

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΤΜΗΜΑ : ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Συστηματική Ανασκόπηση βιβλιογραφίας αυξητικών
υλικών**



Φοιτητής: Τζιτζιβάκος Ευστράτιος

ΑΜ:2011010065

Εισηγητής: Γεώργιος Σταυρουλάκης

XANIA 2018

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract	5
1. Εισαγωγή.....	6
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	10
2.1 Αυξητικά υλικά	10
2.2 Γενική περιγραφή	12
2.3 Αυξητικοί μηχανισμοί	13
2.3.1 Poisson	13
2.3.2 Poisson σε ισότροπα υλικά	15
2.3.3 Poisson σε ανισότροπα υλικά	16
2.3.4 Poisson και κάμψη	17
2.3.5 Poisson και παραμόρφωση.....	17
2.3.6 Υλικά με αρνητικό λόγο του Poisson.....	18
2.4 Ιδιότητες αυξητικών υλικών.....	19
2.4.1 Αντοχή.....	19
2.4.2 Ελαστικότητα	20
2.4.3 Απόσβεση.....	22
2.5 Εφαρμογές αυξητικών υλικών.....	24
3. Μεθοδολογία	26
3.1 Συστηματική ανασκόπηση	28
3.2 Μετανάλυση.....	36
4. Συμπεράσματα.....	49
5. Βιβλιογραφία.....	51

Περίληψη

Η παρακάτω διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με το θέμα των αυξητικών υλικών. Η εργασία χωρίζεται σε δυο μέρη: στη βιβλιογραφική και τη συστηματική ανασκόπηση του θέματος .

Στο πρώτο μέρος, στη βιβλιογραφική ανασκόπηση γίνεται η συλλογή των στοιχείων που υπάρχουν στην βιβλιογραφία μέχρι αυτή τη στιγμή και που σχετίζονται με τα αυξητικά υλικά, τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν και τα χαρακτηριστικά τους. Αρχικά θα πραγματοποιηθεί η ιστορική αναδρομή και θα αναφερθεί η καταγωγή των υλικών αυτών αλλά και θα αναζητηθεί ο λόγος που συνδέθηκαν τα υλικά αυτά με το όνομα Poisson που τους έχει χαρακτηρίσει. Στη συνέχεια, γίνεται μια καταγραφή και ανάλυση των βασικών υλικών Poisson. Μετά την μελέτη του πρώτου μέρους, ο αναγνώστης θα έχει κατανοήσει πλήρως τη χρησιμότητα και τα χαρακτηριστικά των αυξητικών υλικών και θα μπορέσει να μεταβεί ομαλά στο δεύτερο μέρος της εργασίας, στο ερευνητικό κομμάτι.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας ακολουθεί η έρευνα που έγινε προκειμένου να πραγματοποιηθεί η συστηματική ανασκόπηση. Για την έρευνα λοιπόν, χρησιμοποιήθηκαν άρθρα και έρευνες που έχουν ασχοληθεί με τη φύση και τη χρήση των αυξητικών υλικών. Θα παρουσιαστεί ένας συγκριτικός πίνακας που περιέχει τα στοιχεία και τις βασικότερες πληροφορίες των άρθρων που μελετώνται στη συστηματική ανασκόπηση. Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται τα αποτελέσματα της έρευνας καθώς και τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη της βιβλιογραφίας ενώ τίθενται και ζητήματα για μελλοντικές έρευνες και μελέτες.

Abstract

The following thesis is on the systematic review of the literature on the subject of growth materials. The thesis is divided into two parts: the bibliographic and systematic review of the subject.

In the first part, the literature review is the collection of data available in the literature up to that moment associated with incremental materials, how they work and their marked. Initially the history will take place and will indicate the origin of these materials and will look for the reason that these materials were associated with Poisson name them has declared. Then a recording and analysis of the Poisson basic materials is made. After the study of the first part, the reader will clearly understand the usefulness and the marked growth of the material and will be able to move smoothly into the second part, the research track.

The second part of the thesis follows the research that was carried out in order to carry out the systematic review. For research then, used articles and studies have dealt with the nature and use of growth materials. A comparative table will be presented containing the elements and the most basic information of the articles being studied in the systematic review. At the end of the work presents the research results and the final conclusions resulting from the study of literature and posed and issues for future research studies.

1. Εισαγωγή

Από την αρχαιότητα, οι άνθρωποι προσπαθούσαν να κατασκευάσουν σπίτια και κτήρια με υλικά, τα οποία εάν έρχονταν σε επαφή και συνδυάζονταν με τον κατάλληλο τρόπο μπορούσαν να πετύχουν βελτιωμένες και ισχυρότερες ιδιότητες για ολόκληρη την κατασκευή. Σήμερα τα σύνθετα υλικά έχουν αντικαταστήσει τους παραπάνω συνδυασμούς. Τα σύνθετα υλικά έχουν δημιουργηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν υψηλή αντοχή σε κράσεις και μειωμένες αντιδράσεις και αρνητικές παραμέτρους σε αυτά¹.

Τις τελευταίες δεκαετίες εξαιτίας της ανάπτυξης της τεχνολογίας και της εύρεσης νέων καινοτομιών η χρήση των αυξητικών υλικών (Poisson) έχει μεγιστοποιηθεί. Επιπλέον η φύση και ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται έχουν κινήσει το ενδιαφέρον ενός μεγάλου αριθμού των επιστημόνων, οι οποίοι τα τελευταία χρόνια προσπαθούν να εμπνευστούν μέσα από αυτά και βρουν νέους, έξυπνους, μοντέρνους και πιο πρακτικούς τρόπους εφαρμογής τους².

Τα υλικά τα οποία εμφανίζουν αυξητική συμπεριφορά μπορεί να είναι είτε φυσικά είτε τεχνητά. Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει πως τα αυξητικά υλικά που πλεονεκτούν σε σχέση με συμβατικά υλικά που εμφανίζουν θετικό λόγο Poisson. Τα υλικά που δεν διαθέτουν λόγω της φύσης τους αυξητική συμπεριφορά διακρίνονται από ακαμψία, αντοχή ως προς την εμφάνιση των ρωγμών, αντίσταση προς τη διείδυση

¹Ken E Evans, 'Auxetic Polymers: A New Range Of Materials' (1991) 15 Endeavour.

² Liu Yanping and Hu Hong, 'A Review On Auxetic Structures And Polymeric Materials.' (2010) 5 Scientific research and essays.

