



Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης και Εφαρμογής Δράσεων
στους τομείς Έρευνας, Τεχνολογικής Ανάπτυξης και Καινοτομίας

**ΕΝΙΑΙΑ ΔΡΑΣΗ ΚΡΑΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ
ΕΡΕΥΝΑΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
& ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ**

ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

Πρώτη Ενδιάμεση Έκθεση

**Κωδικός
Έργου:**

T1ΕΔΚ-04775

**Τίτλος
Έργου:**

Σχεδιασμός και ανάπτυξη ενός καινοτόμου τρισδιάστατου
εκτυπωτή κτηρίων και υποδομών - Ακρωνύμιο: 3BUILD



ΕΠΑνεΚ 2014-2020
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



1. Φυσικό Αντικείμενο

1.1 Αντικείμενο του έργου

Ο σκοπός του έργου 3BUILD είναι η ανάπτυξη ενός καινοτόμου τρισδιάστατου εκτυπωτή κονιάματος ικανού να δομήσει κτήρια μικρών ή μεγάλων διαστάσεων οποιουδήποτε μεγέθους και πολυπλοκότητας με χρήση ειδικά αναπτυγμένων για τον σκοπό αυτό κονιαμάτων με ή χωρίς ενίσχυση. Το ερευνητικό έργο χωρίζεται σε 5 βήματα τα οποία εμπεριέχονται σε αντίστοιχες ενότητες εργασίας (E.E.). Οι στόχοι και η πρόοδος των ΕΕ περιγράφονται ακολούθως. Η παρούσα έκθεση περιγράφει την πρόοδο του έργου μέχρι την 31/1/2020 (19^{ος} μήνας).

E.E.1.

Ως πρώτο βήμα της ακολουθούμενης μεθοδολογίας για την επίτευξη του σκοπού του έργου, πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της ενότητας εργασίας **E.E.1** έρευνα των υπάρχουσών λύσεων της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η έρευνα αυτή αποτελεί το πλαίσιο σύγκρισης και αναφοράς του παρόντος ερευνητικού έργου καθώς έδωσε μία ολοκληρωμένη εικόνα του τρέχοντος τεχνολογικού επιπέδου των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Παρουσιάστηκε, κατά πρώτον, η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης με εξώθηση σκυροδέματος, η οποία αποτελεί μία από τις κυρίαρχες μεθόδους εκτύπωσης σε παγκόσμιο επίπεδο. Στην μέθοδο αυτή η κατασκευή πραγματοποιείται με ελεγχόμενη εναπόθεση ειδικού τσιμεντοειδούς μείγματος, το οποίο τροφοδοτείται μέσω άντλησης και εναποτίθεται με τη μορφή συνεχούς νήματος δια μέσω ακροφυσίου τοποθετημένου σε κατάλληλο σύστημα στήριξης. Παρουσιάστηκαν τα υλικά του μείγματος εξώθησης και οι απαιτούμενες ιδιότητες του, καθώς και οι απαιτήσεις του σκληρυμένου υλικού. Οι υπάρχουσες παραλλαγές υλοποίησης της μεθόδου ταξινομούνται κυρίως σε πέντε κατηγορίες με βάση τις χρησιμοποιούμενες διατάξεις ως ακολούθως:

- Τύπου Gantry (γερανογέφυρες)
- Ρομπότ καλωδίων (cable-suspended platforms)
- Κατασκευή με εκτυπωτές σμήνους (swarm approach)
- Αυτοματοποιημένες διατάξεις πολλαπλών χρήσεων (multi-purpose robotics & automated assembly)
- Συστήματα πτυσσόμενης αυτοσυναρμολόγησης (folding self-assembly)

Κατά δεύτερον, παρουσιάστηκε η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης κλίνης σωματιδίων, η οποία επίσης αποτελεί αντικείμενο ενεργούς έρευνας. Στην μέθοδο αυτή η κατασκευή πραγματοποιείται σε διαδοχικά στρώματα με βάση τρισδιάστατα σχέδια, επιτρέποντας μεγάλη ελευθερία στην επιλογή του σχήματος της υπό κατασκευής δομής. Δόθηκε περιγραφή των κατηγοριών της μεθόδου, των χρησιμοποιούμενων υλικών, των κύριων πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της μεθόδου, καθώς και των μελλοντικών τάσεων.

Δόθηκε, επίσης, συνοπτική περιγραφή άλλων τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης μικρότερης ευρύτητας όπως η στερεολιθογραφία, η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση μέσω λείζερ και η μέθοδος απόθεσης τήγματος. Επιπρόσθετα έγινε επισκόπηση των σημαντικότερων δραστηριοτήτων τρισδιάστατης εκτύπωσης κατασκευών τόσο όσον αφορά τις ερευνητικές δραστηριότητες αλλά και τις κύριες εμπορικές υλοποιήσεις στην κατασκευή εκτυπωτών.

Τέλος, αναπτύχθηκε μεθοδολογία αξιολόγησης των διαφόρων τεχνικών της μεθόδου τρισδιάστατης εκτύπωσης με εξώθηση σκυροδέματος η οποία αποτελεί και την σημαντικότερη μέθοδο. Συντάχθηκε μία σειρά παραμέτρων με στόχο την ποιοτική αλλά και ποσοτική αξιολόγηση των διαφόρων υλοποιήσεων της μεθόδου. Ένα παράδειγμα αξιολόγησης των κατηγοριών της μεθόδου τρισδιάστατης εκτύπωσης με εξώθηση σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας κατάλληλα ζυγισμένες παραμέτρους αξιολόγησης, παρουσιάζεται στον πίνακα I, με βάση την βαθμολόγηση από τους εταίρους του έργου

Η E.E.1 ολοκληρώθηκε επιτυχώς και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στο παραδοτέο Π1.

