωτοτυποποίησης με τη βοήθεια σχεδιαστικού λογισμικού, της εξέλιξης της μεθόδου πλέξης των ινών κάνναβης στο ικρίωμα και τέλος της μεγέθυνσης του πολυμερικού σύνθετου με την ενσωμάτωση περισσότερου υλικού (ίνες κλωστικής κάνναβης) και μεγαλύτερης ποσότητας εμβολιασμένου υγρού θρεπτικού μέσου για ταχύτερη ανάπτυξη.

Κάποιες γενικές παρατηρήσεις που προέκυψαν είναι πως:

- Γ Οι κατασκευές εμφανίζουν τη μέγιστη ανάπτυξη τους στις 6-7 μέρες, με το πέρας αυτών η ανάπτυξη ακολουθεί μία καθοδική πορεία ανάπτυξης με το μυκήλιο να χάνει τον όγκο του.
- Γ Δεν χρειάζεται η προσθήκη νερού κατά την ανάπτυξη του μυκηλίου στις δομές, καθώς φαίνεται πως τόσο η αρχική διάβρωση με αποσταγμένο νερό του δίνει την απαραίτητη υγρασία.
- Γ Το φως δεν φάνηκε να επηρεάζει την ανάπτυξη της καλλιέργειας.
- Γ Για τις δοκιμές 1-2-4 χρησιμοποιήθηκαν γαλβανιζέ ντίζες όπως και παξιμάδια τα οποία μετά από επαναλαμβανόμενες διαβρώσεις και αποστειρώσεις οξειδώθηκαν και εμφάνισαν σκουριά. Η εμφάνιση σκουριάς επηρέασε τοπικά την ανάπτυξη του μυκηλίου με το τελευταίο να μην καταλαμβάνει ομοιόμορφα και επαρκώς τις ίνες στις κατασκευές.
- Γ Το κολλώδες θρεπτικό μέσο μετά την πρώτη αποστείρωση στο αυτόκαυστο πολυμερίστηκε με αποτέλεσμα να μη μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη του μύκητα.

Επίσης, όσον αφορά την επιλογή στελεχών προς εμβολιασμό των δοκιμών, η διάκριση ανάμεσα στο σύνολο των στελεχών τα οποία μελετήσαμε αρχικά βασίστηκε στο γεγονός πως τόσο ο *Trametes rubescens* (ATHUM 6570) όσο και ο *Lenzites betulina* (ATHUM 6823), αποτελούν στελέχη με γρήγορη και αρκετά ικανοποιητική ανάπτυξη στις δομές από φυτικές ίνες. Ακόμη, είναι μύκητες που δεν εμφανίζονται στη βιβλιογραφία να έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες περιπτώσεις έρευνας υλικών οπότε και θεωρήθηκε σκόπιμο να αποτιμηθεί η αποτελεσματικότητα και η ικανότητα επαρκούς κάλυψης των ινών.

#### 4.1.2 Σύγκριση & επιλογή φυτικής ίνας

Οι δύο ίνες παρουσιάζουν παρόμοιες μηχανικές και αρχιτεκτονικές ιδιότητες όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, παρόλ'αυτά, σε γενική ομολογία η βιομηχανική κάνναβη είναι λιγότερο συμφέρουσα οικονομικά. Η βιβλιογραφία αναφέρει - αν και δεν έχουμε δεδομένα για τη χώρα μας - πως η τιμή ανά τόνο για τη γιούτα είναι κατά μέσο όρο στα 950 δολάρια ενώ για τη βιομηχανική κάνναβη στα 1550 δολάρια Αμερικής (Peças *et al.*, 2018).

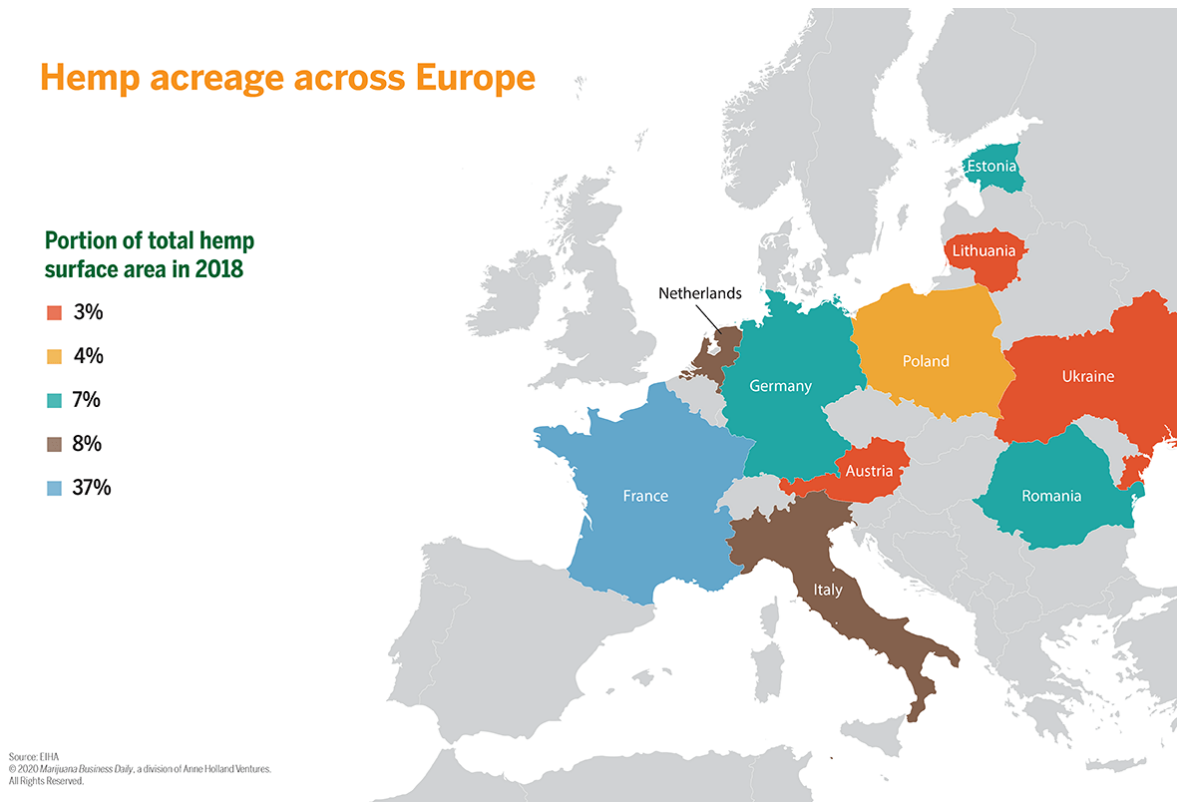
Φυσικά, δεν είναι οι μόνες φυσικές ίνες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με άλλες όπως οι ίνες μπαμπού ή/και ανανά να εμφανίζουν πολύ (πιο) ικανοποιητικές αποδόσεις σε όρους μηχανικής συμπεριφοράς σε χαμηλό κόστος. Η επιλογή όμως, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, της πιο κατάλληλης φυσικής ίνας είναι αποτέλεσμα μίας σειράς κριτηρίων όπως (Peças *et al.*, 2018):

1. Κλίμα: Η γιούτα ευδοκίμει σε τροπικά κλίματα ενώ η κλωστική κάνναβη φύεται και σε μεσογειακά εύκρατα κλίματα όπως αυτό που απαντάται στα ελληνικά εδάφη (ενδεικτικά, κλωστική κάνναβη καλλιεργείται εκτός από περιοχές της Ελλάδας όπως η Λάρισα, ο Βόλος και η Κόρινθος σε πολλές μεσογειακές πόλεις όπως η Γαλλία, η Λιθουανία, η Εσθονία, η Ιταλία και αρκετές άλλες όπως φαίνεται και στην Εικ. 50);



2. Κόστος (αναφέραμε ενδεικτικά παραπάνω);
3. Περιεκτικότητα σε λιγνίνη: Η γιούτα περιέχει περίπου 12-13% λιγνίνη και 61-72% κυτταρίνη, ενώ στη βιομηχανική κάνναβη τα ποσοστά κυμαίνονται στο 3.5-5.7% λιγνίνη και 70-74% κυτταρίνη (Corrales et al., 2007). Από τα πειράματα φάνηκε πως οι τα στελέχη των μυκήτων με τα οποία εξετάσαμε τα δοκίμια μας μπορούν να αποικίσουν πολύ ευκολότερα την κλωστική κάνναβη από τη γιούτα.
4. Καλλιεργήσιμο δυναμικό στη χώρα μας: η Ελλάδα έχει το νομοθετικό και θεσμικό πλαίσιο για καλλιέργεια βιομηχανικής κάνναβης (*Cannabis sativa* L) όπως βλέπουμε και από τα στοιχεία στην εικόνα 53. Είναι πολλά τα παραδείγματα πρωτοβουλιών που καλλιεργούν το εν λόγω φυτό με σκοπό την παραγωγή ποιοτικών και καινοτόμων προϊόντων αλλά και την ανάπτυξη της ελληνικής βιοτεχνίας/βιομηχανίας κλωστικής κάνναβης (όπως η περίπτωση της “KannaBio”).

## Hemp acreage across Europe



**Εικ. 53:** Εκτάσεις καλλιέργειας βιομηχανικής κάνναβης στην Ευρώπη (European Industrial Hemp Association (EIHA), by Hemp Industry Daily, 2019)

Από τα στοιχεία που προέρχονται από το Ινστιτούτο Γενετικής Βελτίωσης & Φυτογενετικών Πόρων στη Θεσσαλονίκη βλέπουμε πως υπήρχε μια αξιοσημείωτη αύξηση των εκτάσεων κλωστικής κάνναβης από τα 24 στρέμματα το 2016 στα 295 στρέμματα το 2017 (Εικ. 54).

Δυστυχώς δε βρήκα στοιχεία με νεότερες καλλιεργητικές περιόδους πιθανόν τόσο λόγω της άγνοιας του ισχύοντος θεσμικού περί βιομηχανικής και φαρμακευτικής κάνναβης όσο και της απαξίωσης που δέχεται δυστυχώς η παραγωγή βιομηχανικής κάνναβης στη χώρα.

(Στοιχεία από την ΕΛΓΟ Δήμητρα)



**Εικ. 54:** Εκτάσεις καλλιέργειας βιομηχανικής κάνναβης στην Ελλάδα τα έτη 2016-2017

### 4.1.3 Σχεδιαστικές αδυναμίες & προοπτικές βελτίωσης

Η δημιουργία των τελικών δομών - πλεκτών δομών βασίστηκε στη λογική της ανάπτυξης του βιοσύνθετου υλικού πάνω στις υποστηρικτικές κατασκευές, συμπεριλαμβανομένων των παρακάτω σταδίων με τη σειρά που αναφέρονται: της διάβρεξης με αποσταγμένο νερό, της αποστείρωσης, του εμβολιασμού, της ανάπτυξης σε επωαστικό θάλαμο, της αποξηράνσης και τέλος τη αφαίρεσης των υποστηρικτικών δομών από τις βάσεις/ ικριώματά τους.

Αυτό δημιουργούσε ζητήματα μέγιστης αξιοποίησης των υποστηρικτικών υλικών, πιθανής αλληλεπίδρασης των εμπλεκόμενων υλικών κατά το χρόνο επωασμού των βιο-σύνθετων (όπως ανάπτυξη σκουριάς σε μη ανοξειδωτά μέταλλα και σκέρβρωση του πλέξιγκλας κατά την αποστείρωση των στηρίξεων στο αυτόκαυστο) και τέλος της δυσκολίας αφαίρεσης τους από τις βάσεις μετά το πέρας της (επιτυχούς) ανάπτυξης του μυκηλίου πάνω στις ίνες της κάνναβης. Το πιο σημαντικό όμως ζήτημα ήταν αυτό της αξιολόγησης της πλεκτής δομής ως προς την ικανότητά της να στέκεται αυτούσια ως πυκνό και συμπαγές βιοσύνθετο ακόμα και χωρίς τη δράση του μυκηλίου ως συνδετικό παράγοντα.

Η συνολική διαδικασία ανάπτυξης ενός βιο-όγκου προϋπόθετε - επιπλέον των προηγούμενων βημάτων που έχουμε αναλύσει σε προηγούμενα κεφάλαια - την αποστείρωση και επωασμό του μαζί με την κατασκευή στήριξης καθώς το μοτίβο πλέξης δεν επέτρεπε να στέκεται αυτόνομο. Αυτό δημιουργεί ζητήματα ανάπτυξης μεγαλύτερων βιο-δομών σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα.

Αυτός ήταν ο βασικός λόγος για τον οποίο θέλησα να εξερευνήσω διαφορετικά μοντέλα πλέξεων όπως επίσης και μία βάση στήριξης η οποία θα λειτουργούσε υποστηρικτικά μόνο έως ότου το επίπεδο πλέξης (διαστάσεις) του βιο-σύνθετου πολυμερούς ήταν το επιθυμητό.

Οι φυσικές φυτικές ίνες είναι μία ευέλικτη και οικονομικά βιώσιμη πρώτη ύλη που επιτρέπει μεγάλο βαθμό πειραματισμού και ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Συνδυάστηκαν με μία απλουστευμένη προσαρμογή μιας παραδοσιακής αλλά ταυτόχρονα εξελισσόμενης τεχνολογίας (αυτή της τρισδιάστατης ύφανσης) η οποία βασίζεται στην τεχνική της δισδιάστατης πλέξης όπως την ξέρουμε από τη Νεολιθική εποχή όπου ο βασικός σκοπός οποιουδήποτε αργαλειού ήταν να συγκρατεί τα νήματα του στημονιού υπό τάση για να διευκολύνει την πλέξη των νημάτων του υφαιδιού. Το ακριβές σχήμα του αργαλειού και η μηχανική του μπορεί να διαφέρουν, αλλά η βασική λειτουργία είναι η ίδια. Η διαδικασία της τρισδιάστατης πλέξης βασίζεται στη συνύφανση τριών ορθογώνιων σετ νημάτων τόσο σε σειρά όσο και σε στήλη δημιουργώντας ένα πλήρως πλεγμένο τρισδιάστατο νήμα. Εμείς εφαρμόσαμε μια πολύ διευρυμένη εκδοχή αυτής της διαδικασίας τοποθετώντας νήματα σε οριζόντιο άξονα αυξάνοντας προς τον κάθετο χωρίς να υπάρχει πάντοτε διαπλοκή.

Η έρευνα γύρω από ανεπτυγμένα βιο-υλικά έχει προχωρήσει πολύ τα τελευταία χρόνια ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης ανάγκης για απομάκρυνση από τη ρυπογόνα δομική βιομηχανία και τα υλικά που αυτή χρησιμοποιεί.

“Ζωντανά” υλικά όπως τα βιο-υλικά βασιζόμενα σε μύκητες προσφέρουν πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι των κοινών δομικών κατασκευαστικών όπως το χαμηλό βάρος, η ιδιότητα τους ως βιοδιασπώμενα και φιλικά προς το περιβάλλον σύνθετα υλικά (ανάλογα με το υλικό-μήτρα), οι μειωμένοι ρύποι κατά την παραγωγή, εγκατάσταση και απόρριψη του υλικού, οι ανταγωνιστικές μηχανικές ιδιότητες κ.ά.

Τα blocks που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αξιοποίησαν με μία διευρυμένη έννοια τη μέθοδο της πλέξης (σε τρεις διαστάσεις) σε ίνες κάνναβης (στην πλειοψηφία τους) σε προσχεδιασμένες και προκατασκευασμένες βάσεις-ικριώματα.

Οι βάσεις αυτές εξελίσσονταν καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας με στόχο τη δημιουργία βελτιωμένων εκδοχών των προηγούμενων και σχεδίαση πιο αποτελεσματικών για το σκοπό μας υποστηρίξεων πλέξης.

Κατά την πορεία των διαφορετικών δοκιμών παρουσιάστηκαν κάποιες αδυναμίες τόσο στην ανάπτυξη του μυκηλιακού μύκητα όσο στην πλέξη και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν γενικότερα κατά τη συναρμολόγηση των βάσεων και την παραγωγή των βιο-δομών.

Στην εικόνα 55 (δοκιμή 2) φαίνεται η επιμόλυνση με τον ασκομύκητα *Aspergillus niger* λίγο μετά τον εμβολιασμό με τον *Cerrena unicolor*. Το δοκίμιο καταλύφθηκε εξ' ολοκλήρου με το μύκητα οπότε και αποσύρθηκε μαζί με τη βάση του αφού πρώτα αποστειρώθηκε.

Παρόμοια περίπτωση είναι η εικόνα 56 όπου λίγες μέρες αφότου έγινε ο εμβολιασμός με το μύκητα *Lenzites betulina*, το δοκίμιο εμφάνισε σημάδια επιμόλυνσης πιθανόν με τον ασκομύκητα *Penicillium* οπότε και εδώ το δοκίμιο απομακρύνθηκε αφού αποστειρώθηκε.