και συνκλαστική καμπυλότητα. Αυτό σημαίνει πως τα αυξητικά υλικά έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε αντίθεση με τα υπόλοιπα. Η βασική διαφορά τους βρίσκεται στο γεγονός ότι τα αυξητικά υλικά διαθέτουν την ικανότητα να απορροφούν κύματα, ήχους και τάσεις μεγάλων εντάσεων.

Οι επιστήμονες πιστεύουν πως τα αυξητικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με άλλους τρόπους και πως μπορούν να βελτιώσουν ακόμα περισσότερο τη ποιότητα των κτηρίων εάν εφαρμοστούν με τον σωστό τρόπο. Αυτός είναι και ο λόγος που μέχρι και σήμερα συνεχίζουν να μελετάνε τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας τους³.

Τα αυξητικά υλικά χρησιμοποιούνται με κύριο στόχο, την μείωση των σεισμικών δονήσεων στα οικήματα που δημιουργούνται. Έχουν την ικανότητα να δίνουν στο κτίσμα την σεισμική μόνωση που χρειάζεται ώστε μέσα από αυτή να προλάβει την αποσύνθεση του εξαιτίας κάποιου δυνατού τριγμού ή κάποιας δυνατής οριζόντιας κίνησης του εδάφους. Τα αυξητικά υλικά δίνουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που χρειάζεται κάθε οίκημά προκειμένου να αποκτήσουν την απαραίτητη ευελιξία, αντοχή και εξοικονόμηση ενέργειας που χρειάζονται⁴.

Η επιλογή των κατάλληλων σε κάθε περίπτωση αυξητικών υλικών είναι πολύ σημαντική για το οίκημά που χτίζεται. Οι νέες τεχνολογίες έχουν συμβάλει και έχουν κάνει την όλη διαδικασία επιλογής πιο εύκολη. Μέσα από τις νέες τεχνολογικές τεχνικές ο ειδικός υπολογίζοντας όλες τις κατάλληλες παραμέτρους

³ : George Dvorak, *Micromechanics Of Composite Materials* (Springer 2013).

⁴ K.W. Wojciechowski, 'Constant Thermodynamic Tension Monte Carlo Studies Of Elastic Properties Of A Two-Dimensional System Of Hard Cyclic Hexamers' (1987) 61 *Molecular Physics*.

μπορεί να βρει το υλικό που χρειάζεται σε πάρα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Ωστόσο, πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός στην επιλογή των υλικών καθώς αποτελεί το σημαντικότερο στάδιο της κατασκευής ενός κτηρίου⁵.

Τα υλικά με αρνητικό λόγο Poisson έχουν ορισμένες ιδιότητες, οι οποίες τα κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμα στην προστασία των κατασκευών από τα δυνατά κύματα και τις σεισμικές δονήσεις. Τα τελευταία χρόνια η χρήση τους έχει αυξηθεί εξαιτίας των χαρακτηριστικών τους που θεωρούνται πολύ ιδιαίτερα και σημαντικά από τους ειδικούς και από τους νέους ερευνητές. Η χρήση των αυξητικών υλικών για τη προστασία από τις σεισμικές δονήσεις θεωρείται η πιο σύγχρονη μέθοδος προστασία των νέων κατασκευών. Δημιουργούν στη βάση της κατασκευής ελαστικά κενά ζωνών μέσα από τα οποία σταματάει η διάδοση των κυμάτων και των δονήσεων στην βάση του κτίσματος δίχως να προχωράει και να καταστρέφει το υπόλοιπο⁶.

Τα αυξητικά υλικά ονομάζονται και ως υλικά Poisson εξαιτίας της ελαστικότητας που διαθέτουν. Την θεωρία της ελαστικότητας κατέγραψε για πρώτη φορά ο Γάλλος μαθηματικός και φυσικός Siméon Denis Poisson. Η θεωρία της ελαστικότητας είναι πολύ σημαντική για τον κλάδο της μηχανικής και σχετίζεται άμεσα με την παραμόρφωση των σωμάτων και συνεπώς και των κτηρίων. Περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους που χρειάζονται προκειμένου να υπολογίσει την επίδραση των εξωτερικών δυνάμεων και των δονήσεων πάνω σε ένα σώμα καθώς και κατά

⁵ TEIK-CHENG LIM, AUXETIC MATERIALS AND STRUCTURES (SPRINGER 2016).

⁶ Yuejin Guo and William A. Goddard, 'Is Carbon Nitride Harder Than Diamond? No, But Its Girth Increases When Stretched (Negative Poisson Ratio)' (1995) 237 Chemical Physics Letters.

πόσο αυτό θα παραμορφωθεί. Αυτός λοιπόν είναι και ο λόγος που τα αυξητικά υλικά ονομάζονται και Poisson.

Σήμερα, η θεωρία της ελαστικότητας χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές και μηχανικούς προκειμένου να βρεθεί η αντοχή των υλικών που θέλουν να χρησιμοποιήσουν στην κατασκευή τους. Η ελαστικότητα πρέπει να υπολογίζεται σε κάθε νέο κατασκεύασμα αλλά προκειμένου να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του κτηρίου και των ανθρώπων που θα το χρησιμοποιούν⁷.

Στην παρακάτω εργασία θα ερευνηθεί η φύση των αυξητικών υλικών και θα αναλυθούν τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους. Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση και η οργάνωση των της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με τα αυξητικά υλικά και τον αρνητικό λόγο Poisson που τα χαρακτηρίζει. Ακόμη θα αναφερθούν εκτενέστερα οι ιδιότητες, οι μηχανισμοί και οι εφαρμογές των υλικών αυτών. Η έρευνα που θα γίνει θα βασιστεί σε στοιχεία που υπάρχουν στη νεότερη βιβλιογραφία, τα οποία έχουν βρεθεί μέσα από έρευνες και μελέτες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια σχετικά με τον αρνητικό λόγο (Poisson) των αυξητικών υλικών. Θα πραγματοποιηθεί συστηματική μετανάλυση δυο άρθρων, που είναι πολύ σημαντικά και έχουν πολλές πληροφορίες για τη αυξητικά υλικά.

⁷ Chaobin He, Puwei Liu and Anselm C. Griffin, 'Toward Negative Poisson Ratio Polymers Through Molecular Design' (1998) 31 Macromolecules.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Αυξητικά υλικά

Για πολλά χρόνια, έχουν γίνει παρουσιάσεις διάφορων γεωμετρικών δομών με αυξητικές συμπεριφορές που έχουν υποβληθεί σε αναλύσεις και έχουν δεχθεί επεξεργασία με στόχο να γίνεται χρήση τους στις παραγωγικές διαδικασίες εξαιτίας των ασυνήθιστων συμπεριφορών που εμφανίζουν. Το 1987, ο Lakes προχώρησε στην πρωτοποριακή στην ανάπτυξη του αφρού πολυουρεθάνης, με αρνητικό λόγο Poisson, με αυξητικές δομές⁸.