Παράμετροι	Βάρος %	Gantry	Cable	Swarm	Robotics	Folding
Κόστος μεταφοράς	10%	3	3	4	4	5
Κινητικότητα	10%	3	3	5	3	4
Σταθερότητα	10%	5	4	3	4	5
Ταχύτητα εκτύπωσης	10%	4	3	3	4	1
Επιφάνεια εκτύπωσης	10%	3	4	5	3	3
Τεχνολογική ωριμότητα	25%	4	4	1	4	1
Κόστος εκτύπωσης	25%	3	3	3	3	3
Βαθμολογία		3.55	3.45	3.00	3.55	2.80

Πίνακας Ι: Αξιολόγηση τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης.

E.E.2

Το δεύτερο βήμα στην παρούσα έρευνα είναι ο σχεδιασμός, η μελέτη και η ανάπτυξη κονιαμάτων κατάλληλων για τρισδιάστατη εκτύπωση, αποτελώντας το αντικείμενο της E.E.2, η οποία και ολοκληρώθηκε.

Στα πλαίσια περιγραφής των τεχνικών προδιαγραφών του κονιάματος, αναλύθηκε η πολυπλοκότητα της φυσικοχημικής συμπεριφοράς των κονιαμάτων και το μέγεθος της πρόκλησης που συνιστά ο σωστός σχεδιασμός τους. Τονίστηκε η σημασία της ανάγκης εκτέλεσης μεγάλης σειράς εργαστηριακών δοκιμών για τον χαρακτηρισμό ενός ευρέως φάσματος ιδιοτήτων, από μηχανικές ιδιότητες, όπως αντοχές σε θλίψη, κάμψη, εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας, πρόσφυσης, κλπ, έως και ιδιότητες φρέσκου κονιάματος όπως, ρεολογία, θιξοτροπία, ταχύτητα πήξης, συρρίκνωση, αεροπεριεκτικότητα, κ.α, που άμεσα επηρεάζουν την αντλησιμότητα του κονιάματος και την δυνατότητα ανέγερσης. Διαπιστώθηκε ότι οι τυποποιημένες δοκιμές βάση ευρωπαϊκών προτύπων εξασφαλίζουν την ποιότητα του 3D κονιάματος αλλά δεν είναι αρκετές για την πλήρη ανάπτυξή του. Η ΣΙΚΑ ανέπτυξε εσωτερικά επιπρόσθετες μη-πρότυπες μεθόδους για την συνεχή παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της εξέλιξης σημαντικών ιδιοτήτων των υλικών εκτύπωσης από την αρχική ανάμιξή τους μέχρι και μέρες μετά την εκτύπωση.

Για την επίτευξη των καταλλήλων πρώιμων ιδιοτήτων ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο ρόλος των χημικών προσθέτων όπως ρευστοποιητές, επιβραδυντές, θιξοτροπικοί παράγοντες και ειδικό επιταχυντές. Οι κατάλληλοι συνδυασμοί επιταχυντών που έχουν αναπτυχθεί για την πήξη «κατά παραγγελία» (setting on demand) σε συνδυασμό με τα ειδικά σχεδιασμένα προϊόντα οδηγούν στην σύνθεση ειδικών τσιμεντοκονιαμάτων ικανών για την ταχεία εναπόθεση επάλληλων στρώσεων καθ' ύψος. Η σύνδεση μεταξύ των ρεολογικών ιδιοτήτων και της αντλησιμότητας έγινε εφικτή με ειδικά ρεόμετρα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Έμφαση δόθηκε στον ρόλο της συρρίκνωσης. Προκειμένου να μετρηθεί η εξέλιξη της από την αρχή της διαδικασίας πήξης, η ΣΙΚΑ ανέπτυξε μια ειδική μέθοδο δοκιμής ιδιαίτερα χρήσιμη για τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των διαφορετικών συνταγών κονιαμάτων που προορίζονται για τρισδιάστατη εκτύπωση (εικόνα 1), καθώς επιτρέπει τον ποσοτικό προσδιορισμό της εξέλιξης της συρρίκνωσης κατά τις πρώτες 24 ώρες. Ακόμα, για την επίτευξη επαρκούς καμπτικής αντοχής συνίσταται η χρήση ινών μαζί με τον προσεκτικά σχεδιασμό του εκτυπωμένου δοκιμίου. Τέλος δεδομένου ότι το κονίαμα τρισδιάστατης εκτύπωσης που θ' αναπτυχθεί στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος αποσκοπεί στην κατασκευή κτιρίου, κρίσιμος είναι ο ρόλος των δοκιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του εκτυπωμένου κονιάματος, όπως και των δοκιμών μέτρησης πρόσφυσης. Η αναφορά των τεχνικών προδιαγραφών των κονιαμάτων εκτύπωσης αποτελεί το αντικείμενο του παραδοτέου Π2.

Για την επίτευξη των στόχων της E.E.2 η ΣΙΚΑ δημιούργησε ένα ειδικό εργαστήριο πλήρως αφιερωμένο στην ανάπτυξη και την εκτύπωση των κονιαμάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης. Κύρια στοιχεία αποτελούν η αντλία συνεχούς άντλησης και μεγάλος εργαστηριακός 3D εκτυπωτής (WASP 40100 της DELTA). Ο εμπορικός αυτός εκτυπωτής μπορεί να εκτυπώσει δοκίμια με μέγιστες διαστάσεις 40 cm διαμέτρου και ύψους 100 cm και να φτάσει ταχύτητες εκτύπωσης μέχρι 150 mm/s, με μέγιστο βάρος των εκτυπωμένων στοιχείων τα 50 kg.



Εικόνα 1 : Συσκευή μέτρησης πρώιμης συρρίκνωσης της Sika σε πρίσματα 40x40x160 cm.