Στην εικόνα 59 φαίνεται ένα δοκίμιο το οποίο εμβολιάστηκε και η ανάπτυξη του αρχικά δεν παρουσίασε κάποιο πρόβλημα, στην πορεία όμως φαίνεται ότι ο μύκητας δεν κατάφερε να συγκρατήσει το πλεκτό δοκίμιο το οποίο δε μπορούσε να ληφθεί υπόψη στις μετέπειτα μηχανικές δοκιμές.

Κάποια ακόμη πολύ σημαντική παρατήρηση είναι η εικόνα 58 όπου απεικονίζονται παξιμάδια και ροδέλες (ισχύει και για τις ντίζες από γαλβανιζέ ασάλι) που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις αρχικές δοκιμές τα οποία καθώς δεν ήταν ανοξειδωτά μετά από επαναλαμβανόμενες αποστειρώσεις εμφάνισαν σκουριά, φαινόμενο το οποίο αποτυπωνόταν πάνω στα υπό ανάπτυξη δοκίμια και πιθανόν να επηρέαζε την ανάπτυξη του μυκηλίου πάνω στις ίνες.

Κάποια άλλα προβλήματα που τέθηκαν ήταν στρέβλωση του πλέξιγκλας κατά το στάδιο της αποστείρωσης στο αυτόκαυστο λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η σταθεροποίηση των ντιζών και παξιμαδιών πάνω στα φύλλα του υλικού. Αυτό αντιμετωπίστηκε με μεγαλύτερο πάχος (από τα τρία στα πέντε χιλιοστά) αλλά δεν θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η βέλτιστη λύση.

Κάποια από τα παραπάνω ζητήματα ελήφθησαν υπόψη στα επόμενα στάδια εξέλιξης των δοκιμών τόσο με αλλαγή στην επιλογή υλικών (ανοξειδωτές ντίζες και παξιμάδια, μεγαλύτερο πάχος πλέξιγκλας, μεγαλύτερη διάρκεια αποστείρωσης και πιο προσεκτικός εμβολιασμός προς αποφυγή επιμολύνσεων ή/και αλλαγή μοντέλου πλέξης, μεταξύ άλλων) (Εικ. 57, 60).



**Εικ. 55:** Επιμόλυνση



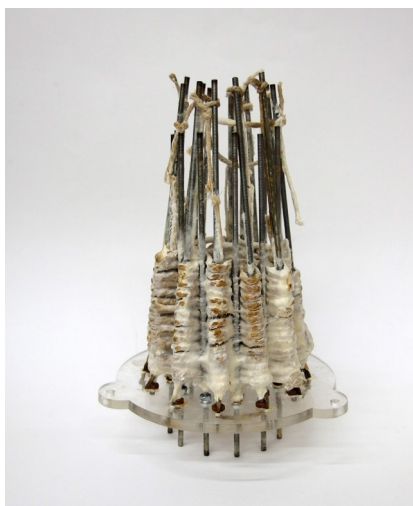
**Εικ. 56:** Επιμόλυνση



**Εικ. 57:** Παραμορφωμένο πλέξιγκλας



**Εικ. 58:** Φαινόμενο σκουριάς



**Εικ. 59:** Αδύναμη ανάπτυξη



**Εικ. 60:** Σύνθετη κατασκευή



## 4.2 Συμπεράσματα κατασκευών και πειραμάτων

### 4.2.1 Γενικά συμπεράσματα

Η έρευνα που διενεργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας εστίασε στη διερεύνηση βιο-σύνθετων υλικών με βάση μυκηλιακούς βασιδιομύκητες και φυσικές ίνες μέσω της τρισδιάστατης εφαρμογής δισδιάστατης πλέξης και άρα θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε τα πολυμερή ως τρισδιάστατες συμπαγείς αρχιτεκτονικές (3d solid architectures) ή πλεκτές βιο-κατασκευασμένες δομές (3d woven bio-engineered structures). Στόχος ήταν να αποκτήσουμε πρακτική κατανόηση του υλικού σε τεχνικό και μηχανικό επίπεδο, με την αξιολόγηση των μηχανικών και μορφολογικών ιδιοτήτων του βιο-υλικού από μυκήλιο ενισχυμένου με φυσικές ίνες.

Οι τρισδιάστατα πλεγμένες δομές ως μία σχεδιαστική παράφραση των τρισδιάστατα πλεγμένων υφασμάτων (3D woven or braided fabrics) μπορούν να παραχθούν με σύνθετες γεωμετρίες οι οποίες μπορούν να μειώσουν το κόστος μειώνοντας τη σπατάλη πρώτων υλών δημιουργώντας εξειδικευμένα (custom) υλικά για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Σχεδιάστηκαν προσαρμοσμένες βάσεις στήριξης οι οποίες όρισαν το μοτίβο της πλέξης οι οποίες και εξελίχθηκαν με βάση τις παρατηρήσεις που κάθε φορά αποκομίζονταν από τις προηγούμενες δοκιμές. Η πλέξη αρχικά περιορίστηκε στον οριζόντιο άξονα με κάθετη ανάπτυξη (χωρίς δηλαδή να υπάρχει κάθετη πλέξη), στη συνέχεια όμως προέκυψαν αρκετοί γεωμετρικοί πειραματισμοί.

Το πρώτο βήμα ήταν η αναγνώριση της συμπεριφοράς των υλικών μέσα από μια σειρά εμβολιασμών με τα στελέχη των βασιδιομυκήτων όπου ακολουθήθηκαν συγκεκριμένα βήματα για να διασφαλίσουμε μία επαρκή ανάπτυξη αποφεύγοντας επιμολύνσεις. Τα πειράματα διαβρέχονταν με αποσταγμένο νερό για κάποια λεπτά, στη συνέχεια τοποθετούνταν σε γυάλινα τρυβλία ή βάζα ανάλογα με το μέγεθος τους (όσον αφορά τις δισδιάστατες πλέξεις), αποστειρώνονταν στο αυτόκαυστο στους 121 °C για 25 λεπτά και αφού επανέρχονταν σε θερμοκρασία δωματίου παραγματοποιούνταν ο εμβολιασμός με τα στελέχη των βασιδιομυκήτων τόσο με στερεές (για τα δισδιάστατα πειράματα) όσο και με υγρές καλλιέργειες (για τα τρισδιάστατα πειράματα).

Οι τελικές κατασκευές χρειάστηκαν περίπου 7 μέρες για να αναπτυχθούν πλήρως με τη διαδικασία που αναφέραμε και την τελική αποξήρανση στο ξηραντήριο για 36 ώρες με στόχο την αδρανοποίηση της ανάπτυξης του μύκητα.

Μέσα από την παρατήρηση του ρυθμού ανάπτυξης, την αποδοτικότητα των πλεκτών σχηματισμών, την ευκολία ανάπτυξης τους και μία σειρά διαφορετικών παραλλαγών πλέξεων, καταλήξαμε σε δύο τις οποίες και χρησιμοποιήσαμε για να αξιολογήσουμε περαιτέρω. Μελετήσαμε την απόδοση και εφαρμοσιμότητα των βιο-δομών (bio-blocks) ως προς τρεις παραμέτρους: τη θλιπτική συμπεριφορά (δοκιμή θλίψης), το ρυθμό βιο-αποικοδόμησης σε φυσικές συνθήκες και σε ελεγχόμενο περιβάλλον και τη συμπεριφορά κατά την καύση.

Καθόλη τη διάρκεια διερεύνησης των βιο-σύνθετων ακολουθήθηκε η τεχνική της σχεδίασης οδηγούμενης από το υλικό (material driven design) σύμφωνα με την οποία οι μηχανικές και τεχνικές ιδιότητες των υλικών (μορφή, λειτουργία, συνολική εμπειρία, κλπ) ορίζουν τους περιορισμούς και τις ελευθερίες κατά τη σχεδίαση, πρωτοτυποποίηση και απόδοση καινοτόμων σύνθετων υλικών.

Κατά τον έλεγχο αντοχής των πολυμερών σε θλίψη, τα συμπαγή blocks επέδειξαν μεγαλύτερη αντίσταση με τη μέγιστη δύναμη τα 42kN (1 δοκίμιο εμβολιασμένο με στέλεχος *Lenzites betulina*) ενώ στα δοκίμια με την κενή πλέξη εμφανίστηκε το φαινόμενο του λυγισμού ως μηχανισμός ασταθούς κατάστασης του βιο-σύνθετου και απώλεια της φέρουσας ικανότητας του.

Τα δοκίμια οδηγήθηκαν σε εκτοπισμό από την ευθύγραμμη θέση ισορροπίας τους αποκτώντας μια νέα ισορροπία με καμπύλο άξονα, όπου όταν το κρίσιμο φορτίο ξεπεραστεί, τότε αυτό καταρρέει, κάτι όμως που θα συνέβαινε αν ασκούσαμε περισσότερη δύναμη στο σύστημα. Όσον αφορά τα δοκίμια της κενής πλέξης, οι νευρώσεις οι οποίες παρουσιάζονται κατά το σχεδιασμό θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ρυθμιστικά αν ισορροπούσαν από μία αντίστοιχη σειρά νευρώσεων στην εσωτερική πλευρά. Η διαπίστωση αυτή δύναται να επαληθευτεί με μελλοντική δοκιμή.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως σύμφωνα με τα κριτήρια της ταξινόμησης, τα βιο-σύνθετα που επιχειρήσαμε να δημιουργήσουμε ανήκουν στα υλικά πλήρωσης (χωρίς φέρουσα ικανότητα), και συνεπώς για να μπορέσουν να εγκατασταθούν με ασφάλεια και αντοχή στο χρόνο (σε ενδεχόμενο σενάριο τοιχοποιίας) απαιτείται ένας σκελετός ο οποίος θα παραλάβει όλα τα κατακόρυφα φορτία, και ο οποίος θα συμπληρωθεί με τα μυκηλιακά βιο-σύνθετα έτσι ώστε να ολοκληρωθεί το κέλυφος (Hirst *et al.*, 2010; Τσιγκόπουλος, 2019).

Η συμπαγής πλέξη παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα δύναμης-παραμόρφωσης καθώς όλο το φορτίο συγκεντρώνεται στο ίδιο το πολυμερές το οποίο δεν έχει παρά μόνο κάποια μικρά κενά. Καθώς πρόκειται για ένα σύνθετο υλικό (σχοινί κάνναβης και μυκήλιο) είναι προτιμότερο να ερμηνεύσουμε τα αποτελέσματα με όρους δυνάμεων και όχι τάσεων. Τα solid blocks αποτελούν τη βάση για την περαιτέρω ανάπτυξη πιο αυτόνομων βιο-σύνθετων μυκηλιακών δομών με αποτελεσματικότερη συνολική απόδοση και εφαρμοσιμότητα.

Η παραμόρφωση των δοκιμών ήταν, στην πλειοψηφία τους, ελαστική, που σημαίνει ότι τα δοκίμια ανέκτησαν ένα μέρος του αρχικού τους ύψους μετά την πάροδο κάποιου χρόνου. Μετρήσεις επαναλήφθηκαν μετά από 6 μήνες όπου το ύψος σε κάποια δεν είχε αυξηθεί αισθητά σε σχέση με την προηγούμενη μέτρηση ενώ σε λίγα υπήρχε μια μικρή αύξηση. Η συστολή και διαστολή των δοκιμών υλικών επέρχεται συνήθως λόγω αλλαγών στη θερμοκρασία με το τσιμέντο να παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά (διαστέλλεται ελαφρώς καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και συστέλλεται καθώς πέφτει η θερμοκρασία).

Η δοκιμή βιο-αποικοδόμησης τόσο σε φυσικές συνθήκες όσο και σε ημι-ελεγχόμενο περιβάλλον έδειξε πως τα δοκίμια μπορούσαν να παραμείνουν ακέραια ακόμα και μετά από ένα σημαντικό χρονικό διάστημα στο υπέδαφος ενώ ταυτόχρονα εμφάνισαν χαρακτήρα βιο-διάσπασης το οποίο και αντανάκλα τις μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης τέτοιων υλικών. Στον έλεγχο αποικοδόμησης σε ημι-ελεγχόμενο περιβάλλον, παρόλο που το δοκίμιο διαβρεχόταν σε τακτά χρονικά διαστήματα, δεν παρατηρήθηκαν σημάδια επιμόλυνσης με μούχλα.

Τέλος, διερευνήθηκε η συμπεριφορά των δοκιμών κατά την καύση με οικιακό φλόγιστρο, με τα αποτελέσματα να δίνουν μια καλή συμπεριφορά του συμπαγούς δοκιμίου σε καύση για 90 δευτερόλεπτα κατά τα οποία το δοκίμιο κάηκε στα πρώτα τρία στρώματα αλλά η θερμότητα δεν πέρασε στα επόμενα. Στόχος είναι να διατηρήσουμε τη φλόγα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και σε δοκίμια μεγαλύτερων διαστάσεων, πιο συμπιεσμένης πλέξης και ολισπικότερης ανάπτυξης μυκηλίου. Τα hempblocks (όπως το hempcrete ή ασβεστοκάνναβη που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο) παρουσιάζουν σημαντικές ηχομονωτικές ιδιότητες τις οποίες μελλοντική έρευνα μπορεί να εξερευνήσει και στην παρούσα περίπτωση ανάπτυξης μυκηλιακών βιο-δομών.

Σίγουρα απαιτείται περαιτέρω έρευνα, ιδιαίτερα για τις επιδράσεις που έχουν διάφοροι παράγοντες (εμβολιασμός με διαφορετικά στελέχη μυκήτων, διαφοροποίηση της αναλογίας ινών κάνναβης και υγρού θρεπτικού, πιθανή ανάγκη σε τελικό φινιρίσμα διαφορετική πλέξη) στην αντοχή σε φωτιά του βιο-σύνθετου δοκιμίου.

Τα μυκηλιακά πλεκτά βιοσύνθετα, αν και - ερευνητικά - βρίσκονται σε πρώιμα στάδια, φαίνεται πως σταδιακά υιοθετούνται και σε μεγάλης κλίμακας μελέτες όπως στο αστικό περιβάλλον και σε διεπιστημονικές συνεργασίες (όπως το πρόγραμμα "FUNGAR"). Η υιοθέτηση φυσικών πρώτων υλών ως των κυριότερων δομικών υλικών αποδεικνύεται χρόνο με το χρόνο μια πραγματοποιήσιμη, υγιής και ενδιαφέρουσα εναλλακτική για ένα βιώσιμο μέλλον.

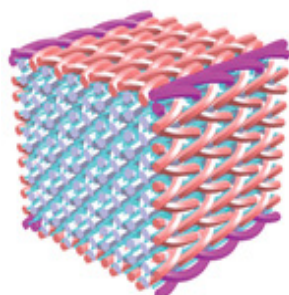
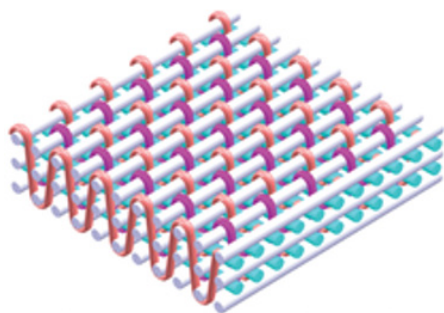
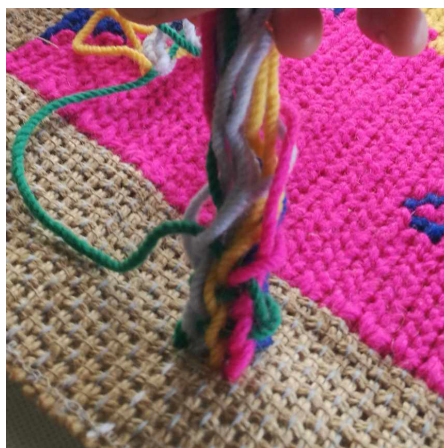
## 4.2.2 Πρόταση για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη

Με αφετηρία τα παραπάνω συμπεράσματα, έγινε μια αρχική προσπάθεια εξέλιξης των σχεδιαστικών προτάσεων που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας μέσω μιας εναλλακτικής λύσης που τείνει να προσεγγίσει το ερευνητικό θέμα πιο ολιστικά και αποτελεί υλικό για μετέπειτα μελέτη του συγκεκριμένου αντικειμένου έρευνας.

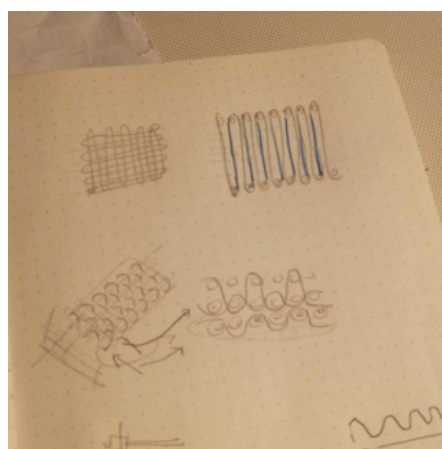
Έμπνευση τόσο σε αυτό το στάδιο όσο και σε μελλοντική έρευνα θα αποτελέσουν και τα solid knitting blocks του Yuichi Hirose ως προς την ενιαία πλέξη των δομών σε τρεις διαστάσεις οι οποίες ήταν απόλυτα συυφασμένες.