Αυτού του είδους ο πολυμερής αφρός έχει λόγο Poisson $-0,7$. Αυτής της μορφής τα νέα υλικά έχουν ονομαστεί αυξητικά⁹, αντιθέτως με το σύνολο των συμβατικών υλικών (παραδείγματος χάρη το καουτσούκ, το γυαλί, μεγάλος αριθμός μετάλλων κ.α.) έχουν την δυνατότητα να έχουν παχύτερη σύνθεση σε περίπτωση που τεντωθούν ή να λεπταίνουν σε περίπτωση συμπίεσης. Με τον όρο αυξητικά "Auxetics", ο οποίος προέρχεται από την Λατινική λέξη 'auxetos', το οποίο υποδηλώνει 'αυτό που είναι δυνατό να αυξηθεί' νοούνται όλα τα αυξητικά υλικά τα οποία είναι γνωστά για πάνω από 100 έτη. Ωστόσο το σύνολο αυτών των υλικών, ειδικότερα στην αρχή δεν κέρδισαν την προσοχή των χρηστών ούτε υπήρχε εστίαση στην πολλαπλή δυνατότητα εφαρμογής τους. Ως τη σύγχρονη εποχή, πολλά αυξητικά υλικά έχουν δημιουργηθεί εμπεριέχοντας μεγάλο αριθμό πολυμερών και μεταλλικών αφρών, μικροπορώδων πολυμερών, ελασμάτων από ανθρακονήματα αλλά και εύρος δομών με κυψέλες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πολύ δημοφιλές "τεφλόν"

⁸ R. Lakes, 'No Contractile Obligations' (1992) 358 Nature.

⁹Ken E Evans, 'Auxetic Polymers: A New Range Of Materials' (1991) 15 Endeavour.

δηλαδή το συνθετικό πολυμερές πολυτετραφθοροαιθυλενίου PTFE, που εφαρμόζεται για πολλά έτη.

Πλήθος άλλων παραδειγμάτων από υλικά που συγκεντρώνουν τις ιδιότητες των αρνητικών λόγων Poisson είναι τα μικροπορώδη, τα οποία έχουν πολύ υψηλό μοριακό βάρος πολυαιθυλενίου (UHMWPE), και το πολυπροπυλένιο (PP) (Alderson, et al, 2000), αλλά και μεγάλος αριθμός από πετρώματα¹⁰. Ωστόσο, το σύνολο των ειδικών χαρακτηριστικών τους δεν έχουν γίνει πολύ δημοφιλή έως και τη σύγχρονη εποχή, στην οποία οι εργασίες των Lakes&Evans και πλήθος άλλων μελετητών έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον του κοινού σε σχέση με το σύνολο των αυξητικών υλικών. Ο μεγάλος αριθμός των αυξητικών υλικών είναι ενδιαφέρον, εξαιτίας του ότι εμπεριέχουν πλήθος βελτιωμένων μηχανικών ιδιοτήτων, παραδείγματος χάρη την διατμητική αντοχή, τις αντιστάσεις στις παραμορφώσεις και τις αντοχές στις θραύσεις¹¹ συγκριτικά με κάθε συμβατικό υλικό από το οποίο έχουν κατασκευαστεί. Κατά συνέπεια, η έρευνα που αφορά αυτού του είδους τα μη συμβατικά υλικά είναι στην πραγματικότητα πολύ καθοριστική αν το δει κανείς από την μεριά της στοιχειώδους μελέτης αλλά και κάθε άλλης πρακτικής εφαρμογής, ειδικότερα στον ιατρικό τομέα, στην αεροδιαστημική και στην βιομηχανία. Η αλήθεια είναι ότι, κάθε υλικό με τέτοια μη συνηθισμένα χαρακτηριστικά, έχει εφαρμοστεί για θερμικές λειτουργίες προστασίας στον κλάδο της αεροδιαστημικής αλλά και στις κρυσταλλικές δομές Ni3Al σε βάνες στροβιλοκινητήρων στα αεροσκάφη.

¹⁰ W. P. de Wilde, C. A Brebbia and S Hernández, High Performance Structures And Materials VI (WIT Press 2012).

¹¹Ken E Evans, 'Auxetic Polymers: A New Range Of Materials' (1991) 15 Endeavour.

2.2 Γενική περιγραφή

Όταν τα κοινά υλικά υποβάλλονται σε εφελκυσμό προς μια κατεύθυνση, προκαλούνται μεταβολές στο μήκος τους σε κάθετες κατευθύνσεις προς τις κατευθύνσεις στις οποίες υπάρχουν οι φορτίσεις, πραγματοποιούνται δηλαδή μειώσεις των διατομών του (συρρικνώσεις). Αντιστοίχως, όταν γίνεται συμπίεση ενός κοινού υλικού, στις κάθετες κατευθύνσεις από αυτές στις οποίες γίνεται εφαρμογή, η κλίση του υλικού επιμηκύνεται. Ο λόγος Poisson μπορεί να μετρήσει αυτές τις μεταβολές στο μήκος των ελαστικών υλικών, οι οποίες πραγματοποιούνται κάθετα στις κατευθύνσεις των εφαρμοζόμενων φορτίων, έχει συνηθέστερα θετικό αριθμό $0 < \nu < 0.5$ και μπορεί να οριστεί ως το αρνητικό κλάσμα των εγκάρσιων τροπών προς τις αξονικές τροπές. Το σύνολο των υλικών τα οποία έχουν εμφανίσει αρνητικό λόγο Poisson ορίζονται ως αυξητικά (auxetic-materials). Αφορά στην ουσία πλήθος μικροδομών που σε περιπτώσεις που υποβάλλονται σε εφελκυσμούς αντί να συρρικνωθούν, επιμηκύνονται με κάθετο τρόπο στις κατευθύνσεις των εφαρμοζόμενων φορτίων¹². Το όνομα αυτό το έχουν πάρει εξαιτίας των αυξανόμενων διατομών που έχουν, αν και υπάρχουν και άλλοι όροι για να τα ονομάσει κανείς, παραδείγματος χάρι αντί-καουτσούκ (anti-rubber) λόγω του ότι όταν έχουν τεντωθεί γίνονται πιο παχιά σε εγκάρσιες τομές αντιθέτως με το καουτσούκ το οποίο λεπταίνει. Ορίζονται και ως dilatational materials (υλικά που διογκώνονται) λόγω του ότι σε αντίθεση με κάποιο κοινό υλικό τα οποία είναι σε θέση να υποβληθούν σε διατμητικές παραμορφώσεις και όχι τόσο σε μεταβολές στον όγκο τους, τα αυξητικά υλικά μπορούν να μεταβάλουν τον όγκο τους. Σύνολο διαφορετικών μικροδομών έχει

¹² George Dvorak, Micromechanics Of Composite Materials (Springer 2013).