Αξιοποιώντας την αναπτυχθείσα εργαστηριακή υποδομή μελετήθηκαν οι αρχές που διέπουν την τρισδιάστατη εκτύπωση κονιαμάτων και αναπτύχθηκαν τσιμεντοειδή κονιάματα για την τρισδιάστατη εκτύπωση δοκιμών μικρής, μέτριας και μεγάλης εργαστηριακής κλίμακας. Μελετήθηκαν και καθορίστηκαν οι διαδικασίες για την αποδοτική τρισδιάστατη εκτύπωση σε εργαστηριακή κλίμακα, και με λεπτομερείς μετρήσεις καθορίστηκαν οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των εναλλακτικών κονιαμάτων 3D, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που καθορίστηκαν στην ενότητα ΕΕ1. Μελετήθηκαν επίσης οι διαδικασίες κλιμάκωσης της 3D εκτύπωσης ως προετοιμασία για την συνέχιση της έρευνας 3D εκτύπωσης σε πιλοτική κλίμακα και στη συνέχεια σε πραγματική κλίμακα. Τα αποτελέσματα της έρευνας εμπεριέχονται στο παραδοτέο Π3.



Εικόνα 2: Εργαστηριακός εκτυπωτής 3D του εργαστηρίου της ΣΙΚΑ.

Ε.Ε.3

Τρίτο στάδιο του ερευνητικού έργου αποτελεί το περιεχόμενο της Ε.Ε.3, η οποία έχει στόχο την ανάλυση και τον σχεδιασμό δύο διατάξεων εκτύπωσης. Η πρώτη διάταξη είναι ημίσειας κλίμακας για την πραγματοποίηση προκαταρκτικών πειραμάτων, ενώ η δεύτερη διάταξη είναι πλήρους κλίμακας. Η Ε.Ε.3 βρίσκεται σε εξέλιξη με έμφαση στην παρούσα φάση την διάταξη της ημίσειας κλίμακας. Η διάταξη αποτελείται από ρομπότ του Εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών με διευθυντή τον Καθηγητή Δρ. Ιωάννη Αντωνιάδη (επιστημονικός υπεύθυνος του έργου). Πραγματοποιήθηκε αναπροσαρμογή του καρτεσιανού ρομπότ με αντικατάσταση του

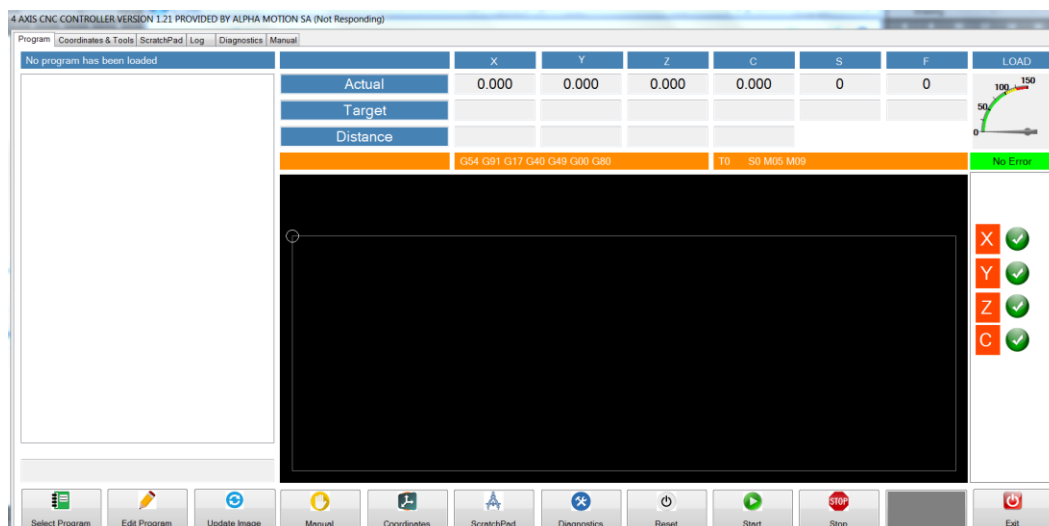
υδραυλικού συστήματος κίνησης. Το αναπροσαρμοσμένο ρομπότ που χρησιμοποιείται στις έως τώρα δοκιμές εκτυπώσεων φαίνεται στην Εικόνα 3.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν εργασίες ανάπτυξης λογισμικού διεπιφάνειας χρήστη και ρομπότ για τον έλεγχο του ρομπότ (αρχικοποίηση κεφαλής, φόρτωση και οπτικοποίηση κώδικα προσθετικής κατεργασίας (G-code), χειρισμός ρομπότ). Στην Εικόνα 4 φαίνεται η αρχική οθόνη του λογισμικού διεπαφής χρήστη – μηχανής.

Επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε προμήθεια και δοκιμή αντλίας κονιαμάτων. Προκειμένου για τη χρήση του συστήματος σε ολοκληρωμένο αυτοματοποιημένο σύστημα τρισδιάστατου χτισίματος, ο κινητήρας της αντλίας περιλαμβάνει ρύθμιση στροφών με χρήση inverter ώστε να μπορεί να συνδεθεί στο κεντρικό PLC ελέγχου του ρομπότ της ημίσειας κλίμακας.



Εικόνα 3: Καρτεσιανό ρομπότ Εργαστηρίου Δυναμικής & Κατασκευών ΕΜΠ, εν ώρα λειτουργίας για το πρόγραμμα 3BUILD



Εικόνα 4: Αρχική οθόνη λογισμικού διεπαφής χρήστη – μηχανής



Εικόνα 5: Αντλία ΕΜΠ – 3BUILD

Τέλος, πραγματοποιήθηκε σειρά εκτυπώσεων στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο του Εργαστηρίου Δυναμικής & Κατασκευών του ΕΜΠ. Συνοψίζοντας τις εργασίες σε υπό – ενότητες:

1. Έλεγχος γεωμετρίας ακροφυσίου εκτύπωσης. Έχει υπάρξει εκτενής βιβλιογραφική αναφορά στη γεωμετρία του άκρου έγχυσης του κονιάματος κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση. Η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ προχώρησε στην κατασκευή και δοκιμή ποικιλίας γεωμετριών ακροφυσίων κατά τις δοκιμαστικές εκτυπώσεις.
2. Δοκιμαστικές εκτυπώσεις με παραμέτρους την ταχύτητα κίνησης των αξόνων Χ,Υ, το πάχος της στρώσης (μετακίνηση άξονα Ζ ανά στρώση υλικού), την ταχύτητα εξώθησης και την περιεκτικότητα σε αδρανή και νερό του σκυροδέματος.
3. Κατασκευή τρίοδης βάνας για τον καθαρισμό του συστήματος της αντλίας. Παρατηρήθηκε εκτενές πρόβλημα στην αντλία κατά τις πρώτες δοκιμαστικές εκτυπώσεις, όπου είτε λόγω «πήξης» του κονιάματος, είτε του απαιτούμενου χρόνου πλήρωσης της γραμμής τροφοδοσίας είτε κατά τη λήξη της εκτύπωσης, το λύσιμο και ο καθαρισμός της αντλίας έπρεπε να γίνει με μεγάλη ταχύτητα ώστε να μην προλάβει το κονίαμα να στερεοποιηθεί και να υπάρξει καταστροφή τμήματος του συστήματος.
4. Δημιουργήθηκε ολόκληρο πρωτόκολλο για εσωτερική χρήση για την πλήρη διαδικασία χρήσης του εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας, που περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες από την προετοιμασία του δείγματος και του χώρου εκτύπωσης μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας και τον καθαρισμό/ συντήρηση του εξοπλισμού και απόρριψη των απορριμμάτων. Το πρωτόκολλο αυτό περιλαμβάνει την ενασχόληση προσωπικού τεσσάρων (4) ατόμων και μπορεί εύκολα να επεκταθεί και στην διαδικασία της εκτύπωσης πλήρους κλίμακας ακόμα και με ισάριθμο προσωπικό και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την πλήρη αποτύπωση του χώρου εκτύπωσης και του περιβάλλοντα χώρου, διάκριση εργασιών και αρμοδιοτήτων και πρωτόκολλο διαχείρισης αστοχιών/ παύσης της εκτύπωσης.

Παραδείγματα δοκιμαστικών εκτυπώσεων του εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας παρουσιάζονται στην εικόνα 6.

Η Ε.Ε.3 θα ολοκληρωθεί τον 24ο μήνα και τα αποτελέσματά της θα περιέχονται στα παραδοτέα Π6 (Αναφορά κατασκευής διάταξης τρισδιάστατης εκτύπωσης ημίσειας κλίμακας και αναφορά λειτουργίας) και Π7 (Αναφορά κατασκευής διάταξης πλήρους κλίμακας και αναφορά λειτουργίας).



Εικόνα 6: Στιγμιότυπα εκτυπώσεων εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας

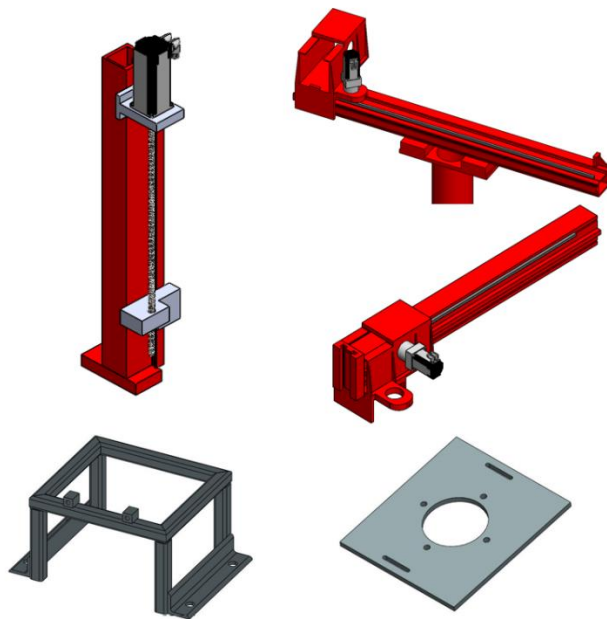
E.E.4

Η κατασκευή των διατάξεων ημίσειας και πλήρους κλίμακας αποτελεί το τέταρτο βήμα της εργασίας και αποτελεί την E.E.4. Πρώτο βήμα της E.E.4 στο πλαίσιο του χρονοδιαγράμματος του

έργου είναι η κατασκευή της διάταξης ημίσειας κλίμακας, η οποία ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Λεπτομερής αναφορά της κατασκευής και λειτουργίας δίνεται στο παραδοτέο Π6, όπου περιέχεται και αναφορά για την παρελκόμενη δοκιμαστική διάταξη “Turn Table”(εικόνα 7). Συνοπτικά, μελετήθηκαν και κατασκευάστηκαν εξαρτήματα και διατάξεις (εικόνα 8) , τα οποία κατόπιν ποιοτικού και λειτουργικού ελέγχου τοποθετήθηκαν σε διάταξη ρομποτικού βραχίονα. Επιπλέον σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μία πλήρως λειτουργική διάταξη δοκιμών με την ονομασία “Turn Table”, για λόγους διευκόλυνσης της έρευνας των παραμέτρων εκτύπωσης κονιάματος. Η κατασκευή της διάταξης πλήρους κλίμακας θα αποτελέσει το αντικείμενο της επόμενης ερευνητικής περιόδου που για την Ε.Ε.4 ολοκληρώνεται τον 30ο μήνα.



Εικόνα 7: Διάταξη “Turn Table” ολοκληρωμένη και λειτουργική στο ΕΣΜ – ΕΜΠ



Εικόνα 8: Παραδείγματα σχεδιασμένων μερών των διατάξεων εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας και “Turn Table” από την Δ. Αλμπάνη

Ε.Ε.5

Τελικό βήμα του παρόντος ερευνητικού έργου θα αποτελέσει η κατασκευή δοκιμίων ημίσειας και πλήρους κλίμακας. Το στάδιο αυτό συνιστά το αντικείμενο της Ε.Ε5 και θα ολοκληρωθεί τον 36ο μήνα του έργου.