Ο στόχος είναι να σχεδιαστεί και αναπτυχθεί μία βάση πλέξης που θα προσφέρει καλύτερο έλεγχο του βιο-σύνθετου στο σύνολο του, μεγαλύτερα μεγέθη βιο-δομών και πιο αποτελεσματική πλέξη.

Παρακάτω παραθέτονται κάποιες πρώτες προσεγγίσεις, άλλοτε στο χαρτί και άλλοτε με υλικά που βρέθηκαν διαθέσιμα.



(Dong et al., 2022)





## Επίλογος

Με την επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής και της περιβαλλοντικής ρύπανσης να ασκούν αυξανόμενη πίεση στα οικοσυστήματά μας, η υιοθέτηση μεθόδων για την αντιμετώπιση της υποβάθμισής του τελευταίου κρίνεται πιο επείγουσα από ποτέ.

Τα σύνθετα βιοϋλικά (composite biomaterials) αποτελούν πλέον μία πολλά υποσχόμενη και πολύ ευέλικτη εναλλακτική λύση ιδίως όταν συνδυάζονται με φυσικές ίνες σε καίρια ζητήματα που σχετίζονται με εξάντληση φυσικών πόρων, ρυπογόνο κατασκευαστικό κλάδο, ραγδαία αύξηση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ενεργειακή κρίση, υποβάθμιση φυσικών ενδιαιτημάτων, ακραία καιρικά φαινόμενα, μεταξύ άλλων περιβαλλοντικών ζητημάτων βιωσιμότητας. Οι εμπορικές δυνατότητες που προσφέρουν δημιουργούν πρόσφορο έδαφος για αναγεννητικά υλικά (regenerative materials) που δεσμεύουν άνθρακα (και άρα έχουν χαμηλό οικολογικό - ανθρακικό αποτύπωμα), εξοικονομούν φυσικούς πόρους, είναι πιο φιλικά προς τον άνθρωπο, παράγουν σημαντικά μειωμένους ρύπους και φύρα υλικών και μπορούν να αναπτυχθούν on place προσφέροντας μία διαφορετική οπτική σε αυτό που λέγεται φυσική δόμηση.

Με τον ένα ή τον άλλο τρόπο οι μύκητες παίζουν και θα συνεχίσουν να παίζουν καθοριστικό ρόλο, ως οργανισμοί απαραίτητοι για την υγεία του πλανήτη μας, των οποίων τις μυστικές δυνάμεις πρέπει να χρησιμοποιήσουμε προς όφελος μας (χωρίς βέβαια να επιβαρύνουμε τα δικά τους ενδιαιτήματα).

Τα προϊόντα από μυκήλιο αποτελούν αναμφισβήτητα μία πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση βιώσιμου υλικού όπου δρα ως βιολογική κόλλα για το υλικό (φυτικές ίνες) αποικίζοντας και δεσμεύοντας τα χαλαρά σωματίδια του υποστρώματος το οποίο μπορεί να προέρχεται από μία σειρά διαφορετικών λιγνοκυτταρινικών υλικών (γεωργικών αποβλήτων και άλλων).

Θα μπορούσαμε να πούμε πως στο μέλλον τα υλικά που έχουν αναπτυχθεί ή αλλιώς grown materials θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τα κατασκευασμένα υλικά στα πλαίσια της έννοιας του “fungus housing” αναδημιουργώντας πιο οικολογικές πόλεις ή βελτιώνοντας τις ήδη υπάρχουσες μέσω των προϊόντων που προέρχονται από φυσικές και βιολογικές διεργασίες συνεισφέροντας και σε μια πιο σωστή περιβαλλοντική διαχείριση του οικοδομικού κλάδου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα πρώτο βήμα στη διερεύνηση βιο-σύνθετων υλικών με βάση το μυκήλιο τα συμπεράσματα της οποίας μπορούν να αξιοποιηθούν για την περαιτέρω συνέχιση της έρευνας τόσο σε επίπεδο υλικών όσο και σε επίπεδο μηχανικών ιδιοτήτων και μορφολογικών χαρακτηριστικών. Επίσης, από τη βιβλιογραφία αναφέρεται πως η χρήση βερνικιών αδιαβροχοποίησης προσφέρει ανθεκτικότητα του βιο-σύνθετου στην υγρασία κάτι που θα μπορούσε επίσης να ενταχθεί σε μελλοντικά δοκίμια.

Με ανάλογο τρόπο που το υπόγειο μυκήλιο των μυκήτων υφαίνει τα δασικά οικοσυστήματα σε ένα δυναμικό, οργανικό, δασικό δίκτυο, το λεγόμενο “wood wide web”, έτσι το ελεγχόμενο μυκήλιο των επιλεγμένων βασιδιομυκήτων υφαίνει τις ίνες κάνναβης σε ένα σύνθετο δομικό υλικό με πολλές εμπορικές προοπτικές εξέλιξης.

Αναμφισβήτητα χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για να μπορέσουμε να έχουμε μία καλύτερη κατανόηση και αξιολόγηση των σύνθετων υλικών που προτείνονται και της δυνατότητας εφαρμογής τους ως εναλλακτικό δομικό στοιχείο τοιχοποιίας. Αυτό όμως δε θα καταστεί δυνατό αν δεν υποστηριχθούν με ερευνητικούς πόρους και νομοθετικές αλλαγές άμεσα ώστε να μπορέσουν να εξερευνηθούν ουσιαστικά οι αναρίθμητες δυνατότητες αυτών των υλικών.



# Κεφάλαιο 5.

## Βιβλιογραφία

### Βιβλία και Άρθρα

- 2022 Global Status Report for Buildings and Construction:** Towards a Zero emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.
- Acosta-Rodríguez, I.,** Cárdenas-González, J. F., Rodríguez Pérez, A. S. , Tovar Oviedo, J. , Martínez-Juárez, V. M., (2018) 'Bioremoval of different heavy metals by the resistant fungal strain *aspergillus niger*', *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2018, pp. 1–7. doi:10.1155/2018/3457196.
- Adavasio, J. M.,** Soffer, O., & Klima, B. (1996). Upper Palaeolithic Fibre Technology: interlaced woven finds from Pavlov I, Czech Republic, c.26,000 years ago. *Antiquity*, 70, 526-34.
- Almajed, A.,** Khodadadi Tirkolaei, H. and Kavazanjian, E., (2018). Baseline Investigation on Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(11), p.04018081.
- Alves, C.,** Ferrão, P. M. C., Silva, A. J., Reis, L. G., Freitas, M., Rodrigues, L. B., & Alves, D. E. (2010). Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites. *Journal of Cleaner Production*, 18(4), 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.022>
- Appels, F.V.W.,** Camere S., Montalti M., Karana E., Kaspar M.B. J., Dijksterhuis J, Krijgsheld P., Wösten A.B H.,. (2019). 'Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites', *Materials & Design*, 161, pp. 64–71. doi:10.1016/j.matdes.2018.11.027.
- Awwad, E. et al.** (2012) "Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers," *Construction and Building Materials*, 35, pp. 710–717. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.119>.
- Bardgett R.D. & van der Putten W.H.** (2014) Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515(7528):505-511.
- Behie, S.W. and Bidochka, M.J.** (2014) 'Nutrient transfer in plant–fungal symbioses', *Trends in Plant Science*, 19(11), pp. 734–740. doi:10.1016/j.tplants.2014.06.007.
- Bennett, J.W.,** 1998. *Mycotechnology: the role of fungi in biotechnology*. J. Biotechnol. 66, 101–107. [https://doi.org/10.1016/s0168-1656\(98\)00133-3](https://doi.org/10.1016/s0168-1656(98)00133-3)
- Berbee, M.L.,** James, T.Y. and Strullu-Derrien, C. (2017) 'Early diverging fungi: Diversity and impact at the dawn of Terrestrial Life', *Annual Review of Microbiology*, 71(1), pp. 41–60. doi:10.1146/annurev-micro-030117-020324.
- Bespalova, A.Yu.,** Marfenina, O.E. and Motuzova, G.V. (2006) 'Communities of microscopic fungi in contaminated and reference al-Fe-humus podzols and their influence on Copper Mobility', *Eurasian Soil Science*, 39(2), pp. 203–210. doi:10.1134/s1064229306020116.
- Bilisik, Kadir & Sahbaz Karaduman, Nesrin & Bilisik, Nedim & Bilişik Bakbak, Havva.** (2013). Three-dimensional fully interlaced woven preforms for composites. *Textile Research Journal*. 83. 2060-2084. 10.1177/0040517513487791.
- Bilisik, Kadir.** (2012). Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review. *Textile Research Journal*. 82. 725-743. 10.1177/0040517511435013.



**Blackwell, M.** (2011) 'The fungi: 1, 2, 3 ... 5.1 million species?', *American Journal of Botany*, 98(3), pp. 426–438. doi:10.3732/ajb.1000298.

**Bledzki, A., Gassan J.** (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274. [https://doi.org/10.1016/s0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/s0079-6700(98)00018-5)

**Boddy, L., Frankland, J.C. and West, P. van** (2008) *Ecology of saprotrophic basidiomycetes*. Amsterdam: Elsevier Academic Press.

**Böttcher, W.** (1974) *Technologie der Pilzverwertung*. Ulmer, Stuttgart

**Broudy, E.** (1993). *The book of looms: A history of the handloom from ancient times to the present*. Providence: Brown University Press.

**Campbell, N.A., Reece, J.B., Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman, S.A., Minorsky, P.V. and Jackson, R.B.** (2011) *Biology*. 9th Edition, Benjamin Cummings, San Francisco.

**Carus M., Sarmiento L.,** (2016). *The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs, seeds and flowers*. European Industrial Hemp Association

**Corrales, F., Vilaseca, F., Llop, M., Gironès, J., Méndez, J. A., & Mutjè, P.** (2007). Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites. *Journal of Hazardous Materials*, 144(3), 730–735. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.103>

**Christie, R., Rickards, R., Watson, W.,** (1978). Microbial transformation of cannabinoids. I. Metabolism of (-)- $\Delta^9$ -6a,10a-trans-Tetrahydrocannabinol by *Chaetomium globosum*. *Aust. J. Chem.* 31, 1799. <https://doi.org/10.1071/CH9781799>

**Dadachova, E., Bryan, R. A., Huang, X., Moadel, T., Schweitzer, A. D., Aisen, P., Nosanchuk, J. D., Casadevall, A.,** (2007) 'Ionizing radiation changes the electronic properties of melanin and enhances the growth of melanized fungi', *PLoS ONE*, 2(5). doi:10.1371/journal.pone.0000457.

**Deacon, J.,** (2006). *Fungal biology*. Malden, MA: Blackwell Pub.

**Dicker, M.P.M., Duckworth, P.F., Baker, A.B., Francois, G., Hazzard, M.K., Weaver, P.M.,** Green Composites: A review of material attributes and complementary applications, *Composites: Part A* (2013), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.014>

**Dong, K., Peng, X., Cheng, R., Ning, C., Jiang, Y., Zhang, Y., & Wang, Z. L.** (2022). Advances in high-performance Autonomous Energy and self-powered sensing textiles with novel 3D fabric structures. *Advanced Materials*, 34(21). doi:10.1002/adma.202109355

**Esser, Karl, and A. J. P. Brown.,** 2006. *The Mycota : a Comprehensive Treatise on Fungi as Experimental Systems for Basic and Applied Research / Edited by K. Esser. 13, Fungal Genomics ; Volume Editor A.J.P. Brown. Berlin: Springer, Print.*

**Fesel, P.H. and Zuccaro, A.** (2016) 'B-glucan: Crucial component of the fungal cell wall and elusive MAMP in plants', *Fungal Genetics and Biology*, 90, pp. 53–60. doi:10.1016/j.fgb.2015.12.004.

**Gao, Dawen & Du, Lina & Yang, Jiaoling & Wu, Weimin & Liang, Hong.** (2010). A critical review of the application of white rot fungus to environmental pollution control. *Critical reviews in biotechnology*. 30. 70-7. 10.3109/07388550903427272.

**Gaunitz**, F., Dahm, P., Mogler, L., Thomas, A., Thevis, M., Mercer-Chalmers-Bender, K., 2019. In vitro metabolic profiling of synthetic cannabinoids by pooled human liver microsomes, cytochrome P450 isoenzymes, and *Cunninghamella elegans* and their detection in urine samples. *Anal. Bioanal. Chem.* 411, 3561–3579. <https://doi.org/10.1007/s00216-019-01837-8>

**Geerinck**, R., Baere, I. D., Clercq, G. D., Daelemans L., Ivens, J., De Clerck, K., (2019) “One-shot production of large-scale 3D woven fabrics with integrated prismatic shaped cavities and their applications,” *Materials & Design*, 165, p. 107578. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107578>.

**Gillis**, C. & Marie-Louise B. Nosch, M.-L. B. (2007). *Ancient Textiles: Production, Crafts and Society*. Ox-bow Books.

**Giovannetti**, M., Avio, L., Fortuna, P., Pellegrino, E., Sbrana, C., Strani, P., (2006) At the Root of the Wood Wide Web, *Plant Signaling & Behavior*, 1:1, 1-5, DOI: 10.4161/psb.1.1.2277

**Gries**, T., Bettermann, I., Blaurock, C., Bündgens, A., Dittel, G., Emonts, C., Gesché, V., Glimpel, N., Kolloch, M., Grigat, N., Löcken, H., Löwen, A., Jacobsen, J-L., Kimm, M., Kelbel, H., Kröger, H., Kuo, K-C., Peiner, C., Sackmann, J., Schwab, M. (2022). Aachen technology overview of 3D textile materials and recent innovation and applications. *Applied Composite Materials*, 29(1), 43–64. doi:10.1007/s10443-022-10011-w

**Gurunathan**, T., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2015). A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77, 1-25. doi:10.1016/j.compositesa.2015.06.007

**Harvey**, Claire & Holtzman, Emily & Ko, Joy & Hagan, Brooks & Wu, Rundong & Marschner, Steve & Kessler, David. (2019). *Weaving objects: spatial design and functionality of 3D-woven textiles*. 1-8. 10.1145/3306211.3320137.

**Hawksworth**, DL., (2001). The magnitude of fungal diversity: The 1.5 million species estimate revisited. *Mycological Research* 105(12):1422-1432.

**He**, M.Q. and Zhao, R.L. (2021) ‘Outline of basidiomycota’, *Encyclopedia of Mycology*, pp. 310–319. doi:10.1016/b978-0-12-819990-9.00065-2.

**Heinfling**, A., Bergbauer, M. and Szewzyk, U., (1997). Biodegradation of azo and phthalocyanine dyes by *Trametes versicolor* and *Bjerkandera adusta*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 48(2), pp.261-266.

**Helgason**, T., Daniell, T., Husband, R. et al. Ploughing up the wood-wide web?. *Nature* 394, 431 (1998). <https://doi.org/10.1038/28764>

**Heux**, S., I. Meynial-Salles, M.J. O’Donohue, C. Dumon (2015) ‘White Biotechnology: State of the art strategies for the development of biocatalysts for biorefining’, *Biotechnology Advances*, 33(8), pp. 1653–1670. doi:10.1016/j.biotechadv.2015.08.004.

**Hibbett** DS, Binder M, Bischoff JF, Blackwell M, Cannon PF, Eriksson OE, Huhndorf S, James T, Kirk PM, Lücking R, Thorsten Lumbsch H, Lutzoni F, Matheny PB, McLaughlin DJ, Powell MJ, Redhead S, Schoch CL, Spatafora JW, Stalpers JA, Vilgalys R, Aime MC, Aptroot A, Bauer R, Begerow D, Benny GL, Castlebury LA, Crous PW, Dai YC, Gams W, Geiser DM, Griffith GW, Gueidan C, Hawksworth DL, Hestmark G, Hosaka K, Humber RA, Hyde KD, Ironside JE, Kõljalg U, Kurtzman CP, Larsson KH, Lichtwardt R, Longcore J, Miadlikowska J, Miller A, Moncalvo JM, Mozley-Standridge S, Oberwinkler F, Parmasto E, Reeb V, Rogers JD, Roux C, Ryvarden L, Sampaio JP, Schüssler A, Sugiyama J, Thorn RG, Tibell L, Untereiner WA, Walker C, Wang Z, Weir A, Weiss M, White MM, Winka K, Yao YJ, Zhang N. (2007). A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. *Mycol Res.* May;111(Pt 5):509-47. doi: 10.1016/j.mycres.2007.03.004. Epub 2007 Mar 13. PMID: 17572334.

**Hirst**, E. A. J., Walker, P. et al, *Characterisation of Low Density Hemp-Lime Composite Building Materials under Compression Loading*, Bath, 2010

**Hodder**, Ian (2013). 2013 Season Review. Çatal Newsletter.

**Ingrao**, C., Lo Giudice, A., Bacenetti, J., Tricase, C., Dotelli, G., Fiala, M., Siracusa V., Mbohwa, C. (2015). Energy and Environmental Assessment of industrial hemp for building applications: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 29-42. doi:10.1016/j.rser.2015.06.002

**Jolie**, Edward A.; Lynch, Thomas F.; Geib, Phil R.; Adovasio, J. M. (2011). "Cordage, Textiles, and the Late Pleistocene Peopling of the Andes". *Current Anthropology*. 52 (2): 285–296. doi:10.1086/659336. S2CID 43570348.