διαμορφωθεί με στόχο την αύξηση και την μοντελοποίηση της αυξητικής συμπεριφοράς¹³.

2.3 Αυξητικοί μηχανισμοί

Γενικότερα, σύνολο υλικών με αρνητικούς λόγους Poisson διαθέτουν τα εξής ειδικά χαρακτηριστικά:

- Υψηλές εντός επιπέδων αντιστάσεις σημειακών παραμορφώσεων
- Καλή δυσθραυστότητα
- Υψηλά εγκάρσια μέτρα διατμήσεων
- Υψηλές δυναμικές ικανότητες

2.3.1 Poisson

Συνολικά κάθε υλικό όταν υποβάλλεται σε παραμορφώσεις οι οποίες έχουν προκληθεί από πλήθος αξονικών εφελκυστικών τάσεων, συνοδεύονται από μεγάλο αριθμό θλιπτικών παραμορφώσεων στις άλλες δύο κάθετες κατευθύνσεις οι οποίες λειτουργούν με στόχο τον ορισμό των τρισδιάστατων χώρων. Ο λόγος του Poisson λειτουργεί εκφράζοντας τις αναλογίες των εγκάρσιων συστολών σχετικά με τις διαμήκεις διαστολές στις κατευθύνσεις των εφελκυστικών δυνάμεων. Οι εφελκυστικές παραμορφώσεις θεωρούνται με θετικό πρόσημο και οι θλιπτικές παραμορφώσεις με αρνητικό. Οι ορισμοί των λόγων του Poisson έγιναν με ένα αρνητικό πρόσημο με στόχο η πληθώρα από τα υλικά (σχεδόν το σύνολο των υλικών τα οποία υπάρχουν στο περιβάλλον) να διαθέτουν θετικά πρόσημα.

¹³E. K. Ghiasi, 'Numerical Investigation of Auxetic Materials Due to the Elastic' (2015). Ferdowsi University of Mashhad

Ο λόγος του Poisson συμβολίζεται με το «ν» και ορίζεται ως :

$$\nu = -\varepsilon(\text{εγκάρσια}) / \varepsilon(\text{διαμήκη})$$

Όπου «ε» είναι η παραμόρφωση που ορίζεται ως η αλλαγή στο μήκος δια το αρχικό μήκος¹⁴.

$$\varepsilon = \Delta L / L$$

Η αιτία για την οποία το πλήθος από τα υλικά διαθέτουν θετικούς λόγους Poisson, ήτοι γίνονται πιο λεπτά στις διατομές τους αλλά και υποβάλλονται σε εφελκυσμό είναι ότι είναι πιο εύκολο να γίνει αλλαγή σχήματος από το να γίνει αλλαγή του όγκου τους. Το ποσοστό ευκολίας στις αλλαγές του όγκου των υλικών έχουν περιγραφεί από τα μέτρα διογκώσεων (bulk modulus) «K» και, παράλληλα, είναι εύκολες οι αλλαγές του σχήματος από τα μέτρα των διατμήσεων (shear modulus) «G». Εντός του ατομικού επιπέδου, οι θετικοί λόγοι του Poisson εξηγούνται με τις ευθυγραμμίσεις κάθε ατομικής δέσμης των υλικών με την κατεύθυνση των εφελκυστικών τάσεων¹⁵

¹⁴ Advances In Experimental Mechanics VIII (TTP, Trans Tech Publications 2011).

¹⁵ E. K. Ghiasi, 'Numerical Investigation of Auxetic Materials Due to the Elastic' (2015). Ferdowsi University of Mashhad

2.3.2 Poisson σε ισότροπα υλικά

Είναι δεδομένο ότι σε κάθε ισότροπο υλικό (υλικό στο οποίο η μηχανική του ιδιότητα δεν εξαρτάται από τις κατευθύνσεις οι οποίες ασκούνται από σύνολο εξωτερικών δυνάμεων). Κάθε ελαστική σταθερά αυτών βρίσκεται σε στενή σύνδεση με άλλες ελαστικές σταθερές και είναι αρκετό να υπάρχουν δυο σταθερές για την σαφής περιγραφή των ελαστικών (γραμμικών συμπεριφορών) αυτών των υλικών. Το μέτρο ελαστικότητας αποτελεί ιδιότητα των υλικών και περιγράφει κάθε σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε κάθε υλικό. Στο σύνολό τους υπάρχουν τρία μέτρα για την ελαστικότητα. Ειδικότερα:

- **Το μέτρο ελαστικότητας E** (young's modulus), το οποίο υποδεικνύει το ποσό καλή είναι η παραμόρφωση ενός υλικού επάνω σε άξονες υπό τις επιδράσεις κάθε εφελκυστικής ή θλιπτικής τάσης. Το μέτρο ελαστικότητας σε ποσότητα είναι ίσο με τις κλίσεις των ευθειών οι οποίες αναλογούν στις ελαστικές συμπεριφορές εντός ενός διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων.
- **Το μέτρο διάτμησης G** (shear modulus), το οποίο παρέχει εύκολα την περιγραφή με την οποία τα υλικά παραμορφώνονται διατμητικά ή στρεπτικά. Ήτοι, το πόσο εύκολα τα υλικά αλλάζουν σχηματικά αλλά διατηρούν σταθερό τον όγκο τους.
- **Το μέτρο διόγκωσης K** (bulk modulus), το οποίο παρέχει εύκολα περιγραφή για τον τρόπο με τον οποίο τα υλικά αλλάζουν όγκο (διαστέλλονται ή συστέλλονται με ομοιογενή τρόπο) υπό τις επιδράσεις κάποιας αξονικής ή υδροστατικής τάσης (θλιπτική ή εφελκυστική).