1.2 Αναλυτική Περιγραφή των Ενοτήτων Εργασιών (Ε.Ε.) που υλοποιήθηκαν

α/α ΕΕ	1	Μήνας Έναρξης	1	Μήνας Λήξης	4
Τίτλος Ενότητας Εργασίας	Μελέτη υπαρχουσών λύσεων - ανάλυση του state of the art				
Κατηγορία Δραστηριότητας	ΒΙΕ: Βιομηχανική Έρευνα (Άρθρο 25)				
Υπεύθυνος Ε.Ε. (Φορέας)	TITAN				
Φορείς Εκτέλεσης	ΕΜΠ, ΣΙΚΑ, TITAN				
Περιγραφή Ενότητας Εργασίας	Η Ε.Ε1 έχει στόχο τον καθορισμό των προδιαγραφών σχεδιασμού των συστημάτων της τελικής διάταξης. Στα πλαίσια της θα πραγματοποιηθεί έρευνα υπαρχουσών λύσεων της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης στον κατασκευαστικό τομέα (σε βιομηχανικό ή εργαστηριακό επίπεδο) και αξιολόγηση αυτών με κατασκευαστικές, δομικές και λειτουργικές παραμέτρους. Μέσω της έρευνας των πραγματοποιηθέντων έργων θα προκύψουν συμπεράσματα αναφορικά με τα παραγόμενα κτήρια και θα τεθούν τα προσδοκώμενα αποτελέσματα. Στόχος της παραπάνω μελέτης είναι η αναγνώριση των τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να προσδώσουν συγκριτικό πλεονέκτημα στην διάταξη έναντι των υπαρχουσών.				
Παραδοτέα	Π.1: Αναφορά διερεύνησης υπαρχουσών τεχνολογιών και κατάρτιση πινάκων αξιολόγησης αυτών με βάση τα τεθέντα κριτήρια και επιλογή τεχνολογίας υλοποίησης				
Ανάλυση της Πορείας Υλοποίησης της ΕΕ Αναμενόμενα Αποτελέσματα – Οφέλη Κάθε Φορέα	Η Ε.Ε.1 ολοκληρώθηκε επιτυχώς και τα αποτελέσματα του έργου παρουσιάζονται στο παραδοτέο Π1. Πραγματοποιήθηκε έρευνα των υπαρχουσών λύσεων της τεχνολογίας και δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στις δύο κύριες κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης για κτιριακές δομές, την εξώθηση σκυροδέματος και την εκτύπωση κλίνης σωματιδίων. Παρουσιάστηκαν οι κύριες μέθοδοι κάθε κατηγορίας, τα υλικά του μείγματος εκτύπωσης και οι απαιτούμενες ιδιότητές τους. Επιπρόσθετα εντοπίστηκαν και παρουσιάστηκαν οι κύριες ερευνητικές δραστηριότητες σε παγκόσμιο επίπεδο με μεγάλο αντίκτυπο στον χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης κατασκευών, ενώ έγινε μία κριτική επισκόπηση των κύριων παραγωγών τρισδιάστατων εκτυπωτών κατασκευών. Τέλος αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία αξιολόγησης των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης και δόθηκε παράδειγμα ποσοτικοποιημένης αξιολόγησης για την επικρατέστερη μέθοδο εξώθησης σκυροδέματος.				
Παραεκκλίσεις	Η Ενότητα Εργασίας 1 ολοκληρώθηκε εγκαίρως και χωρίς παραεκκλίσεις.				

α/α ΕΕ	2	Μήνας Έναρξης	2	Μήνας Λήξης	18
Τίτλος Ενότητας Εργασίας	Σχεδιασμός και ανάπτυξη κονιαμάτων κατάλληλων για τρισδιάστατη εκτύπωση				
Κατηγορία Δραστηριότητας	ΒΙΕ: Βιομηχανική Έρευνα (Άρθρο 25)				
Υπεύθυνος Ε.Ε. (Φορέας)	ΣΙΚΑ				
Φορείς Εκτέλεσης	ΣΙΚΑ, ΤΙΤΑΝ, ΕΜΠ				
Περιγραφή Ενότητας Εργασίας	Η Ε.Ε2 έχει στόχο τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη των κονιαμάτων της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Για τον στόχο αυτό θα πρέπει να προσδιοριστούν οι απαραίτητες παράμετροι που πρέπει το κονίαμα να πληρεί. Αυτές αφορούν στους χρόνους προετοιμασίας και πήξης του κονιάματος, στην συνεκτικότητά του, στην ανάμιξη των συστατικών του, στην επίτευξη της επιθυμητής αντοχής του σκυροδέματος και στην διαστρωματική συνάφεια λαμβάνοντας υπόψιν πως η εκτύπωση γίνεται σε στρώματα.				
Παραδοτέα	Π.2: Αναφορά προδιαγραφών τελικού κονιάματος. Π.3: Αναφορά μηχανικών ιδιοτήτων τελικού κονιάματος (ή οικογένειας κονιαμάτων), χημικής σύστασης και λοιπών παραμέτρων (χρόνοι πήξης, παραγωγής, προετοιμασίας) και οδηγίες χρήσης				
Ανάλυση της Πορείας Υλοποίησης της ΕΕ Αναμενόμενα Αποτελέσματα – Οφέλη Κάθε Φορέα	Η Ε.Ε.2 ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Προσδιορίστηκαν οι τεχνικές προδιαγραφές των κονιαμάτων για τρισδιάστατη εκτύπωση, από τον ρεολογικό χαρακτηρισμό που απαιτείται για να μελετηθούν η εκτύπωσιμότητα και η δυνατότητα ανέγερσης των υλικών, μέχρι και τις εκτεταμένες μηχανικές αντοχές που περιγράφουν το εκτυπωμένο πλέον υλικό. Για την μελέτη των υλικών εκτύπωσης στα πολύ πρώιμα στάδια παραγωγής και εκτύπωσης, αναπτύχθηκαν ειδικές μέθοδοι δοκιμών που επιτρέπουν τις μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο κρίσιμων παραμέτρων για την τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως η πρώιμη συρρίκνωση και η εξέλιξη του ρυθμού πήξης και ανάπτυξης πρώιμων αντοχών. Η ΣΙΚΑ δημιούργησε στα πλαίσια του παρόντος έργου, ένα πλήρως εξοπλισμένο εργαστήριο μελέτης και υλοποίησης τρισδιάστατων εκτυπώσεων με σκοπό την ανάπτυξη κατάλληλων 3D κονιαμάτων και τον σχεδιασμό μεθόδων εκτύπωσης για τις ανάγκες του παρόντος έργου. Μελετήθηκε και καθορίστηκαν οι διαδικασίες για την αποδοτική τρισδιάστατη εκτύπωση σε εργαστηριακή κλίμακα, αναπτύχθηκαν εναλλακτικές τεχνολογίες κονιαμάτων, και μελετήθηκαν οι διαδικασίες κλιμάκωσης της εκτύπωσης που θα απαιτηθούν στα επόμενα στάδια του έργου.				
Παραεκκλίσεις	Η Ενότητα Εργασίας 2 ολοκληρώθηκε εγκαίρως και χωρίς παραεκκλίσεις.				