**Jones**, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., Johna, S., (2020). "Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review," *Materials & Design*, 187, p. 108397. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>.

**Karana**, E., Barati, B., Rognoli, V., & Zeeuw van der Laan, A. (2015). Material driven design (MDD): A method to design for material experiences. *International Journal of Design*, 9(2), 35-54

**Karana**, E., Blauwhoff, D., Hultink, E. -J., & Camere, S. (2018). When the material grows: A case study on designing (with) mycelium-based materials. *International Journal of Design*, 12(2), 119-136.

**Karana**, E., Pedgley, O. and Rognoli, V. (2014) *Materials experience: Fundamentals of materials and Design*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

**Kim**, H.-S., Kim, H.-J., Lee, J.-W., & Choi, I.-G. (2006). Biodegradability of bio-flour filled biodegradable poly(butylene succinate) bio-composites in natural and compost soil. *Polymer Degradation and Stability*, 91(5), 1117–1127. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.07.002>

**Kirk** PM, Cannon PF, Minter DW, Stalpers JA (2008). *Dictionary of the Fungi* (10th ed.). Wallingford: CABI. p. 78. ISBN 0-85199-826-7.

**Kjøller**, A. and Struwe, S. (1982). *Quantitative Ecology of Microfungi and Animals in Soil and Litter || Microfungi in Ecosystems: Fungal Occurrence and Activity in Litter and Soil*. *Oikos*, 39(3), 391–422. doi:10.2307/3544690ZV

**Maarten**., C.M.J., Fay, M.F. and Chase, M.W. (2018) *Plants of the world: An illustrated encyclopedia of vascular plants*. Kew, UK: Kew Publishing, Royal Botanic Gardens.



**Manaia**, J. P., Manaia, A. T., & Rodrigues, L. (2019). Industrial hemp fibers: An overview. *Fibers*, 7(12), 106. doi:10.3390/fib7120106

**Mansur**, M.A. and Aziz, M.A. (1982) 'A study of jute fibre reinforced cement composites', *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 4(2), pp. 75–82. doi:10.1016/0262-5075(82)90011-2.

**Mariano**, L. G., Carvalho, A. G., Trevisan, H., & Fernandes, M. do. (2020). Identification and control of wood-deteriorating fungi. *Arquivos Do Instituto Biológico*, 87. doi:10.1590/1808-1657000082020

**Mochane**, M. J., Mokhena, T. C., Mokhothu, T. H., Mtibe, A., Sadiku, E. R., Ray, S. S., Ibrahim I.D., Daromola, O. O. (2019). Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A Review. *Express Polymer Letters*, 13(2), 159-198. doi:10.3144/expresspolymlett.2019.15

**Moore**, D., Robson, G., & Trinci, A. (2020). 21st Century Guidebook to Fungi (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781108776387

**Morris**, H., Brodersen, C., Schwarze F. W. M. R., Jansen S. (2016) 'The parenchyma of secondary xylem and its critical role in tree defense against fungal decay in relation to the Cudit model', *Frontiers in Plant Science*, 7. doi:10.3389/fpls.2016.01665.

**Mueller**, G.M., Foster, M.S. and Bills, G.F. (2004) *Biodiversity of fungi inventory and monitoring methods*. Amsterdam: Elsevier Academic Press.

**Nath**, M.K. Benefits of Cultivating Industrial Hemp (*Cannabis sativa* ssp. *sativa*)—A Versatile Plant for a Sustainable Future. *Chem. Proc.* 2022, 10, 14. <https://doi.org/10.3390/IOCAG2022-12359>  
Our common future (1987). Oxford: Oxford University Press.

**Nguyen**, M.T.; Solueva, D.; Spyridonos, E.; Dahy, H. Mycomerge: Fabrication of Mycelium-Based Natural Fiber Reinforced Composites on a Rattan Framework. *Biomimetics* (2022), 7, 42. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020042>

**Palla**, F. and Barresi, G. (2022) *Biotechnology and conservation of cultural heritage*. Cham, Switzerland: Springer.

**Peças**, P., Carvalho, H., Salman, H., Leite, L., (2018) 'Natural Fibre Composites and their applications: A Review', *Journal of Composites Science*, 2(4), p. 66. doi:10.3390/jcs2040066.

**Perera**, Y.S., Muwanwella, R.M.H.W., Fernando, P.R. et al. (2021) Evolution of 3D weaving and 3D woven fabric structures. *Fashion and Textiles* 8, 11. <https://doi.org/10.1186/s40691-020-00240-7>

**Ramesh**, M., Palanikumar, K., & Reddy, K. H. (2017). Plant fibre based bio-composites: Sustainable and Renewable Green Materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 558–584. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.094>

**Ramesh**, M., Deepa, C., Kumar, L. R., Sanjay, M., & Siengchin, S. (2020). Life-cycle and environmental impact assessments on processing of plant fibres and its bio-composites: A critical review. *Journal of Industrial Textiles*, 51(4\_suppl). <https://doi.org/10.1177/1528083720924730>

**Rigobello**, A.; Colmo, C.; Ayres, P. Effect of Composition Strategies on Mycelium-Based Composites Flexural Behaviour. *Biomimetics* 2022, 7, 53. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020053>

**Sain, M, Suhara P, Law S, Bouilloux A.** (2005). Interface Modification and Mechanical Properties of Natural Fiber-Polyolefin Composite Products. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 24(2):121-130. doi:10.1177/0731684405041717

**Singh, Harpreet, Jai Inder Preet Singh, Sehijpal Singh, Vikas Dhawan, and Sunil Kumar Tiwari.** (2018). A Brief Review of Jute Fibre and Its Composites. *Materials Today: Proceedings* 5(14): 28427–37. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.129>.

**Soetaert, W., & Vandamme, E.** (2006). The impact of industrial biotechnology. *Biotechnology Journal*, 1(7–8), 756–769. <https://doi.org/10.1002/biot.200600066>

**Soffer O., Adovasio, J. M., and Hyland, D. C.** (2000). The 'Venus' figurines, textile, basketry, gender, and status in the Upper Palaeolithic, *Current Anthropology* 41, 4: 511-37.

**Schmidt, O.** (2010) *Wood and tree fungi: Biology, damage, protection, and use*. Springer.

**Spatafora JW, Aime MC, Grigoriev IV, Martin F, Stajich JE, Blackwell M** (2018) The fungal tree of life: from molecular systematics to genome-scale phylogenies. In: *The Fungal Kingdom* (Heitman J, Howlett BJ, Crous PW, Stukenbrock EV, Gow NAR, eds): 3–34. Washington DC: American Society for Microbiology.

**Spencer, D.J.** (2001) *Knitting Technology: A comprehensive handbook and practical guide*. Woodhead Publishing.

**Stanwix, W. and Sparrow, A.** (2014) *The hempcrete book: Designing and building with Hemp-Lime*. Cambridge: Green Books.

**Stork, N.E.,** (2018). How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on earth?, *Annual Review of Entomology*, 63(1), pp. 31–45. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043348>.

**Taylor, T.N., Krings, M. and Taylor, E.L.** (2015) 'Basidiomycota', *Fossil Fungi*, pp. 173–199. doi:10.1016/b978-0-12-387731-4.00009-8.

**Thyavihalli Girijappa, Y. G., Mavinkere Rangappa, S., Parameswaranpillai, J., & Siengchin, S.** (2019). Natural fibers as sustainable and renewable resource for development of Eco-Friendly Composites: A comprehensive review. *Frontiers in Materials*, 6. doi:10.3389/fmats.2019.00226

**Tovar-Herrera, O., Martha-Paz, A., Pérez-LLano, Y., Aranda, E., Tacoronte-Morales, J., Pedroso-Cabrera, M., Arévalo-Niño, K., Folch-Mallol, J. and Batista-García, R.,** (2018). Schizophyllum commune: An unexploited source for lignocellulose degrading enzymes. *MicrobiologyOpen*, 7(3), p.e00637.

**Tran Le, A.D.; Maalouf, C.; Mai, T.H.; Wurtz, E.; Collet, F.,** (2010). Transient Hygrothermal Behaviour of a Hemp Concrete Building Envelope. *Energy Build.* 42, 1797–1806.

**Vandelook, Simon & Elsacker, Elise & Van Wylick, Aurélie & De Laet, Lars & Peeters, Eveline.** (2021). Current state and future prospects of pure mycelium materials. *Fungal Biology and Biotechnology*. 8. 10.1186/s40694-021-00128-1.

**Vega, Karina & Kalkum, Markus.** (2012). Chitin, Chitinase Responses, and Invasive Fungal Infections. *International journal of microbiology*. 2012. 920459. 10.1155/2012/920459.

**Watkinson, S. C., Boddy, L., Money, N. P., & Carlile, M. J.,** (2016). *The fungi*.

**Webster**, J. and **Weber**, R., (2007). *Introduction to fungi*. Cambridge: Cambridge University Press.

**Whittaker**, R.H., (1969). New concepts of kingdoms of organisms. Evolutionary relations are better represented by new classifications than by the traditional two kingdoms. *Science* 163: 150-160.

**Willis** K. J. (ed.) (2018). *State of the World's Fungi 2018*. Report. London: Royal Botanic Gardens.

**Zhalmuratova**, D. and **Chung**, H.J. (2020) "Reinforced gels and elastomers for biomedical and soft robotics applications," *ACS Applied Polymer Materials*, 2(3), pp. 1073–1091. <https://doi.org/10.1021/acsapm.9b01078>.

**Zhang**, J., **Markillie** L. M., **Mitchell** H. D., **Gaffrey** M. J., **Orr** G., **Schilling** J. S., (2022). 'Distinctive carbon repression effects in the carbohydrate-selective wood decay fungus *Rhodonía placenta*', *Fungal Genetics and Biology*, 159, p. 103673. doi:10.1016/j.fgb.2022.103673.

**Zwawi**, M. A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications. *Molecules* 2021, 26, 404. <https://doi.org/10.3390/molecules26020404>

**Αντωνοπούλου** Ι., (2014). *Διπλωματική εργασία: Αξιολόγηση του ενζυμικού συστήματος του μύκητα *Sporotrichum thermophile* για την αποτελεσματική υδρόλυση λιγνινοκυτταρινούχου βιομάζας*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**Ε.Παντίδου** Μ., (1976). *Βασικές γνώσεις μυκητολογίας*, Αθήνα

**Καφανάκη-Γκότση** Ε., (1995-1996). *Συστηματική και Οικολογία Μυκήτων*, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Βιολογίας, Τομέας Οικολογίας & Ταξινόμησης

**Τσαμασφύρος** Γ.Ι., (1990). *Μηχανική παραμορφώσιμων σωμάτων Τόμος Ι και ΙΙ*, Εκδόσεις Συμμετρία

**Τσιγκόπουλος** Δ., (2019). *Διπλωματική εργασία: Ασβεστοκάνναβη, Ένα φυσικό δομικό υλικό*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

## Ιστολόγιο

**Fungi Mutarium** by LIVIN Studio, Available at: <http://www.livinstudio.com/fungi-mutarium/>

**IEA (2019)**, Global Status Report for Buildings and Construction 2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>, License: CC BY 4.0

**Architecture 2030**, Available at: <https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment/>

**Carbon Credits**. Available at: <https://carboncredits.com/hemp-carbon-credits/>

**Ecovative**. Available at: <https://www.ecovative.com/>

**FAO**, Future Fibres: Jute. Available at: <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/jute/en/>

**Glossary:Biotechnology - Statistics Explained**. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary%3ABiotechnology>

**CBD, Biotechnology, 1992**. Available at: <https://www.cbd.int/convention/articles/?a=cbd-02>

**ASTM**. Available at: <https://www.astm.org/e0084-21a.html>

**UKHempcrete**. Available at: <https://www.ukhempcrete.com/wp-content/uploads/2017/09/201411263dthe-owner-builder3dhempcrete-review-and-extract.pdf>

**Hempitecture**. Available at:

<https://www.hempitecture.com/post/in-us-hempcrete-isn-t-fireproof>

[1] <https://www.totalconcrete.co.uk/news/what-is-the-r-value-for-concrete/>

[2] <https://lacrosse.extension.wisc.edu/2022/07/08/hempcrete/>

[3] <https://www.youtube.com/watch?v=mx7g79Jh66k>



## Εικόνες

Χρώματα βιοτεχνολογίας: <https://steemit.com/steemstem/@jepper/all-the-colors-of-biotechnology>

Κλωστική κάνναβη: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hemp>

Γιούτα: [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Jute\\_cultivation](https://en.wikipedia.org/wiki/Jute_cultivation)

[2] <https://www.jute.com/green-jute/agriculture-raw-jute>

Σιζάλ: <https://www.thecitizen.co.tz/tanzania/news/business/-dutch-firm-plans-sh13-8bn-sisal-plant-in-tanga-3229640>

Λινό (λινάρι): <https://www.nature-and-garden.com/gardening/flax-mulch.html>

Μετάξι: <https://www.britannica.com/topic/silk>

Κασμίρ: <https://www.peta.org/living/personal-care-fashion/cashmere-mohair-goat-facts/>

Μαλλί: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wool>

Πετροβάμβακας: <https://textileengineering.net/types-properties-and-uses-of-mineral-fibres/>

[3] Trindade, Ana Carolina & Alcamand, Himad & Ribeiro Borges, Paulo & Silva, Flávio. (2017). Influence of Elevated Temperatures on the Mechanical Behavior of Jute-Textile-Reinforced Geopolymers. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 8. 389-398. 10.4416/JCST2017-00045.

Seamless Loom: <https://www.lafayetteanticipations.com/en/oeuvre/seamless-loom>

Space Weaver: <https://3dprint.com/31284/>

Silk Pavillion II: <https://oxman.com/projects/silk-pavilion-ii>

Robotic “OmniFibers” textiles: <https://news.mit.edu/2021/fibers-breath-regulating-1015>

Minoeco, 2023. <https://www.minoeco.com/el/constructions/hempcrete>

Ειδώλιο “Αφροδίτη”: <https://www.arch.cam.ac.uk/research/projects/archived-projects/origins-weaving-project>

Οριζόντιος αργαλειός: Cizuk, Martin & Hammarlund, Lena. (2008). Roman Looms – A Study of Craftsmanship and Technology in the Mons Claudianus Textile Project.

Κάθετος Αργαλειός με βάρη: <https://argolikivivliothiki.gr>

DataKnit: <https://www.jennysabin.com/dataknit>

Material Loops by V.Meer: <https://www.v-meer.de/exhibitions>

Βασιδιομύκητες λευκής σήψης σελίδας 41:

<https://www.first-nature.com/fungi/daedaleopsis-tricolor.php>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Polyporus\\_brumalis](https://en.wikipedia.org/wiki/Polyporus_brumalis)

<https://www.agriamanitaria.gr/pleurotus-ostreatus/>

[https://www.mushroomexpert.com/cerrena\\_unicolor.html](https://www.mushroomexpert.com/cerrena_unicolor.html)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Trametes\\_pubescens](https://en.wikipedia.org/wiki/Trametes_pubescens)

[https://www.mushroomexpert.com/lenzites\\_betulina.html](https://www.mushroomexpert.com/lenzites_betulina.html)

[https://www.mushroomexpert.com/ischnoderma\\_resinosum.html](https://www.mushroomexpert.com/ischnoderma_resinosum.html)

[https://www.mushroomexpert.com/ganoderma\\_applanatum.html](https://www.mushroomexpert.com/ganoderma_applanatum.html)

<https://www.inaturalist.org/taxa/328280-Ganoderma-resinaceum>

Hemp Acreage across Europe:

<https://hempindustrydaily.com/france-italy-netherlands-lead-europe-for-hemp-land-use-industry-group-says/>

Solid Knitting Machine: <https://innouvators.com>, <http://www.kri.sfc.keio.ac.jp>

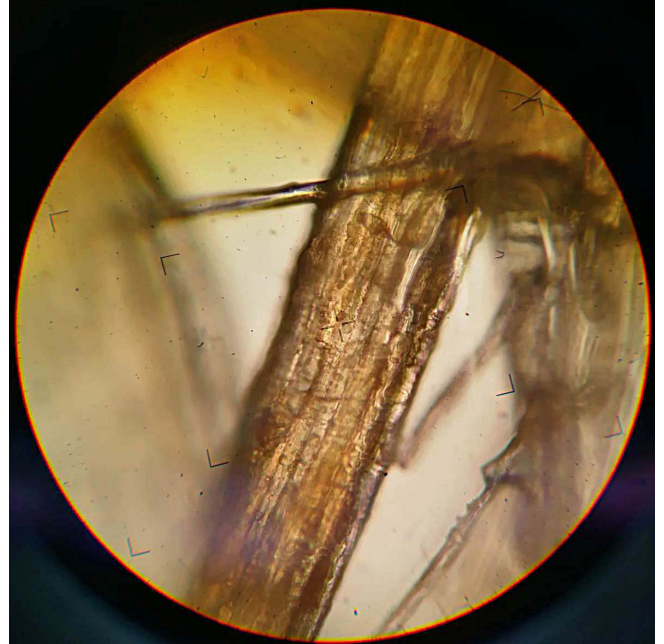
Μέρη βασιδιοκαρπίου: <https://evaprofebio.jimdofree.com/biology-and-geology-1st-eso/ud-10-los-teres-vivos-mas-sencillos/1-hongos/>