Στην συνέχεια γίνεται παρουσίαση των σχέσεων του λόγου Poisson με το σύνολο των ελαστικών σταθερών ενός ισότροπου υλικού:

$$\nu = (3K - 2G) / (6K + 2G)$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

$$E = 3K(1 - 2\nu)$$

Με βάση την θεωρία σχετικά με την ελαστικότητα για το σύνολο των ισότροπων υλικών, το πιθανό εύρος στις τιμές το οποίο μπορεί να λάβει ο λόγος του Poisson είναι από -1 έως 0.5. Αυτό γίνεται λόγω του ότι οι τιμές της ακαμψίας C (stiffness) στο σύνολο των κατευθύνσεων του υλικού χρειάζεται να είναι θετικές αν τα υλικά θεωρούνται στερεά ¹⁶.

2.3.3 Poisson σε ανισότροπα υλικά

Ως αντισότροπο ονομάζεται το υλικό στο οποίο κάθε μηχανική ιδιότητα διαφέρει σε διαφορετικό άξονα με την απουσία ύπαρξης κάποιων κανόνων για αυτές τις διαφοροποιήσεις. Αυτό το υλικό κατέχει τιμές του λόγου του Poisson διαφορετικές κατά τις κατευθύνσεις και είναι δυνατό να λάβουν θετικές ή αρνητικές τιμές ¹⁷.

¹⁶S Keams, 'Analysis And Mitigation Of Mechanical Shock Effects, Massachusetts.' [2001] .
Massachusetts Institute of Technology.

¹⁷Yunan Prawoto, Integration Of Mechanics Into Materials Science Research.

2.3.4 Poisson και κάμψη

Ο λόγος του Poisson, πέρα από το σύνολο των παραμορφώσεων στις διατμήσεις, λειτουργεί καθοριστικά και στις συμπεριφορές των υλικών στο βαθμό ευλυγισίας. Παραδείγματος χάρη, οι επιφάνειες από υλικά με θετικό λόγο Poisson, πρόκειται να εμφανίσουν αντικλαστική καμπυλότητα. Έτσι, γίνεται περιγραφή της συμπεριφοράς με την οποία ο βαθμός λυγισμού των επιφανειών σε άξονες επάνω στα επίπεδα μπορεί να προκαλέσει αντίθετους λυγισμούς στους κάθετους άξονες (ως προς τους πρώτους άξονες) επάνω στα ίδια επίπεδα¹⁸.

2.3.5 Poisson και παραμόρφωση

Μέσα από τις ελαστικές σταθερές, ο λόγος του Poisson μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα των μεταδόσεων κύματος μέσα στα υλικά. Δυο είναι τα είδη των κυμάτων τα οποία υφίστανται, το ένα είναι το διατμητικό (shear) και το άλλο είναι το διάμηκες (compressive). Το σύνολο των ταχυτήτων μετάδοσης είναι ανάλογα V_t για το διατμητικό και V_l για το διάμηκες κύμα:

$$v = \frac{1}{2} \frac{(V_t/V_l)^2 - 1}{(V_t/V_l)^2 + 1}$$

Ακόμη, ο λόγος του Poisson ασκεί επιδράσεις στις κατανομές των τάσεων εντός των υλικών με βάση τις αποστάσεις από τα σημεία εφαρμογών του με βάση την αρχή του

¹⁸ C., Liam, 'Testing and Modeling of Shock Mitigating Seats for High Speed Craft, Blacksburg' (2011). Virginia Polytechnic Institute and State University

Saint Venant αλλά και με τις κατανομές αυτών πλησίον των οπών και των ρωγμών των υλικών¹⁹

2.3.6 Υλικά με αρνητικό λόγο του Poisson

Αφού έχει γίνει κατανοητή η έννοια και το φαινόμενο που περιγράφεται από τον λόγο Poisson, μπορεί με ευκολία να κατανοήσει κανείς τι θα μπορούσε να υφίσταται σε περιπτώσεις που τα υλικά έχουν αρνητικό λόγο Poisson. Κάθε υλικό με αρνητικό λόγο Poisson επιδεικνύει τις φαινομενικά αφύσικες συμπεριφορές για πάχυνση στη διατομή του σε περιπτώσεις εφελκυσμού και να γίνεται πιο λεπτό σε περιπτώσεις συμπίεσης. Πρώτη φορά μελετήθηκαν οι αυξητικές δομές το 1982 από τον Gibson, όταν έγινε κατασκευή μακροσκοπικών δισδιάστατων εξαγωνικών κυψελοειδών δομών επανεισόδου από αλουμίνιο οι οποίες μπορούσαν να παραμορφωθούν με τις κάμψεις κάθε πλευράς τους και διέθεταν ικανότητες αύξησης. Στη συνέχεια, το 1987, ο Roderic Lakes στο Πανεπιστημιακό ίδρυμα της Iowa στις Η.Π.Α. αποτέλεσε τον πρωτοπόρο μελετητή που εστίασε το ενδιαφέρον του σε κάθε αυξητική ιδιότητα εντός μικροσκοπικού επιπέδου και έκανε παρουσίαση της μεθόδου για τις κατασκευαστικές πολυμερικών αφρών με ιδιότητα αύξησης²⁰

Μέσα από την εργασία του Lakes, η οποία ήταν πολύ σημαντική δόθηκε η αφορμή για άνθηση του επιστημονικού ενδιαφέροντος σε θέματα αυξητικών υλικών. Αυτό πραγματοποιήθηκε κυρίων εξαιτίας του ότι αποτελούσε τον πρώτο που είχε συνειδητοποιήσει και διαπιστώσει τον ανεξάρτητο ρόλο του λόγου του Poisson από

¹⁹Yuejin Guo and William A. Goddard, 'Is Carbon Nitride Harder Than Diamond? No, But Its Girth Increases When Stretched (Negative Poisson Ratio)' (1995) 237 Chemical Physics Letters.

²⁰W. P. de Wilde, C. A. Brebbia and S. Hernández, High Performance Structures And Materials VI (WIT Press 2012).