α/α ΕΕ	3	Μήνας Έναρξης	2	Μήνας Λήξης	24
Τίτλος Ενότητας Εργασίας	Σχεδιασμός, ανάλυση και προγραμματισμός τρισδιάστατου εκτυπωτή				
Κατηγορία Δραστηριότητας	ΒΙΕ: Βιομηχανική Έρευνα (Άρθρο 25)				
Υπεύθυνος Ε.Ε. (Φορέας)	ΕΜΠ				
Φορείς Εκτέλεσης	ΕΜΠ				

<p>Περιγραφή Ενότητας Εργασίας</p>	<p>Η Ε.Ε3 έχει στόχο την ανάλυση και τον σχεδιασμό της τελικής διάταξης πλήρους κλίμακας και μιας διάταξης ημίσειας κλίμακας για την πραγματοποίηση προκαταρκτικών πειραμάτων. Συνεπώς, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση και σχεδιασμός της κεφαλής εκτύπωσης και του σώματος της μηχανής, με την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων σχεδιασμού και επιλογή του συστήματος ελέγχου της κίνησης της κεφαλής εκτύπωσης με παραμέτρους όπως η ταχύτητα και η ακρίβεια των μετακινήσεών της. Επίσης θα πραγματοποιηθεί δημιουργία κατάλληλης μονάδας ελέγχου και λογισμικό επικοινωνίας μεταξύ χρήστη και μηχανής στα πρότυπα των λογισμικών CAD και CAM.</p>
<p>Παραδοτέα</p>	<p>Π.4: Φάκελος σχεδίων και τεχνική έκθεση υποσυστημάτων διάταξης πλήρους κλίμακας και ημίσειας κλίμακας Π.5: Αναφορά συστήματος ελέγχου διάταξης και λογισμικό διεπαφής</p>