Woven mycelium: <https://www.materialbalance.polimi.it/2021/05/21/woven-mycelium/>

Mycomerge: Nguyen, M.T.; Solueva, D.; Spyridonos, E.; Dahy, H. Mycomerge: Fabrication of Mycelium-Based Natural Fiber Reinforced Composites on a Rattan Framework. *Biomimetics* 2022, 7, 42. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020042>

# Κεφάλαιο 6. Παράρτημα

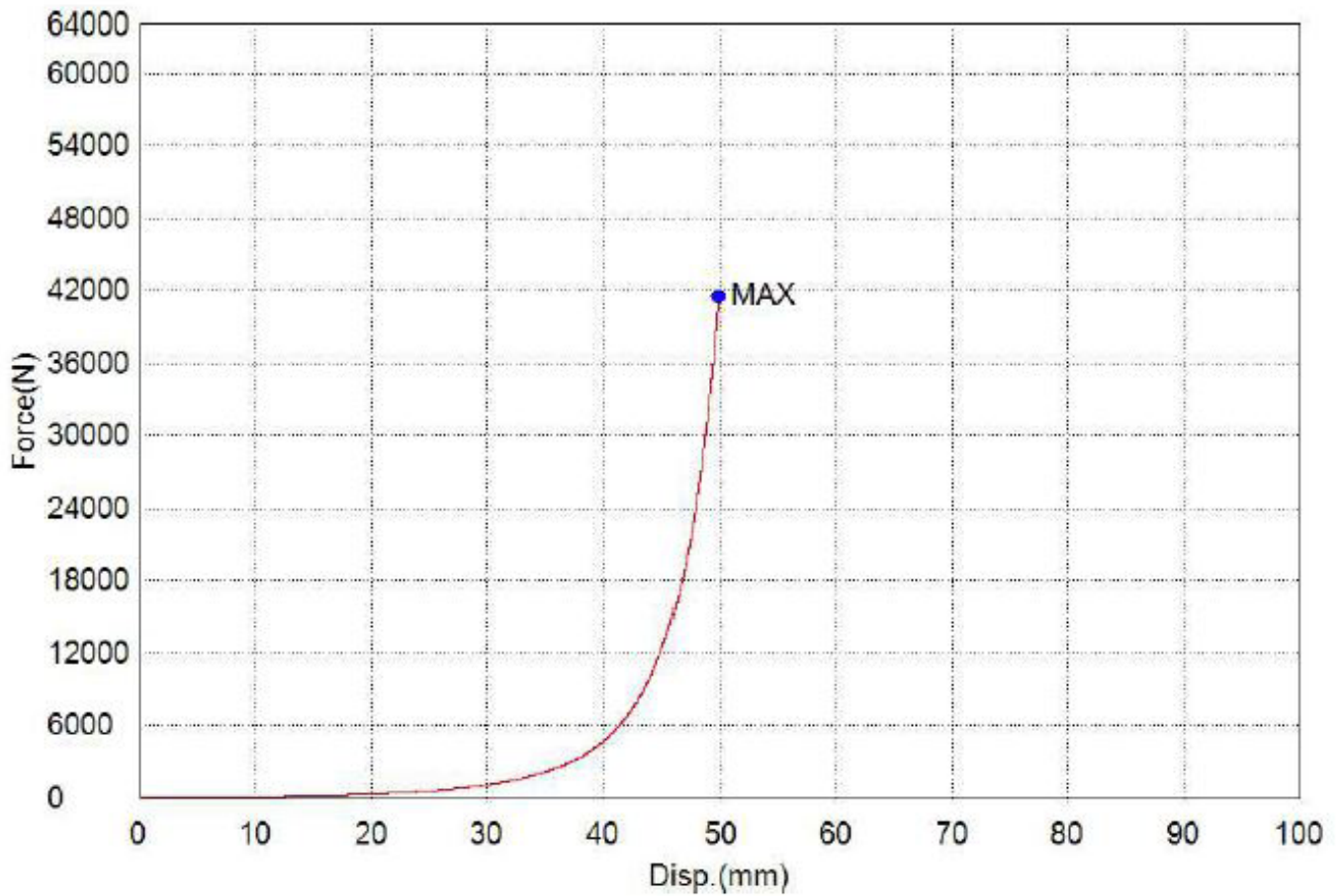
Ίνες κλωστικής κάνναβης στο μικροσκόπιο:



// ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 2: ΑΤΗΜ 6823

Name Parameters Unit	Max_Force Calc. at Entire Areas N	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	Max_Stroke Calc. at Entire Areas mm	Max_Stroke Strain Calc. at Entire Areas %
1_1	41588,6	6,49822	49,8541	76,6986

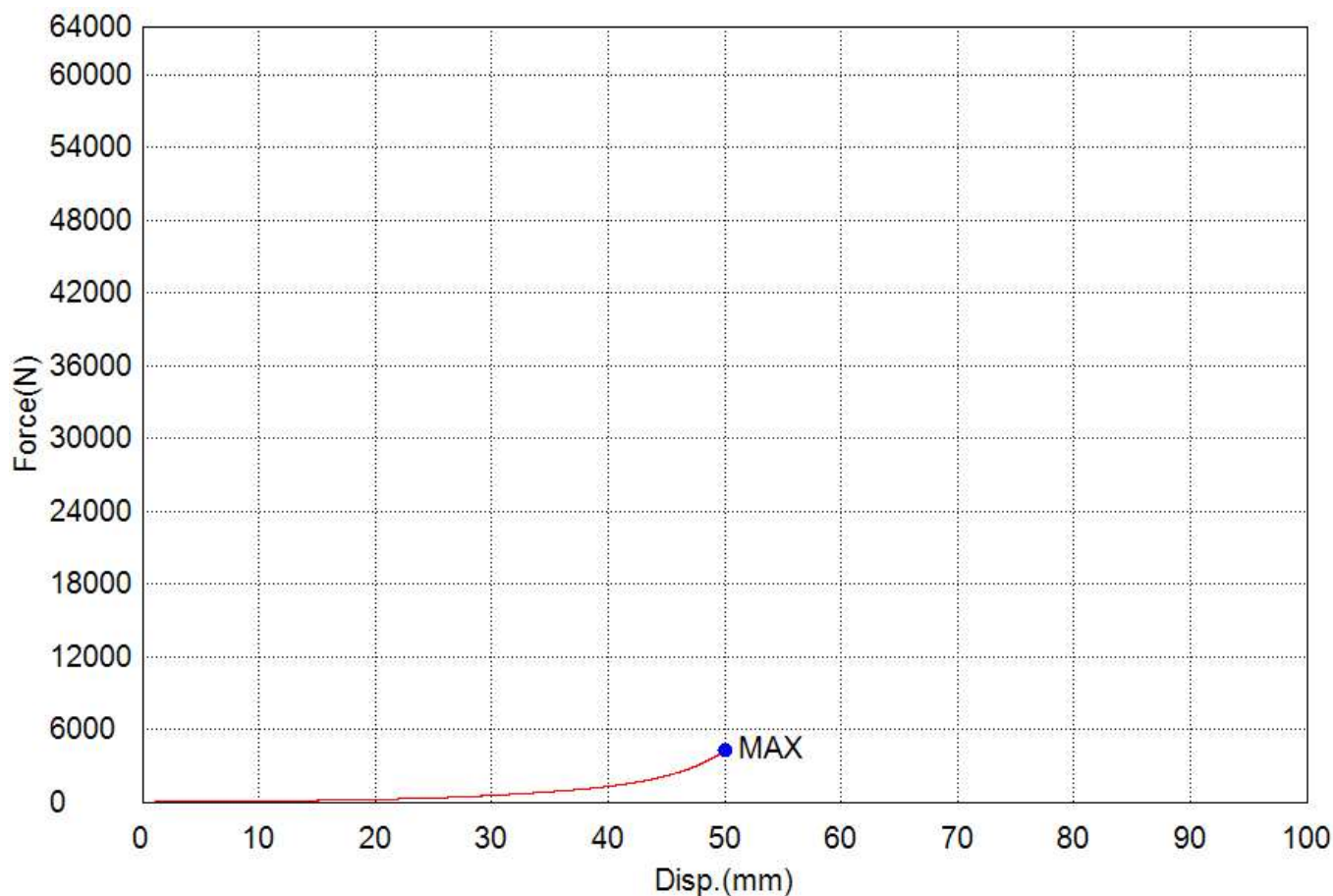




// ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 3: ATHUM 6823  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 27.10.2022

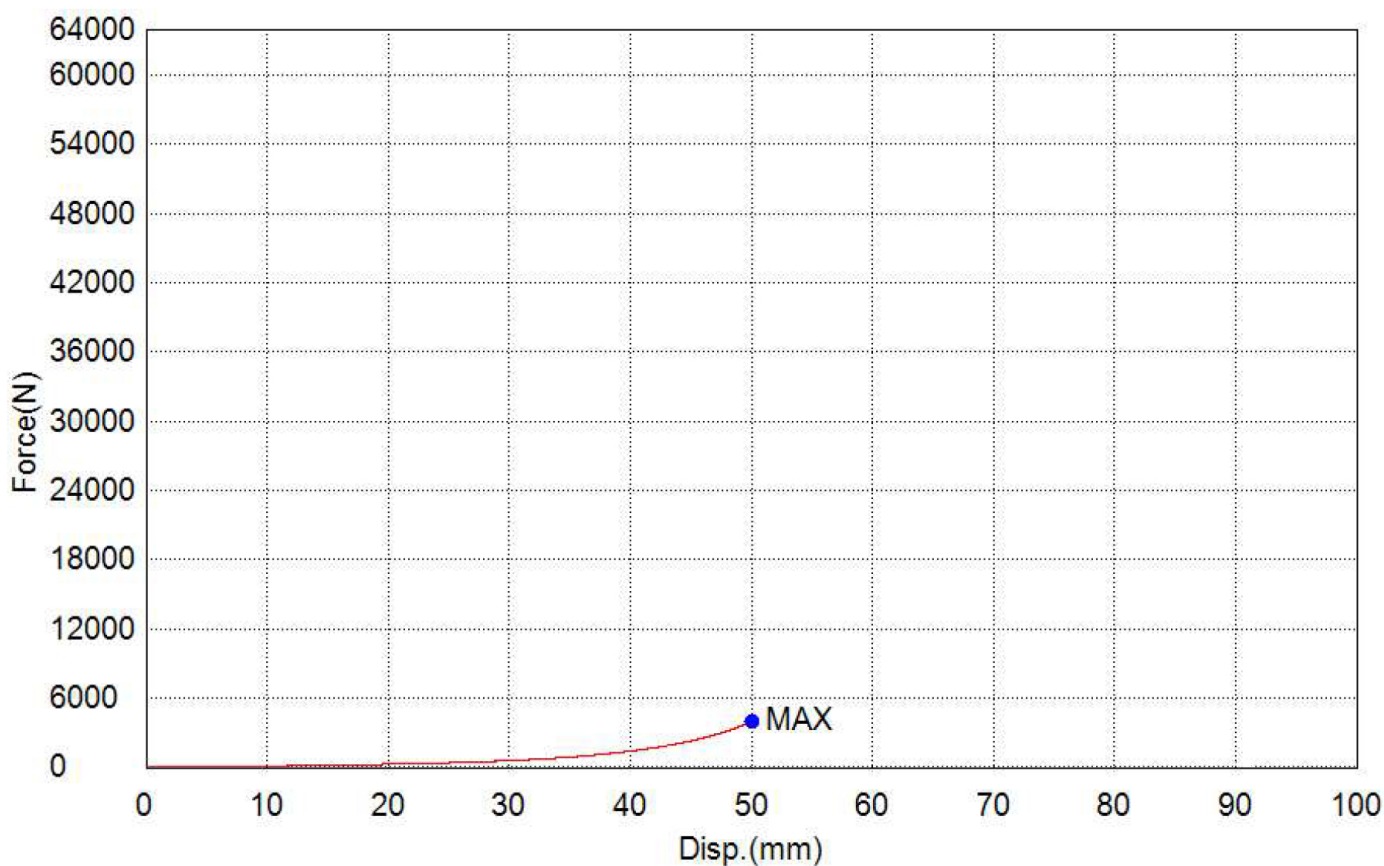
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	4244,90	0,66327	50,0144	76,9452



// ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 4: ATHUM 6823  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 15.11.2022

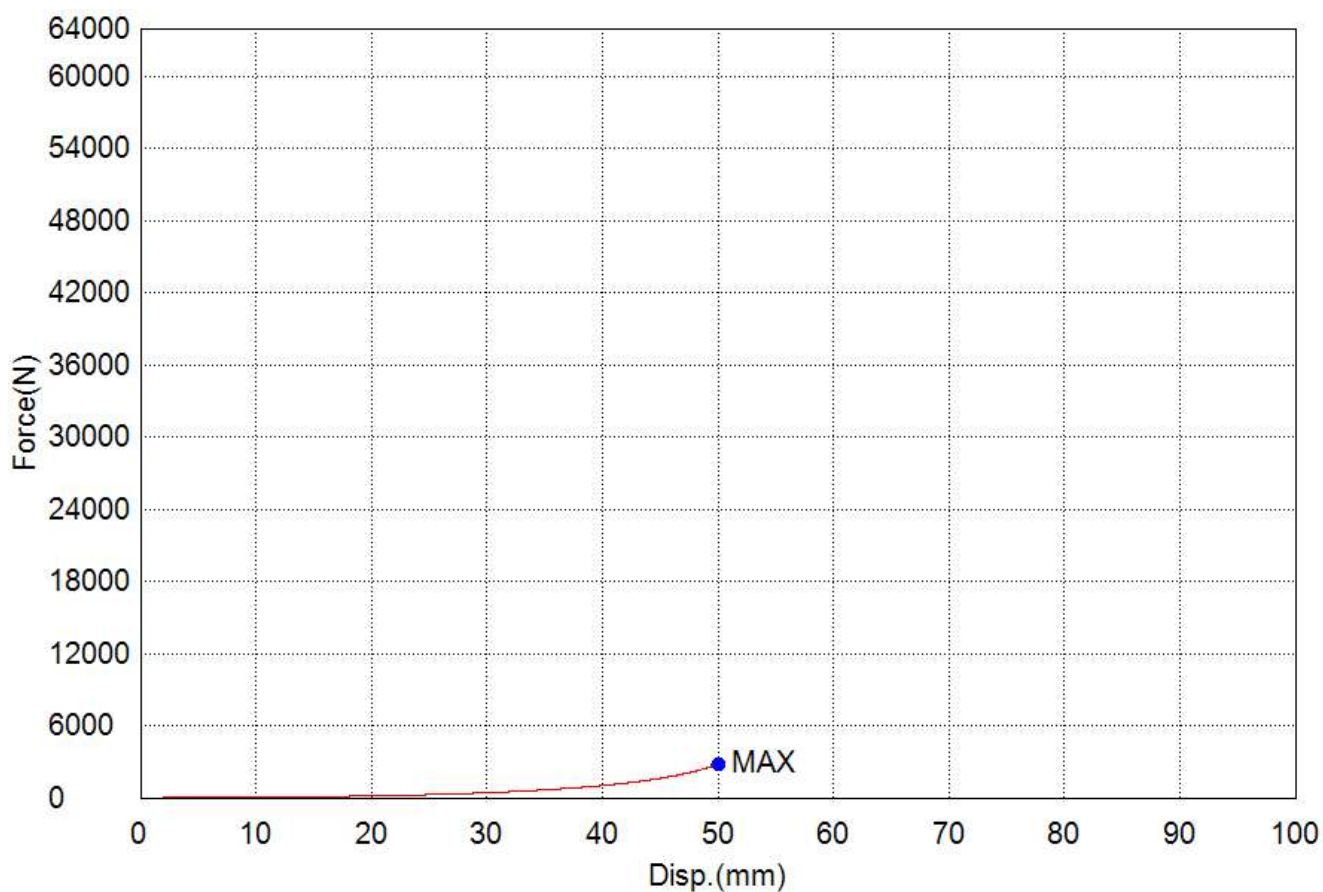
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	3956,22	0,61816	50,0144	76,9452



// ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 5: ATHUM 6823  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 31.10.2022

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	2791,12	0,43611	50,0144	76,9452