τις τάξεις μεγεθών των δομών των υλικών. Ειδικότερα, έκανε χρήση του γεγονότος ότι στην θεωρία της ελαστικότητας δεν υπάρχουν χαρακτηριστικές μονάδες μήκους και προτάθηκε ότι οι τάξεις των μεγεθών για μηχανισμούς των δομών οι οποίες είναι οι αρμόδιες για τον λόγο του Poisson δεν λειτουργούν περιοριστικά. Διαφορετικά, ο λόγος του Poisson είτε έχει αρνητικό είτε θετικό πρόσημο λειτουργεί ανεξάρτητα από τις κλίμακες, δηλαδή η αυξητική ιδιότητά του μπορεί να οφείλεται σε κάθε μικροσκοπική μοριακή ή μακροσκοπική δομή των υλικών. Αυτού του είδους οι συνειδητοποιήσεις άνοιξαν σύνολο νέων οριζώντων για να δημιουργηθούν δομές, δισδιάστατες ή τρισδιάστατες, σε όλες τις τάξεις μεγεθών που διαθέτουν αυξητική ιδιότητα²¹

2.4 Ιδιότητες αυξητικών υλικών

2.4.1 Αντοχή

Σχετικά με την αστοχία ως προς του εφελκυσμούς, το σύνολο των αφρών που διαθέτουν ανοιχτές κυψέλες είναι ψαθυροί, με τον όρο του ότι οι διαδόσεις των ρωγμών πραγματοποιούνται με την απουσία σχηματισμού λαιμού. Από την άλλη, συγκριτικά με κάθε μη αυξητικό αφρό, ο αυξητικός εμφανίζει το πλεονέκτημα σε ζητήματα αστοχίας. Ειδικότερα, σε περιπτώσεις που υπάρχουν ασυνέχειες ή ρωγμές στους αυξητικούς αφρούς και αυτοί εφελκύνονται, οι διαστολές τους προς το σύνολο

²¹ J. B. Choi, and R. S., Lakes, Design of a fastener based on negative Poisson's ratio foam. (1991). 205-212, CellularPolymers.

των κατευθύνσεων τείνουν να κλείσουν τις αρχικές ασυνέχειες με παρεμπόδιση των επεκτάσεών τους²².

2.4.2 Ελαστικότητα

Τα μέτρα διατμήσεων κάθε αυξητικού υλικού είναι από τα βασικότερα σημεία στα οποία σημειώνονται διαφορές από το σύνολο των συμβατικών υλικών. Το πλήθος των ισότοπων αυξητικών υλικών φαίνεται να σημειώνουν σημαντικά μεγάλα μέτρα διατμήσεως (G) σε σύγκριση με τα μέτρα διογκώσεως (K). Τα μέτρα διατμήσεως αποτελούν ενδείξεις της ευκολίας παραμόρφωσης του σώματος σε διατμητική ή στρεπτική δύναμη. Το σύνολο των υλικών με υψηλά μέτρα διατμήσεως έχουν συνήθως αποδίδουν στατικές και δυναμικές δυνάμεις στα θεότητας σε κάθε κατασκευή. Αυτού του είδους τα υλικά μπορούν να εφαρμοστούν στους κατασκευαστικούς τομείς για δοκούς και σε ως ενισχυτές αλλά και ως ποιόν, σε πλήθος σκελετικών μερών, όπως είναι οι σκελετοί των αυτοκινήτων ή των αεροπλάνων.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, το πλήθος των ελαστικών σταθερών και ο λόγος του Poisson στο εύρος των ισότοπων υλικών έχουν στενή σχέση με την θεωρία της ελαστικότητας. Το πλήθος αυτών των σχέσεων αποδεικνύουν κάθε αλλαγή στα

²²B., Κατρανίδης, 'Μελέτη αυξητικών υλικών: Ανάλυση μηχανικών συνδέσμων σε πολύστρωτα σύνθετα και μεταλλικούς αφρούς' (2013). Πανεπιστήμιο Αιγαίου

μέτρα ελαστικότητας σε περιπτώσεις που ο λόγος του Poisson έχει αρνητικό πρόσημο²³.

Εντός των συμβατικών υλικών (με τον λόγο του Poisson να βρίσκεται από το 0 μέχρι το 0.5), τα μέτρα ελαστικότητας (young 's modulus) έχουν διπλάσια ποσοστά από τα μέτρα διατμήσεων (G). όταν ο λόγος του Poisson κυμαίνεται προς το μηδέν, το πλήθος των τιμών από το σύνολο των δυο μέτρων έρχονται πιο κοντά η μια με την άλλη, έως ότου γίνεται εξίσωση την στιγμή που ο λόγος του Poisson έχει ίση τιμή με $\nu = -0.5$. Σε αυτή την περίπτωση τα υλικά γίνονται “μαλακά” υπό υδροστατική εφελκυστική και θλιπτική τάση αλλά “σκληρά” υπό διατμητική ή στρεπτική τάση. Αυτό πραγματοποιείται για να είναι $\nu = -0.5$ το μέτρο διάτμησης θα πρέπει να υπερβαίνει πολύ τους συντελεστές μεταβολών όγκων (ειδικότερα είναι έξι φορές πιο μεγάλο). Ακολούθως, γίνεται παρουσίαση των σχέσεων των μέτρων ελαστικότητας όπως έχουν αποδοθεί από την θεωρία ελαστικότητας σε ισότροπο υλικό για να είναι εμφανείς και κατανοητές οι παραπάνω διαφοροποιήσεις που αναλύθηκαν:

$$G = 3K(1 - 2\nu) / 2(1 + \nu)$$

$$\text{Και } E = 2G(1 + \nu) = 3K(1 - 2\nu)$$

Σε περιπτώσεις όπου ο λόγος του Poisson έχει δεχθεί περισσότερη μείωση και κυμαίνεται προς το κατώτερο όριό του για $\nu = -1$, τα μέτρα διατμήσεων (G) ξεπερνούν τα μέτρα ελαστικότητα του Young (E) και τα μέτρα διογκώσεων (K) μειώνονται στο ένα ένατο των μέτρων ελαστικότητας του Young ($K = E/9$). Τα υλικά σε αυτό το

²³ George Eliot and Rosemary Ashton, *The Mill On The Floss* (Penguin Books 2018).

στάδιο είναι έντονα αυξητικά, ήτοι, για κάθε μονάδα διαμήκους παραμορφώσεων, γίνεται παραμόρφωση άλλο τόσο των εγκάρσιων διευθύνσεων. Τα μέτρα διατμήσεων πλησιάζουν το άπειρο και κατά συνέπεια γίνεται σύνθεση ενός απαραμόρφωτου υλικού εντός διατμητικών ή στρεπτικών δυνάμεων, αλλά με ευκολία μπορεί να παραμορφωθεί με υδροστατική μέθοδο ($G \gg K$).