**Ανάλυση της Πορείας
Υλοποίησης της ΕΕ
Αναμενόμενα
Αποτελέσματα –
Οφέλη Κάθε Φορέα**

Στην παρούσα φάση της εν εξελίξει Ε.Ε.3 η κύρια έμφαση δόθηκε στην διάταξη ημίσειας κλίμακας. Η διάταξη αυτή αποτελείται από καρτεσιανό ρομπότ τριών (3) αξόνων (X,Y,Z) του Εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών με διευθυντή τον Καθηγητή Δρ. Ιωάννη Αντωνιάδη (επιστημονικός υπεύθυνος του έργου). Πραγματοποιήθηκε σειρά εργασιών όπως η αναπροσαρμογή του ρομπότ, προμήθεια και δοκιμή αντλίας κονιαμάτων καθώς και δοκιμή του εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε αναπροσαρμογή του καρτεσιανού ρομπότ με αντικατάσταση του παλαιού υδραυλικού συστήματος κίνησης του ρομπότ με νέο σέρβο σύστημα ελεγχόμενο από βιομηχανικό ελεγκτή (PLC) που δύναται να ελέγχει ταυτόχρονα τέσσερις (4) σέρβο – κινητήρες. Για τους σέρβο – άξονες που ελέγχουν τους άξονες X και Y, πραγματοποιήθηκε προμήθεια αντίστοιχων μειωτήρων στροφών για την επαρκή ανάπτυξη ροπής και παραλαβής δυναμικών/ αδρανειακών φορτίων. Η αναπροσαρμογή επιτρέπει να προγραμματισθεί το ρομπότ και να πραγματοποιηθούν δοκιμές λειτουργίας (πραγματοποίηση κινήσεων σε τρεις άξονες, προσομοίωση 2,5D κατεργασιών προσθετικής κατασκευής αντικειμένων κλπ). Παράλληλα έγινε εγκατάσταση αισθητήρων θέσης και τερματικών διακοπών για τις διαδρομές των αξόνων, καθώς και ανασχεδιασμός του άξονα Z με σχεδιασμό, ανάλυση και μοντελοποίηση συστήματος τραπεζοειδούς κοχλία για την ανύψωση του άξονα Z. Επιπρόσθετα αναπτύχθηκε λογισμικό διεπιφάνειας χρήστη και ρομπότ για τον έλεγχο του ρομπότ (αρχικοποίηση κεφαλής, φόρτωση και οπτικοποίηση κώδικα προσθετικής κατεργασίας (G-code), χειρισμός ρομπότ). Πραγματοποιήθηκε επίσης προμήθεια αντλίας κονιαμάτων για λογαριασμό του ΕΜΠ στα πλαίσια του προγράμματος 3BUILD προκειμένου να πραγματοποιηθούν δοκιμαστικές εκτυπώσεις κονιαμάτων στον εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας από την ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ και συγκεκριμένα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών και της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ. Με χρήση της αντλίας, η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ προέβη σε σειρά δοκιμαστικών εγχύσεων σκυροδέματος με χρήση λεπτών αδρανών (άμμος διαμέτρου έως ~3mm και πρότυπη γαλλική άμμος) προκειμένου να χαρακτηριστεί η απόδοσή της κατά την έγχυση (χρόνοι λειτουργίας, περιεκτικότητα αδρανών κλπ) και να μετρηθεί η ογκομετρική της παροχή. Κατά τις δοκιμαστικές εκτυπώσεις δοκιμάστηκαν τριών ειδών εμπορικά φαιά κονιάματα και έτοιμα προϊόντα. Με την ολοκλήρωση των δοκιμαστικών εκτυπώσεων με την αντλία και των ενεργειών αναπροσαρμογής του εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας, πραγματοποιήθηκε σειρά εκτυπώσεων στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο του Εργαστηρίου Δυναμικής & Κατασκευών του ΕΜΠ. Κατά πρώτον, έγινε έλεγχος γεωμετρίας ακροφυσίου εκτύπωσης. Έχει υπάρξει εκτενής βιβλιογραφική αναφορά στη γεωμετρία του άκρου έγχυσης του κονιάματος κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση. Η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ προχώρησε στην κατασκευή και δοκιμή ποικιλίας γεωμετριών ακροφυσίων κατά τις δοκιμαστικές εκτυπώσεις. Κατά δεύτερον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές εκτυπώσεις με παραμέτρους την ταχύτητα κίνησης των αξόνων X,Y, το πάχος της στρώσης (μετακίνηση άξονα Z ανά στρώση υλικού), την ταχύτητα εξώθησης και την περιεκτικότητα σε αδρανή και νερό του σκυροδέματος. Κατά τρίτον, κατασκευάστηκε τρίοδη βάνα για τον καθαρισμό του συστήματος της αντλίας. Παρατηρήθηκε εκτενές πρόβλημα στην αντλία κατά τις πρώτες δοκιμαστικές εκτυπώσεις, όπου είτε λόγω «πήξης» του κονιάματος, είτε του απαιτούμενου χρόνου πλήρωσης της γραμμής τροφοδοσίας είτε κατά τη λήξη της εκτύπωσης, το λύσιμο και ο καθαρισμός της αντλίας έπρεπε να γίνει με μεγάλη ταχύτητα ώστε να μην προλάβει το κονίαμα να στερεοποιηθεί και να υπάρξει καταστροφή τμήματος του συστήματος. Τέλος, δημιουργήθηκε ολόκληρο πρωτόκολλο για εσωτερική χρήση για την πλήρη διαδικασία χρήσης του εκτυπωτή ημίσειας κλίμακας, που περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες από την προετοιμασία του δείγματος και του χώρου εκτύπωσης μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας και τον καθαρισμό/ συντήρηση του εξοπλισμού και απόρριψη των απορριμμάτων. Το πρωτόκολλο αυτό περιλαμβάνει την ενασχόληση προσωπικού τεσσάρων ατόμων και μπορεί εύκολα να επεκταθεί και στην διαδικασία της εκτύπωσης πλήρους κλίμακας ακόμα και με ισάριθμο προσωπικό και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την πλήρη αποτύπωση του χώρου εκτύπωσης και του περιβάλλοντα

	χώρου, διάκριση εργασιών και αρμοδιοτήτων και πρωτόκολλο διαχείρισης αστοχιών/ παύσης της εκτύπωσης.
Παρεκκλίσεις	Η Ενότητα Εργασίας 3 εξελίσσεται ομαλά χωρίς παρεκκλίσεις.

α/α ΕΕ	4	Μήνας Έναρξης	6	Μήνας Λήξης	30
Τίτλος Ενότητας Εργασίας	Κατασκευή πρωτοτύπου τρισδιάστατου εκτυπωτή πλήρους και ημίσειας κλίμακας				
Κατηγορία Δραστηριότητας	ΒΙΕ: Βιομηχανική Έρευνα (Άρθρο 25)				
Υπεύθυνος Ε.Ε. (Φορέας)	ΚΩΣ				
Φορείς Εκτέλεσης	ΚΩΣ, ΕΜΠ				
Περιγραφή Ενότητας Εργασίας	Η Ε.Ε.4 έχει στόχο την κατασκευή των πρωτοτύπων τρισδιάστατων εκτυπωτών πλήρους και ημίσειας κλίμακας και διασφάλιση της κατασκευαστικής αρτιότητας και ακρίβειας αυτών. Οι εργασίες της Ε.Ε.4 είναι αμιγώς κατασκευαστικές και περιλαμβάνουν την κατασκευή της κεφαλής εκτύπωσης και του σώματος της μηχανής πλήρους και ημίσειας κλίμακας, την διασφάλιση της κατασκευαστικής ακρίβειας των επιμέρους τεμαχίων, την συναρμολόγηση των διατάξεων και την πειραματική επαλήθευση της ορθής λειτουργίας της διάταξης.				
Παραδοτέα	Π.6: Αναφορά κατασκευής διάταξης τρισδιάστατης εκτύπωσης ημίσειας κλίμακας και αναφορά λειτουργίας Π.7: Αναφορά κατασκευής διάταξης πλήρους κλίμακας και αναφορά λειτουργίας				
Ανάλυση της Πορείας Υλοποίησης της ΕΕ Αναμενόμενα Αποτελέσματα – Οφέλη Κάθε Φορέα	Η Ε.Ε.4 βρίσκεται σε εξέλιξη, έχοντας ολοκληρώσει σημαντικό μέρος των προβλεπόμενων εργασιών. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μελέτη και κατασκευή εξαρτημάτων αναβάθμισης και προσαρμογής του ήδη υπάρχοντος ρομποτικού καρτεσιανού βραχίονα του Εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών (ΕΣΜ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Ανασχεδιάστηκε και αναβαθμίστηκε το υδραυλικό σύστημα κίνησης του ρομποτικού βραχίονα ώστε να αυξηθεί η απόδοση και η ακρίβειά του, καθώς και για να επεκταθεί το εύρος των δυνατών παραμετροποιήσεων εκτύπωσης, χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την εργασία του ως εκτυπωτής ημίσειας κλίμακας. Το καρτεσιανό ρομπότ είναι πλέον λειτουργικό και πραγματοποιεί εκτυπώσεις μικρής κλίμακας. Τα εξαρτήματα που κατασκευάστηκαν από την ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ Ε.Π.Ε. για την αναπροσαρμογή του καρτεσιανού ρομπότ σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν στο σχεδιαστικό περιβάλλον Siemens NX και στη συνέχεια κατασκευάστηκαν στα συμβατικά και τα CNC μηχανήματα από το εξειδικευμένο προσωπικό της εταιρίας. Επιπρόσθετα, κατόπιν σχετικού αιτήματος του ΕΣΜ, έγινε κατασκευή διάταξης προσδιορισμού των παραμέτρων εκτύπωσης με την ονομασία "Turn Table", με στόχο τον βέλτιστο προσδιορισμό της παροχής του κονιάματος σε συνδυασμό με την ταχύτητα εκτύπωσης. Η διάταξη αυτή σχεδιάστηκε σε συνεργασία με το ΕΣΜ και κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου στην ΚΩΣ ΕΛΛΑΣ Ε.Π.Ε. Η διάταξη έχει παραδοθεί στο ΕΣΜ και λειτουργεί κανονικά με στόχο των προσδιορισμό των παραμέτρων εκτύπωσης.				
Παρεκκλίσεις	Η Ενότητα Εργασίας 4 εξελίσσεται ομαλά χωρίς παρεκκλίσεις.				