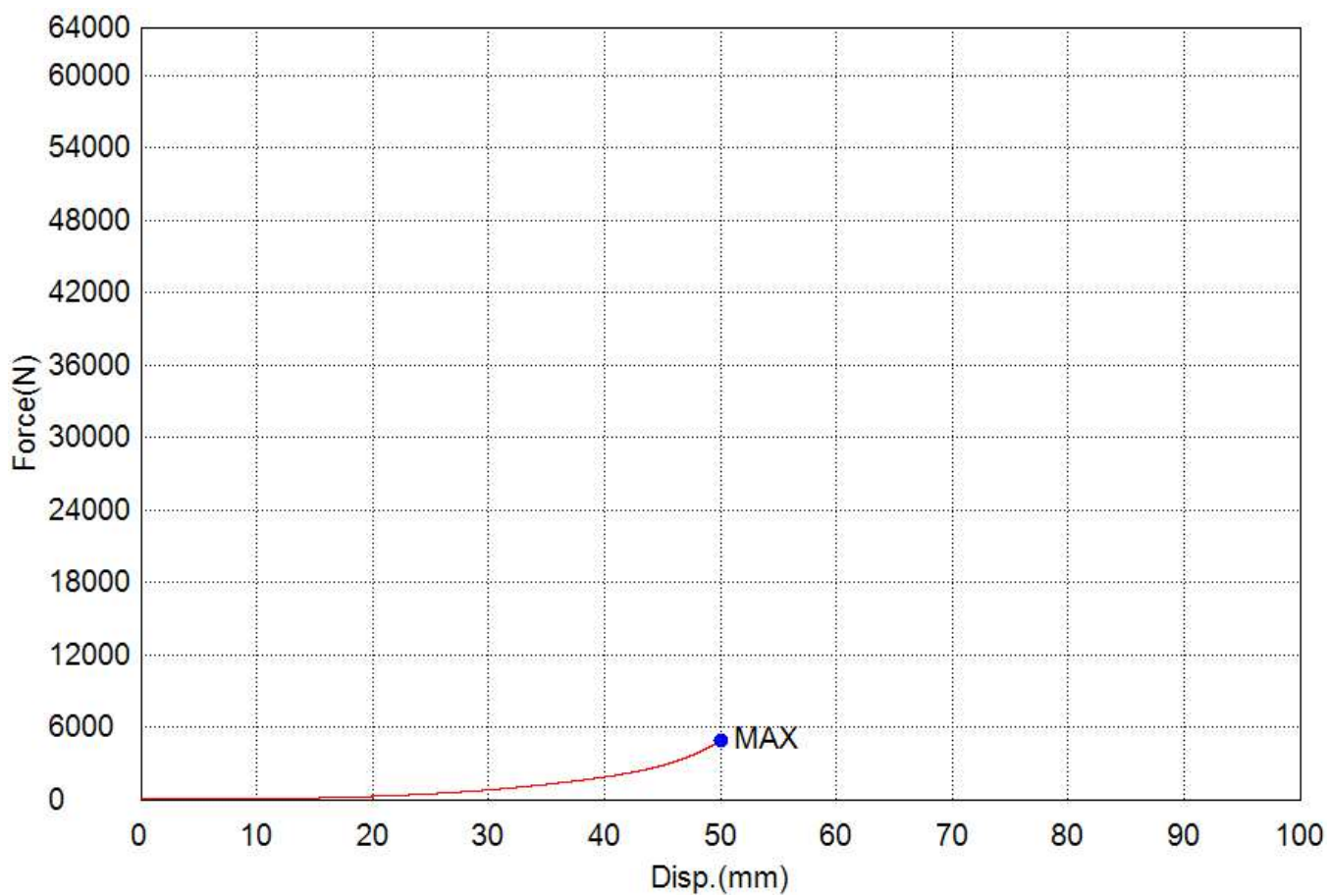




## // ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 6: ATHUM 6823  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 05.11.2022

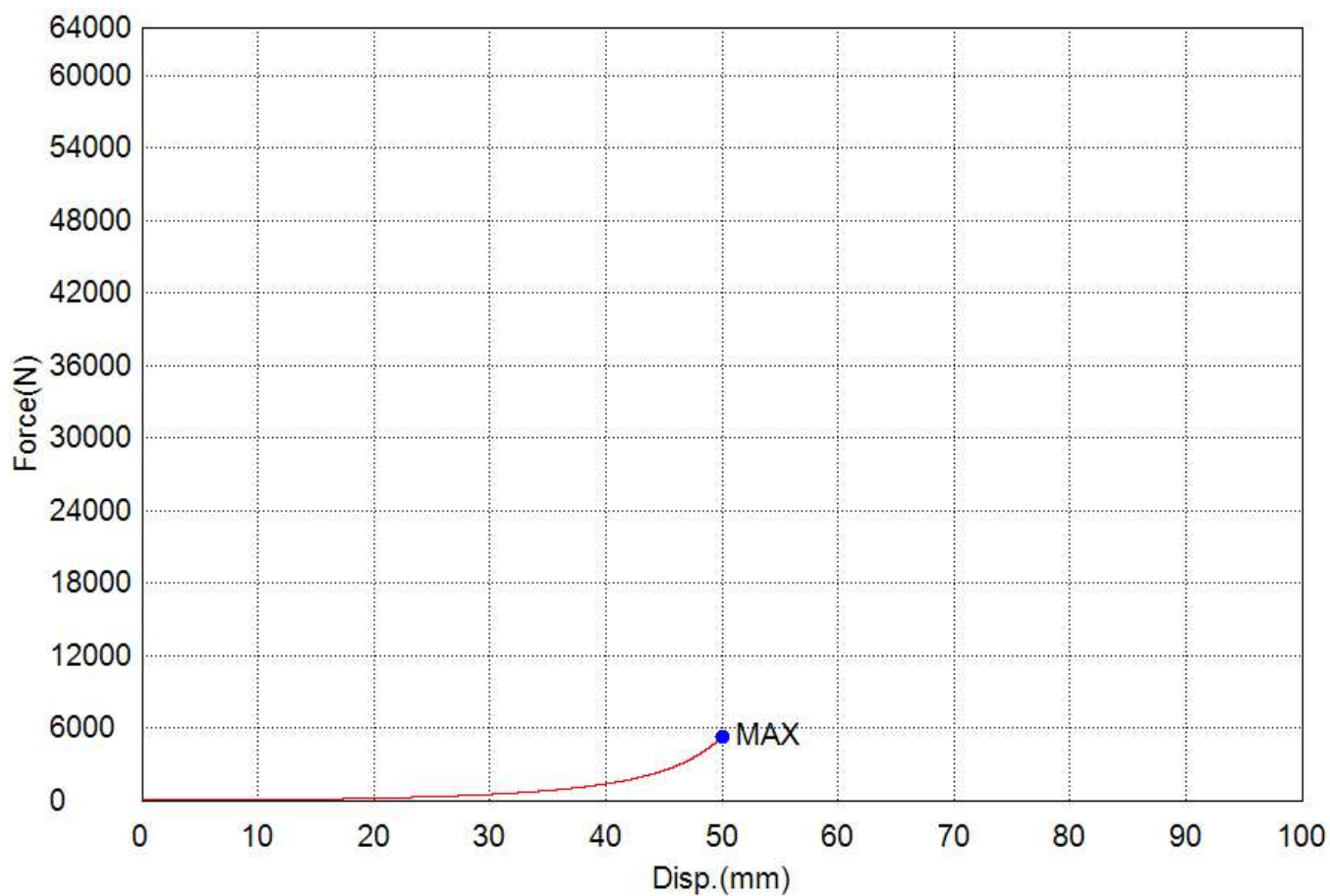
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm <sup>2</sup>	mm	%
1 _ 1	4887,23	0,76363	50,0144	76,9452



# // ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 7: ATHUM 6570  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 24.10.2022

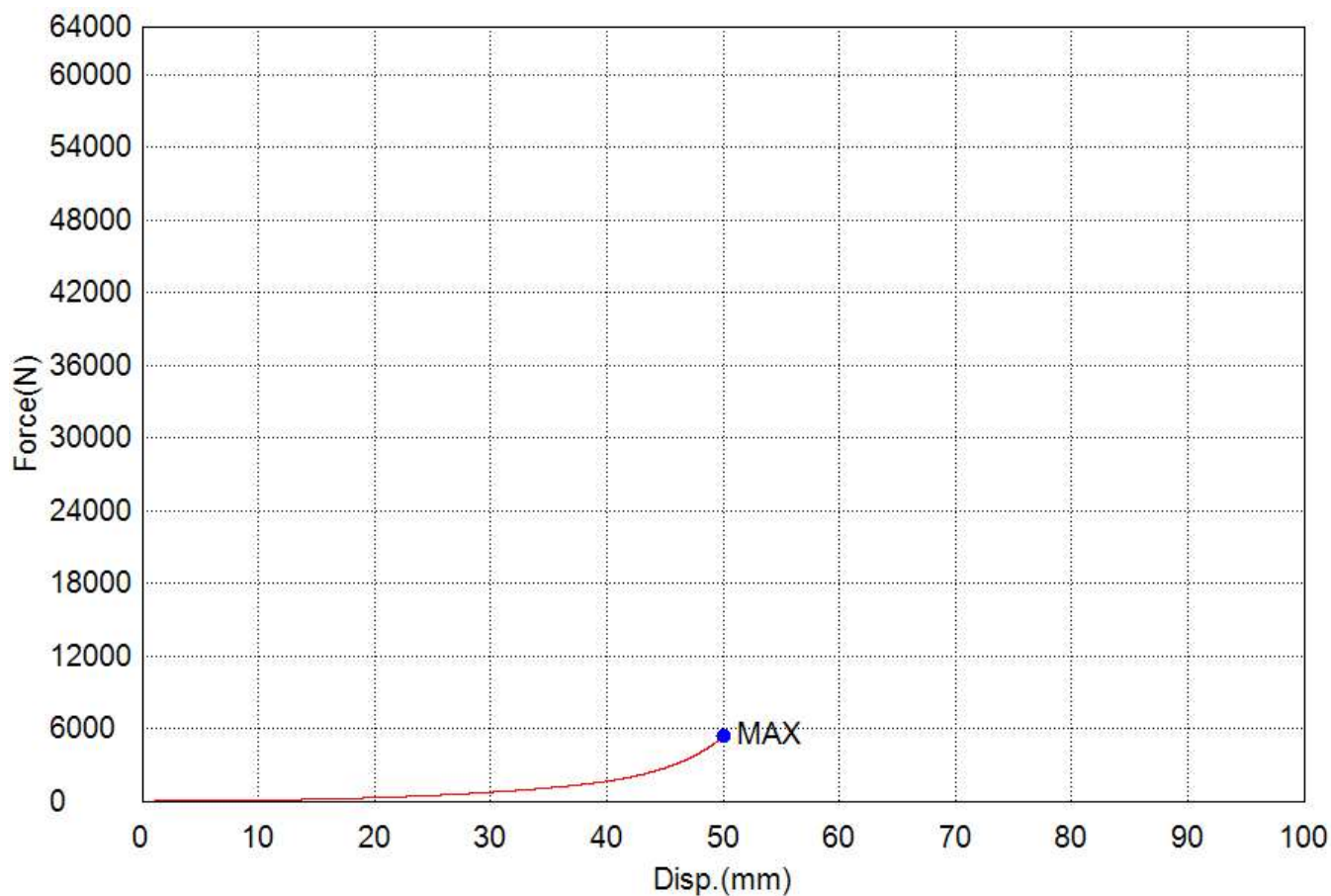
Name Parameters	Max_Force Calc. at Entire Areas	Max_Stress Calc. at Entire Areas	Max_Stroke Calc. at Entire Areas	Max_Stroke Strain Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm <sup>2</sup>	mm	%
1_1	5252,09	0,82064	50,0144	76,9452



// ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 8: ATHUM 6570  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 15.11.2022

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	5333,79	0,83340	50,0144	76,9453

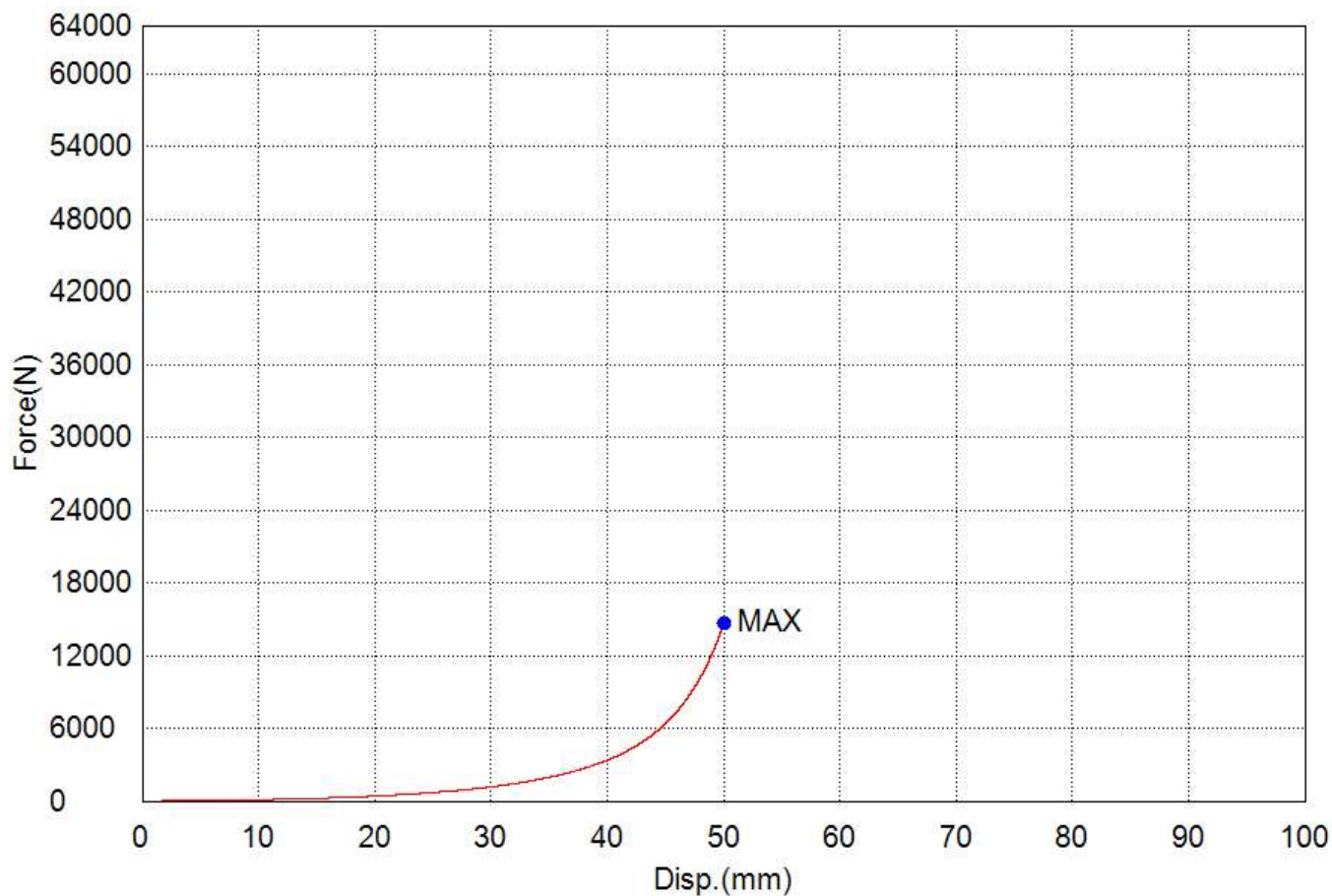




// ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 9: ATHUM 6570  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 23.11.2022

Name Parameters	Max_Force Calc. at Entire Areas	Max_Stress Calc. at Entire Areas	Max_Stroke Calc. at Entire Areas	Max_Stroke Strain Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	14633,4	2,28646	50,0143	76,9451