Σε αυτό το στάδιο είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στο ότι εντός των υλικών που εντάσσονται στα λάστιχα, ο λόγος του Poisson αντιστοιχεί σε $\nu = 0.5$ δημιουργώντας διαμόρφωση στον συντελεστή μεταβολής όγκου (K) να κατευθύνεται στο θετικό άπειρο. Ωστόσο, κάθε λάστιχο υποβάλλεται σε εύκολη παραμόρφωση μέσω διατμητικών ή στρεπτικών δυνάμεων αλλά θεωρείται ασυμπίεστο ($K \gg G$). Με αυτό τον τρόπο αντιλαμβάνεται κανείς γιατί ονομάζονται “αντιλάστιχα” τα αυξητικά υλικά.²⁴

2.4.3 Απόσβεση

Το σύνολο των κυψελοειδών των δομών, εφόσον έχουν περιοδικό χαρακτήρα, είναι σε θέση να λειτουργούν εξασθενώντας τα κύματα των ελαστικών παραμορφώσεων σε μερικό αριθμό εύρους συχνότητας. Έτσι, γίνεται χρήση τους και ως φίλτρα αποσβέσεων για σύνολο ποικίλων ειδών κυμάτων (ηχητικό, τάσης, παραμορφώσεων). Ο λόγος του Poisson των υλικών επηρεάζει το ποσοστό μεταδοτικότητας και ανακλαστικότητας του κύματος τάσης εντός των υλικών. Με

²⁴N. Παπαδογιάννη, ‘Μελέτη της επιρροής μη γραμμικών φαινομένων υλικού και επαφής - τριβής στη μηχανική απόκριση αυξητικών υλικών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.’ (2015). Πολυτεχνείο Κρήτης

βάση τις μικροδομές κάθε αυξητικού αφρού, έχει γίνει η πρόταση ότι τα αυξανόμενα γεωμετρικά χαρακτηριστικά πολυπλοκότητας στις μικροδομές αυτές θα ενίσχυαν τον βαθμό διασποράς και κατά συνέπεια το ποσοστό απορρόφησης κάθε κύματος γενικά. Με βάση σύνολο μεταγενέστερων μελετών έχει αποδειχθεί ότι το πλήθος των αυξητικών αφρών έχουν πιο καλό βαθμό απορροφητικότητας σε ηχητικά κύματα συγκριτικά με κάθε συμβατό ανάλογο αφρό, στο άθροισμα των συχνοτήτων.

Ακόμη, το μέγεθος που έχουν οι πόροι ασκούν επιδράσεις στο εύρος κάθε συχνότητας η οποία απορροφάτε καλύτερα από τους αυξητικούς αφρούς. Ενδεικτικά, ο αυξητικός αφρός με μικρούς πόρους ήταν πιο αποτελεσματικός στις απορροφήσεις ηχητικού κύματος 630 Hz και πάνω συγκριτικά με κάθε αφρό που διέθετε πιο μεγάλους πόρους. Ακόμη, όταν συνδυάζεται αυξητικός αφρός με ένα μαγνητορρολογικό υγρό (magnetorheological fluid) εντός των πόρων του, σημειώνονται βελτιώσεις στον βαθμό απορροφητικότητας του αφρού σε ηχητικό κύμα.

Το σύνολο των αποτελεσμάτων από πλήθος δοκιμών με δυναμικές συνθλίψεις είναι αισθητά καλύτερο συγκριτικά με κάθε συμβατικό αφρό. Με βάση την μελέτη στην οποία έγινε η εξέταση της αντοχής σε σχέση με τον αφρό με ανοιχτά κελία πολυουρεθάνης και των αντίστοιχων αυξητικών του, το άθροισμα των

αποτελεσμάτων έχουν δείξει ότι η αξιοπιστία του αυξητικού αφρού στο ποσοστό αντοχής υπό σύγκρουση είναι πολύ πιο μεγάλη από εκείνη των συμβατικών αφρών²⁵.

2.5 Εφαρμογές αυξητικών υλικών

Το σύνολο των υλικών με αρνητικούς λόγους Poisson ή αυξητικών έχουν προσφέρει μια εναλλακτική λύση η οποία δεν έχει εξερευνηθεί αρκετά, για τα υλικά που βρίσκονται υπό επιλογή για μεγάλο ποσοστό προϊόντων και εφαρμογών. Δρουν συνδυαστικά έχοντας πολλές ιδιότητες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σύνολο εφαρμογών που μέχρι και την σύγχρονη εποχή δεν μπορούσαν να πραγματοποιηθούν και ασκούν σημαντική βελτίωση στο άθροισμα των επιδόσεων από εφαρμογές που υπάρχουν ήδη.

Παλαιότερα, υπήρξαν έρευνες οι οποίες προχώρησαν σε πιστοποιήσεις και τεκμηριώσεις μέσω γνωστών φορέων των ιδιοτήτων που έχουν αυτά τα αυξητικά υλικά, έκαναν πρόταση νέων χρήσεων και μεθόδων για την παραγωγή και προσέλκυσαν συγκέντρωση του επιστημονικού ενδιαφέροντος. Ο βαθμός προόδου σε σχέση με το σύνολο των μεθόδων παραγωγής κάθε αυξητικού υλικού έχει προετοιμάσει τις εμφανίσεις πολλών καινοτομιών σε εφαρμογές εντός του βιομηχανικού κλάδου αλλά και σε πλήθος άλλων τομέων. Σύνολο χαρακτηριστικών εφαρμογών ενός αυξητικού υλικού είναι οι παρακάτω:

²⁵Α.Συντζανάκης, *Μελέτη Αυξητικών Κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία*, (2015).

- **Σύνθετα υλικά με αυξητικές ίνες:** Το πλήθος των σύνθετων υλικών με ύπαρξη αυξητικών ινών έχουν παρουσιάσει πλήθος βελτιωμένων επιδόσεων σχετικά με την αντοχή. Το άθροισμα των αυξητικών ινών υποβάλλονται σε διατμητική διαστολή εντός των αξονικών εφελκυστικών τάσεων, άρα θα είναι πιο δύσκολο να μπορέσουν να αποτραβηχτούν από τις μήτρες, γεγονός το οποίο θεωρείται προαπαιτήση για τις αστοχίες των σύνθετων υλικών.
- **Αισθητήρες:** Το σύνολο των αυξητικών υλικών αποτελούν ένα είδος ελκυστικής επιλογής για να κατασκευαστούν υδρόφωνα και αισθητήρες γενικώς εξαιτίας των μικρών τιμών που έχει το μέτρο διόγκωσης (K). Αυτό σημαίνει ότι γίνεται με ευκολία κάθε υδροστατική μεταβολή στον όγκο, άρα είναι ευαίσθητοι σε εύρος κυματικών διαταραχών από το περιβάλλον των αισθητήρων. Το σύνολο των στόχων του κάθε αισθητήρα είναι να μπορεί όσο γίνεται περισσότερο να είναι ευαίσθητος σε κάθε είδος μεταβολής του περιβάλλοντος. Σε αυτό το είδος εμπεριέχονται και όλες οι εφαρμογές που συνδυάζονται με πλήθος πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.
- **Βιοϊατρική:** Ο τομέας της Βιοϊατρικής είναι δυνατόν να ωφεληθεί ιδιαίτερα από το σύνολο των εφαρμογών με χρήση αυξητικών υλικών. Μια από τις πιο χαρακτηριστικές εφαρμογές είναι με χρήση αυξητικών τεχνητών ατμήτων. Αν οι τεχνητές άτμητες είναι από μη-αυξητικά υλικά, τείνουν να λεπταίνουν σε πάχος στα τοιχώματά τους ως αντιδράσεις στα κύματα αίματος τα οποία προκύπτουν από τους καρδιακούς παλμούς. Ωστόσο, κάτι τέτοιο θα ήταν δυνατόν να οδηγήσει σε ρήξεις αυτών²⁶.