α/α ΕΕ	5	Μήνας Έναρξης	18	Μήνας Λήξης	36
Τίτλος Ενότητας Εργασίας	Κατασκευή δοκιμίων (πλήρους και ημίσειας κλίμακας)				
Κατηγορία Δραστηριότητας	ΒΙΕ: Βιομηχανική Έρευνα (Άρθρο 25)				
Υπεύθυνος Ε.Ε. (Φορέας)	ΤΙΤΑΝ				
Φορείς Εκτέλεσης	ΕΜΠ, ΚΩΣ, ΣΙΚΑ, ΤΙΤΑΝ				
Περιγραφή Ενότητας Εργασίας	Η Ε.Ε.5 έχει στόχο την κατασκευή κατάλληλων δοκιμίων για την διάταξη ώστε να πραγματοποιηθούν τα απαραίτητα πειράματα και να αποδειχθεί η ορθή λειτουργία της διάταξης. Θα γίνει προσδιορισμός των κατάλληλων μεγεθών των δοκιμίων και κατασκευή αυτών ώστε να πραγματοποιηθούν τα κατάλληλα πειράματα που θα πιστοποιούν την λειτουργία της διάταξης. Ενδεικτικό μέγεθος δοκιμίου 80τμ x 3μ.				
Παραδοτέα	Π.8: Αποτελέσματα ανάλυσης συμπεριφοράς μικρού δοκιμίου Π.9: Αποτελέσματα ανάλυσης συμπεριφοράς πλήρους δοκιμίου				
Ανάλυση της Πορείας Υλοποίησης της ΕΕ Αναμενόμενα Αποτελέσματα – Οφέλη Κάθε Φορέα	Έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός των δοκιμίων και αναμένεται η εκτύπωση τους να πραγματοποιηθεί εντός του επιθυμητού χρονοδιάγραμματος.				
Παραεκκλίσεις	Η Ενότητα Εργασίας 5 εξελίσσεται ομαλά χωρίς παραεκκλίσεις.				

2. Σχόλια - Προβλήματα - Παρατηρήσεις

2.1 Αιτιολόγηση αποκλίσεων

Το έργο εξελίσσεται ομαλά, χωρίς αποκλίσεις όσον αφορά την υλοποίηση του φυσικού αντικειμένου.

2.2 Λοιπές παρατηρήσεις

Οι αρχικά προβλεπόμενες δραστηριότητες του έργου στις ΕΕ1 και ΕΕ2 έχουν περατωθεί επιτυχώς, σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα και έχουν υποβληθεί εγκαίρως τα αντίστοιχα συνημμένα τεχνικά παραδοτέα. Λαμβάνοντας υπόψιν τις ταχύτατες εξελίξεις στο χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης που απαιτούν επικαιροποίηση των δράσεων για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του εξοπλισμού και του υλικού εκτύπωσης, κρίνεται αναγκαία η χρονική επέκταση της δραστηριοτήτων του έργου στις προαναφερθείσες ενότητες εργασίας έως την ολοκλήρωση του έργου:

- ΕΕ1: ΜΕΛΕΤΗ ΥΠΑΡΧΟΥΣΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ STATE OF THE ART: χρονική επέκταση κατά 32 μήνες για την καλύτερη παρακολούθηση των διαρκώς μεταβαλλόμενων διεθνών εξελίξεων στο χώρο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.
- Ε.Ε.2 – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ, χρονική επέκταση κατά 20 μήνες για την διαρκή βελτίωση των ιδιοτήτων του κονιάματος, προσαρμόζοντας την συμπεριφορά του υπό συνεχώς εξελισσόμενες προδιαγραφές.

Η ως άνω χρονική επέκταση, εφόσον γίνει αποδεκτή, θα συνοδεύεται και από επικαιροποίηση των αντίστοιχων τεχνικών αναφορών έως την ολοκλήρωση του έργου.

	Επιστημονικός Υπεύθυνος Έργου	Συντονιστής Έργου
Υπογραφή:		
Όνοματεπώνυμο :	Ιωάννης Αντωνιάδης	Μάριος Κασιώτης
Ημ/νία :		