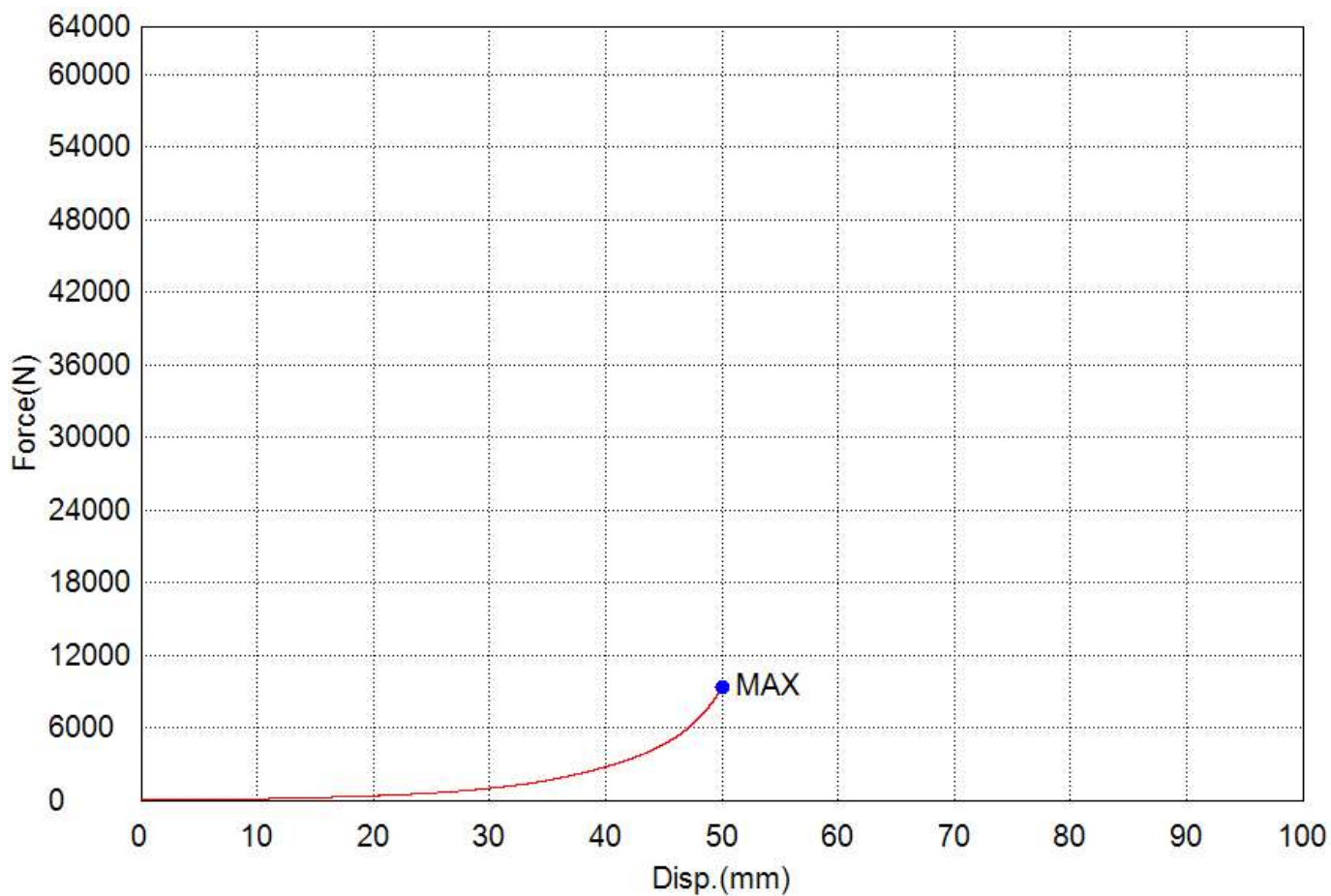


// ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΥΜΠΑΓΟΥΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 10: ΑΤΗΜ 6823

ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 05.11.2022

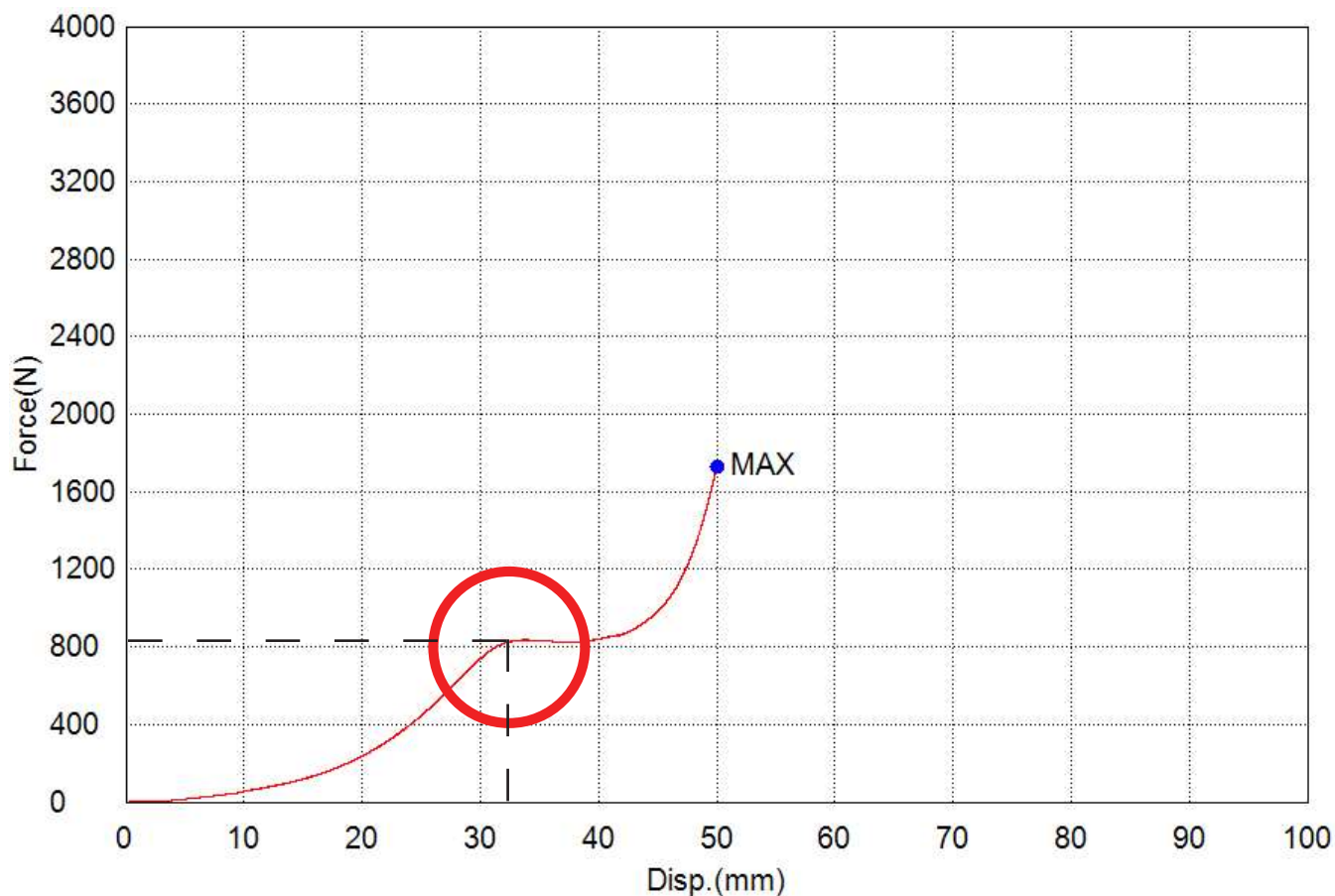
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1 _ 1	9303,98	1,45375	50,0144	76,9452



# // ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΕΝΗΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 12: ΑΤΗΜ 6570  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 14.12.2022

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1 _ 1	1730,54	0,27040	50,0144	76,9452

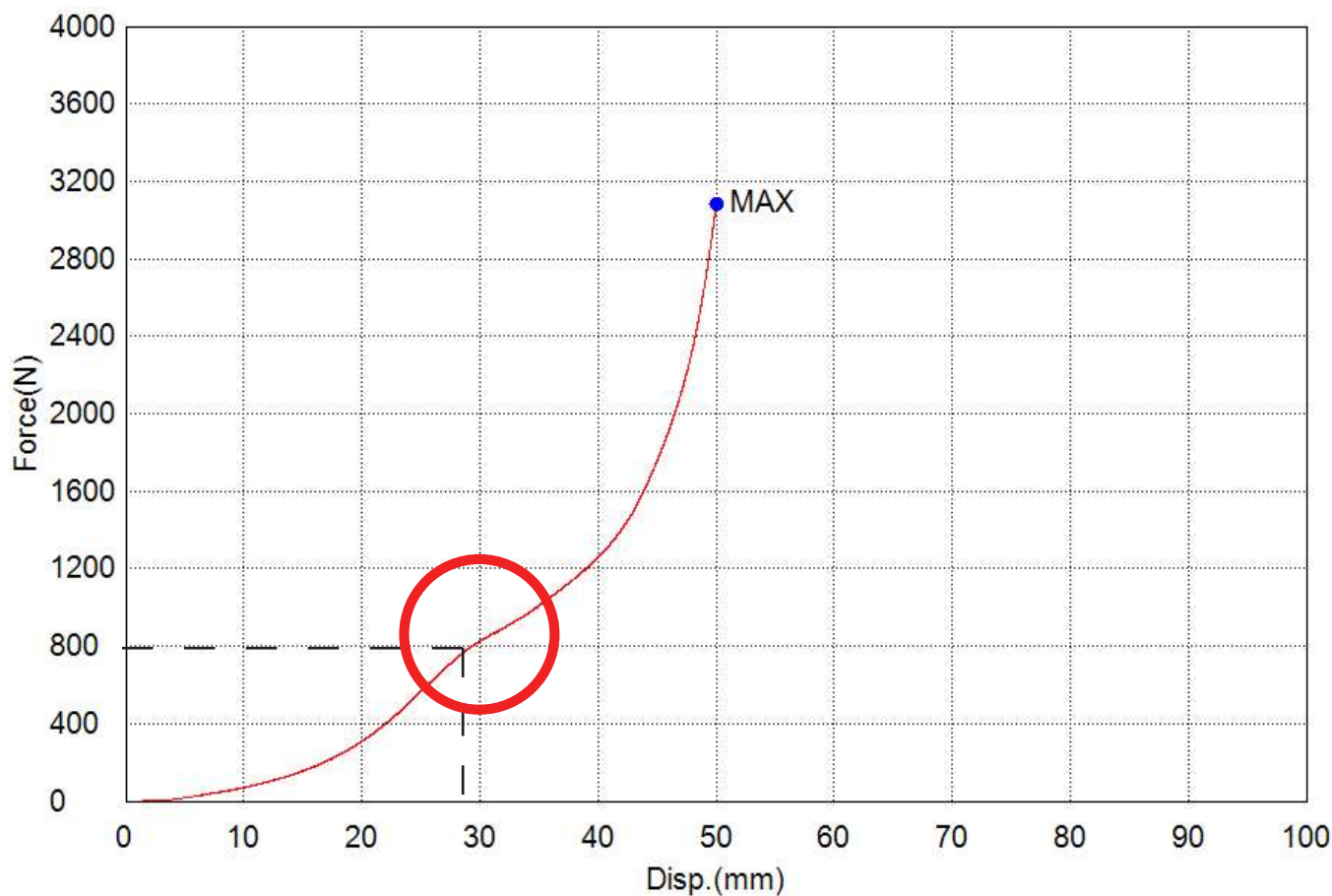




// ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΕΝΗΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 13: ΑΤΗΜ 6570

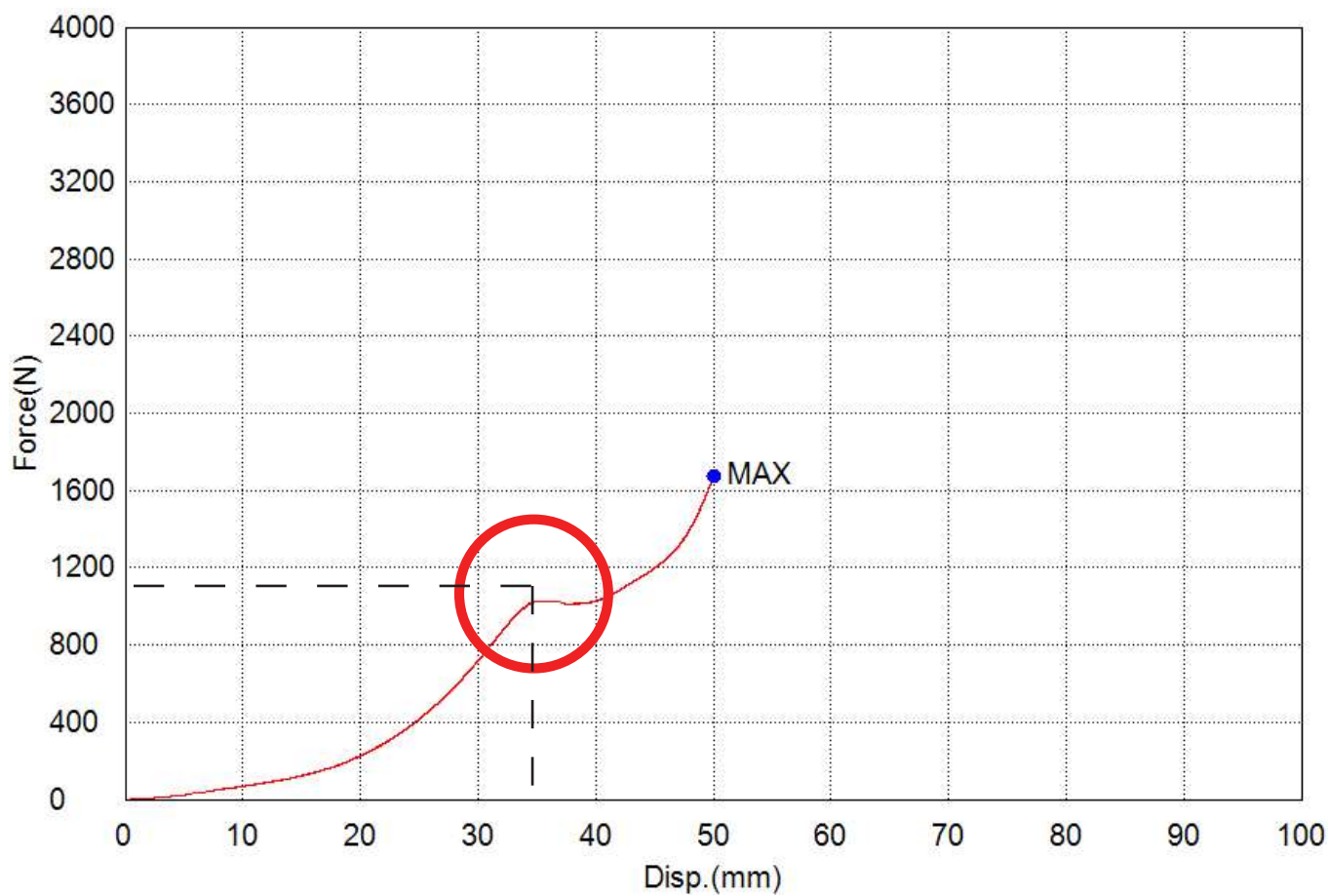
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	3081,18	0,48143	50,0144	76,9453



# // ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΕΝΗΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 14: ΑΤΗΜ 6570  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 09.01.2023

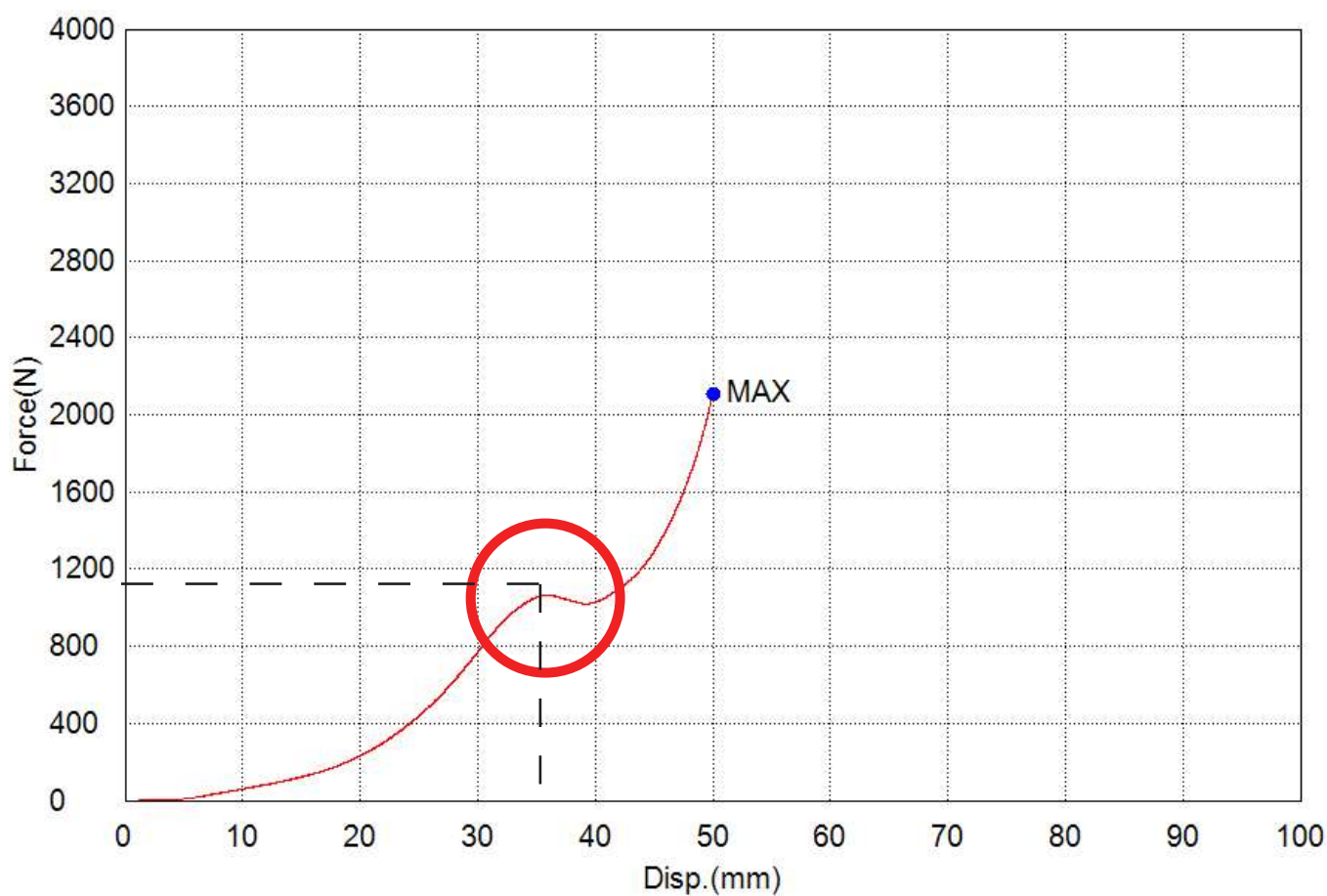
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	1676,58	0,26196	50,0064	76,9329



// ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΕΝΗΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 15: ΑΤΗΜ 6823  
 ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 16.01.2023

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	2111,79	0,32997	50,0144	76,9452

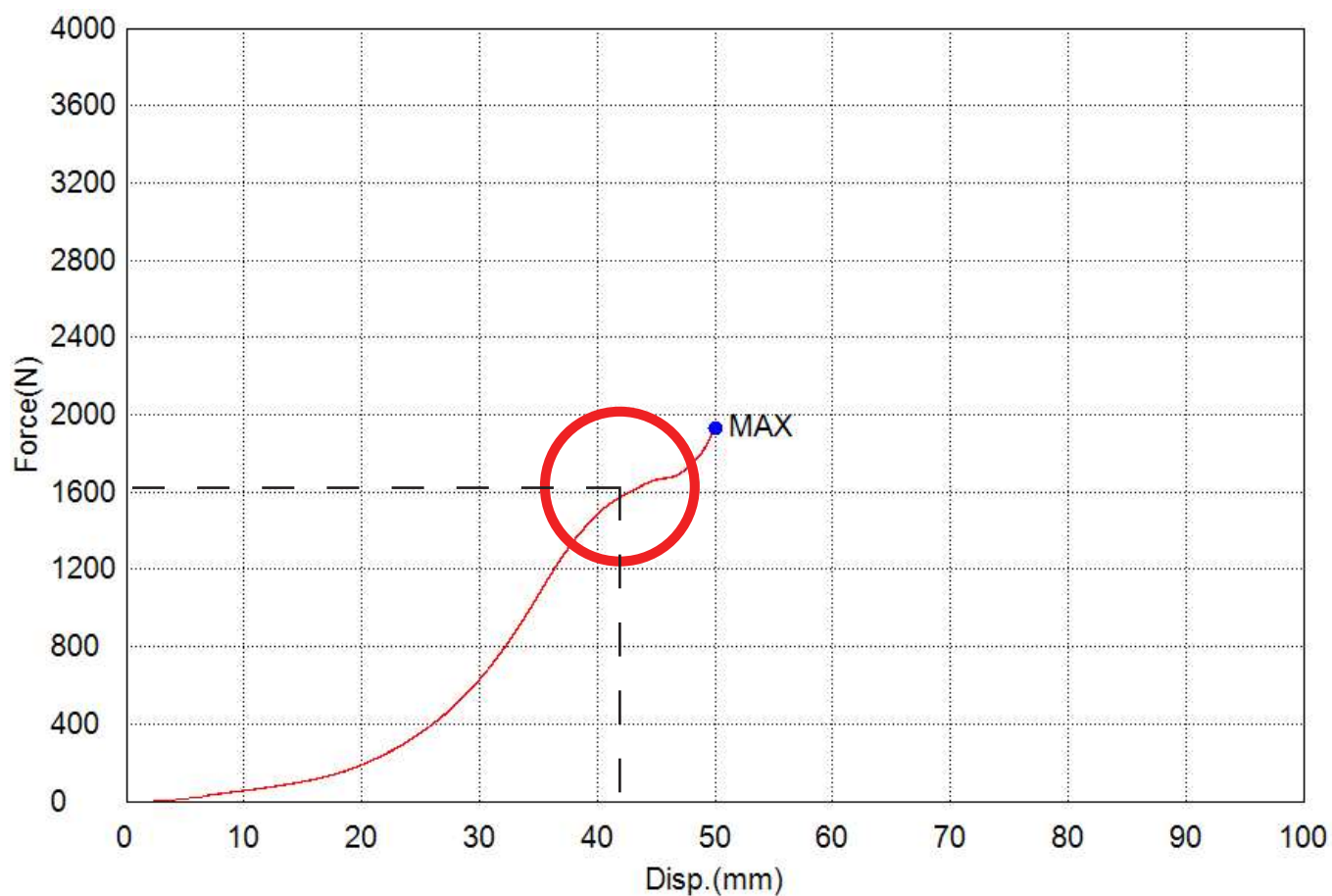




# // ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΕΝΗΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 16: ΑΤΗΜ 6823  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 20.12.2022

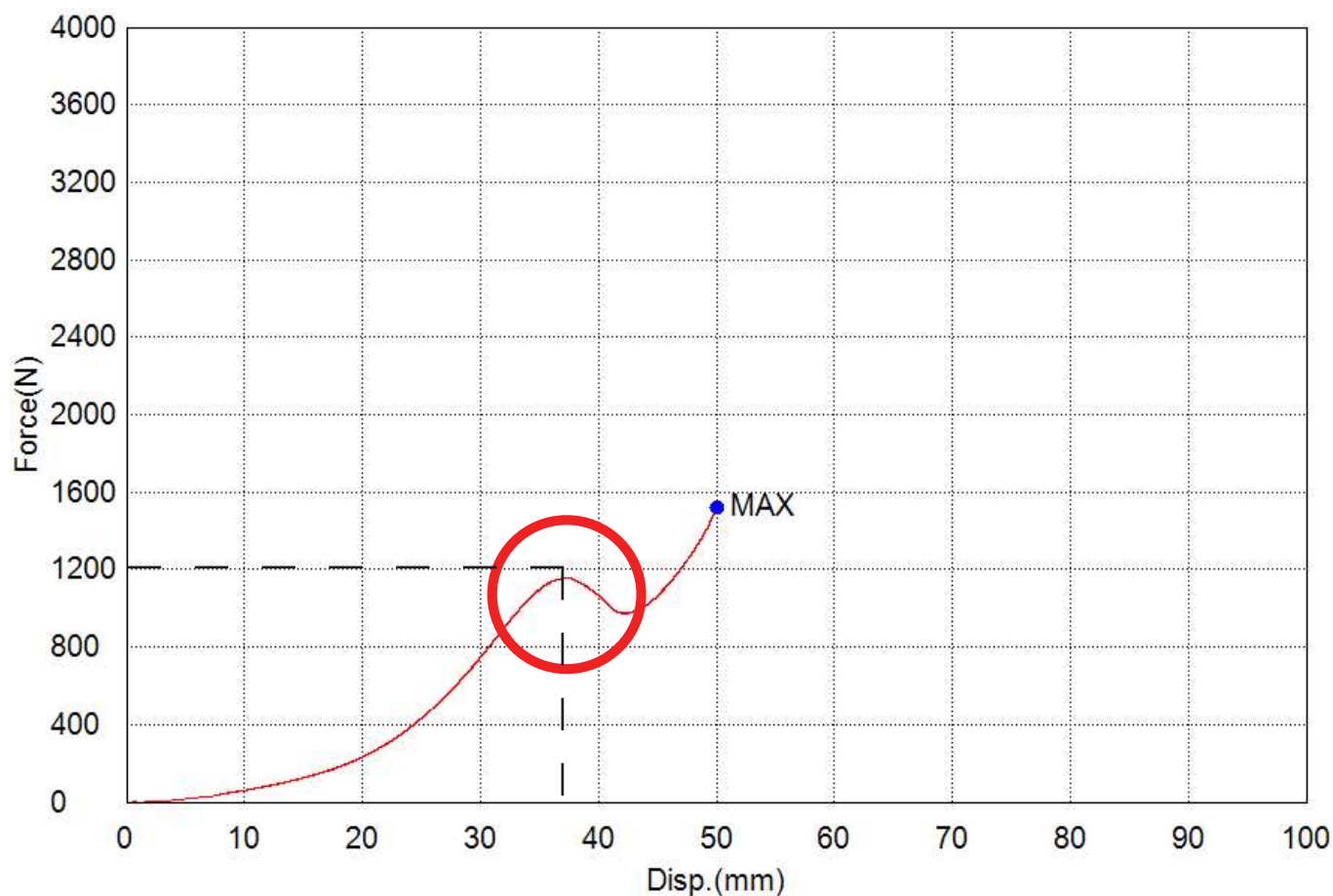
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	1932,64	0,30197	50,0105	76,9392



# // ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΕΝΗΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 17:                   ATHUM 6570  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ:   09.01.2023

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	1518,93	0,23733	50,0144	76,9452

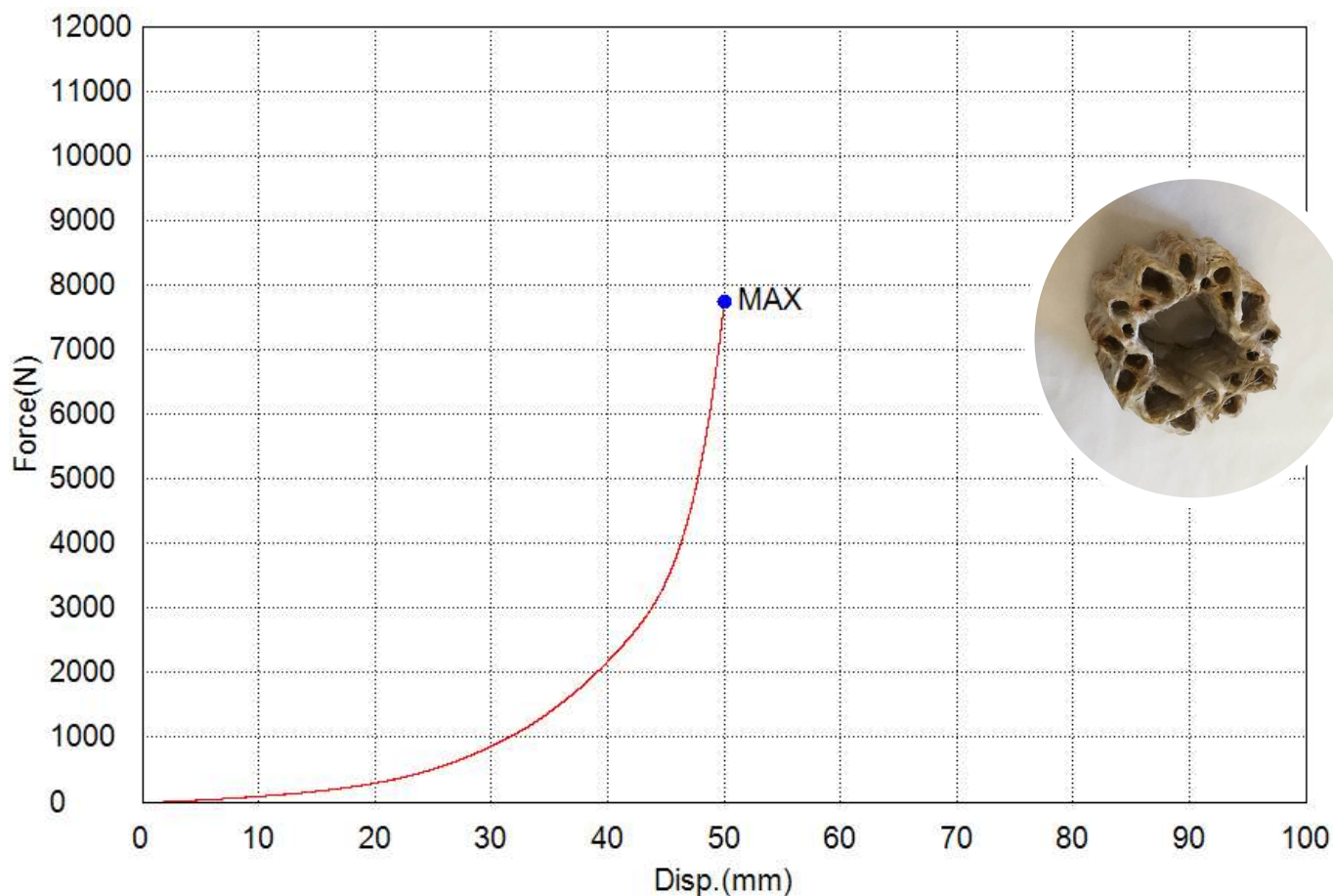


## // ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΕΝΗΣ ΠΛΕΞΗΣ

### ΔΟΚΙΜΙΟ 18: ΑΤΗΜ 6823 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΠΛΕΞΗ

Εδώ όπως φαίνεται στο διάγραμμα, δεν εμφανίζεται το φαινόμενο του λυγισμού σε αντίθεση με τα υπόλοιπα δοκίμια κενής πλέξης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός που το δοκίμιο είχε μεν κενό εσωτερικά, τα νεύρα όμως είχαν διαφορετική διαμόρφωση με αποτέλεσμα το δοκίμιο να αντιστέκεται στη δύναμη παραμόρφωσης με ανάλογο τρόπο με αυτόν των δοκιμίων συμπαγούς πλέξης (εικόνα).

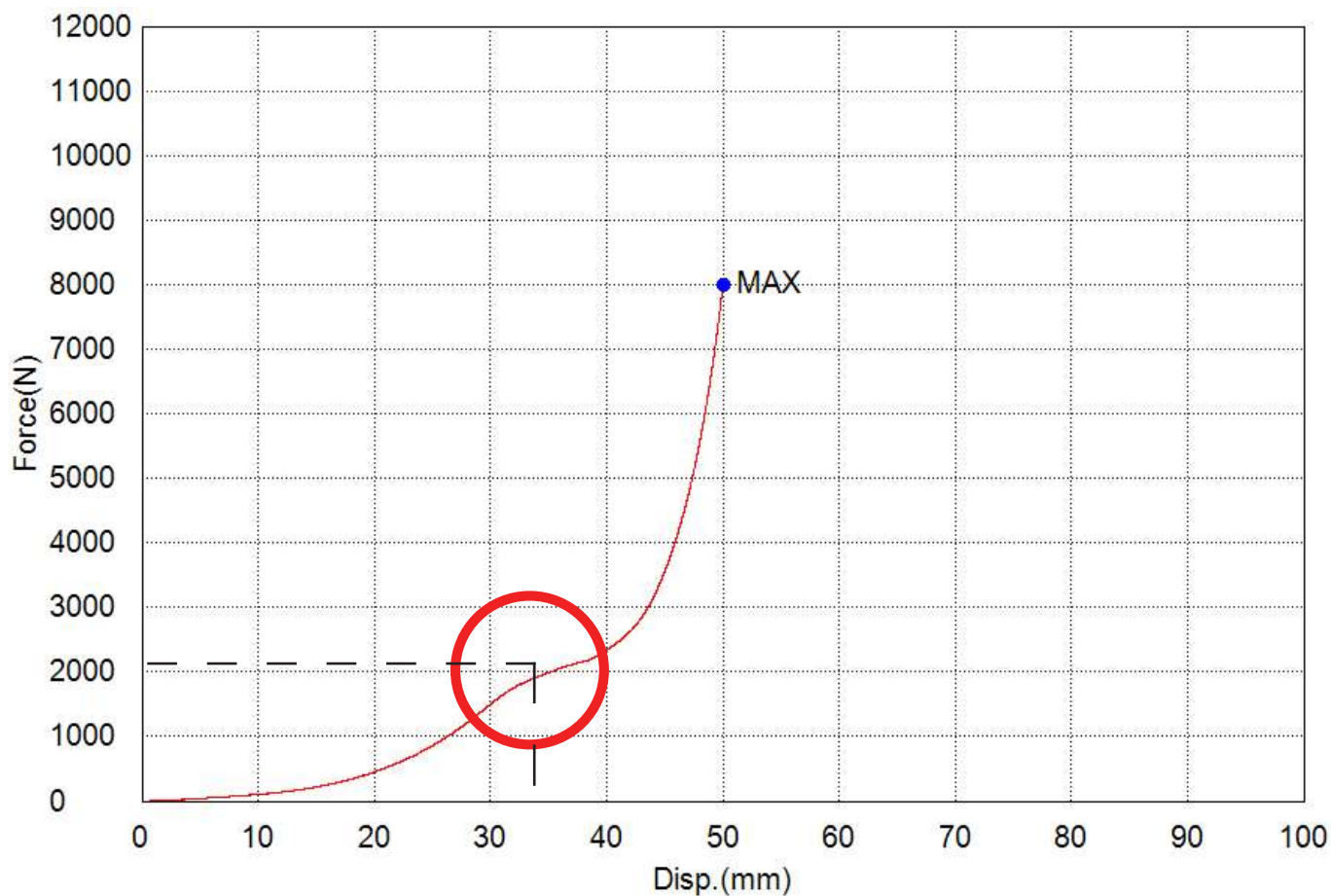
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	7730,88	1,20795	50,0144	76,9452



# // ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΕΝΗΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 19: ΑΤΗΜ 6570

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	8002,19	1,25034	50,0144	76,9452





# // ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΕΝΗΣ ΠΛΕΞΗΣ

ΔΟΚΙΜΙΟ 20: ΑΤΗΜ 6823  
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΜΟΥ: 20.12.2022

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	1227,86	0,19185	50,0144	76,9452