²⁶Γιώργος Παπανικολάου, Διονύσης Μουζάκης 'Σύνθετα υλικά'. (2007) Κλειδάριθμος, Αθήνα

3. Μεθοδολογία

Για την διερεύνηση των αυξητικών υλικών, των χαρακτηριστικών και τη χρήση τους παρακάτω θα πραγματοποιηθεί μετανάλυση δυο πολύ σημαντικών άρθρων πάνω στο θέμα.

Μετανάλυση ορίζεται η ποσοτική και αντικειμενική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ερευνητικών μελετών οι οποίες βασίζονται σε μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν και αφορούν συγκεκριμένο θέμα. Μέσα από την ανάλυση των ερευνών μπορεί να εξαχθεί ένα συμπέρασμα για το θέμα που μελετάται πολύ σημαντικό για τις μελλοντικές έρευνες.

Η μετανάλυση γίνεται μέσα από τη συστηματική ανασκόπηση άρθρων. Αποτελεί μια από τις βασικότερες ερευνητικές μεθόδους που υπάρχει. Αποτελούν τη βασική μέθοδο προσέγγισης και ανάλυσης της υπάρχουσας βιβλιογραφίας πάνω σε ένα συγκεκριμένο θέμα. Μέσα από την ανάλυση γίνεται ταυτόχρονα και κριτική ανάλυση στο κάθε άρθρο και στο συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ο συγγραφέας του. Η μετανάλυση γίνεται μετά από τη συστηματική ανασκόπηση. Στη μετανάλυση ο ερευνητής ασκεί κριτική και ερμηνεύει τα αποτελέσματα που βρήκε κατά τη διάρκεια της συστηματικής ανασκόπησης.

Οι συστηματικές ανασκοπήσεις και η μετανάλυσεις απαιτούν εξειδικευμένους ερευνητές που διαθέτουν αρχές και εργάζονται ακολουθώντας τους κανόνες και τις αρχές της επιστήμης. Μέσα από αυτά προσπαθούν και στο τέλος κατορθώνουν να φτάσουν σε έγκυρα συμπεράσματα.(HunterandSchmidt, n.d.)

Στη παρακάτω έρευνα, θα γίνει μετανάλυση πάνω σε δυο άρθρα του καθηγητή Ελευθέριου Γεώργιου Σταυρουλάκη που διδάσκει στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Τα άρθρα που θα αναλυθούν είναι δυο:

- «Topology optimization for compliant mechanisms, using evolutionary-hybrid algorithms and application to the design of auxetic materials»
- «Negative Poisson's ratios in composites with star-shaped inclusions: A numerical homogenization approach».

Τα άρθρα αυτά αναλύουν σε βάθος τη χρήση και τα χαρακτηριστικά των αυξητικών υλικών, τα οποία αποτελούν και το βασικό αντικείμενο έρευνας της παρούσας πτυχιακής.

Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση της βιβλιογραφίας των δυο αυτών άρθρων τα οποία αφορούν τα αυξητικά υλικά και τον αρνητικό λόγο Poisson. Αναλύθηκαν λεπτομερώς όλες οι σχετικές πηγές καθώς και κάποια άλλα επιπλέον άρθρα, τα οποία δημοσιεύθηκαν τη τελευταία δεκαετία και αφορούν το θέμα το εργασίας.

3.1 Συστηματική ανασκόπηση

Συγγραφέας	Χρονολογία	Σκοπός	Μεθοδολογία	Αποτέλεσμα
Rozvany, G. I. N	1989	Έρευνα των κριτηρίων στατικής-κινηματικής βελτιστοποίησης και τις εφαρμογές τους	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Σύνοψη όλων των θεωριών από το 1980-1988
Kolpakov, A. G.:	1985	Υπολογισμός των ελαστικών χαρακτηριστικών των δομών με αρνητικό λόγο Poisson	Υπολογιστική μέθοδος	Η λύση του κυτταρικού προβλήματος σε δομές πλαισίου τύπου δοκού ή κελύφους μπορεί να ληφθεί με προσεγγιστικές μεθόδους με οποιαδήποτε ακρίβεια, η οποία διέπεται απλώς από την επιλογή του μοντέλου.
Evans, K.	1989	Μελέτη μικροδομών εφελκισμού που έχουν διαμορφωθεί έτσι ώστε να εμφανίζουν αρνητικές αναλογίες Poisson	Πειραματική μέθοδος	Σε όλες τις δομές συμβαίνουν τοπολογικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ πρώτου και δεύτερου πλησιέστερου σωματιδίου γειτόνων για την παραγωγή συνεργατικών εγκάρσιων επεκτάσεων υπό διαμήκη φόρτιση.
Milton, G. W.	1992	Μελέτη αυξητικών υλικών με εξαγωνική συμμετρία, τα οποία βρέθηκαν με τους λόγους του Poisson αυθαίρετα κοντά στο -1.	Υπολογιστική μέθοδος	Τα ελαστικά ισοτροπικά δισδιάστατα και τρισδιάστατα σύνθετα με τον λόγο Poisson πλησιάζοντας -1 ως $r \rightarrow 0$ μπορούν να παραχθούν απλά με στρωματοποίηση των συστατικών υλικών σε διαφορετικές κατευθύνσεις σε ευρέως διαχωρισμένες κλίμακες μήκους.

Evans, K.	1990	Μελέτη της δραστηριότητας των υλικών με αρνητικό λόγο Poisson	Πειραματική μέθοδος	Μια σημαντική αλλαγή στην τιμή του λόγου έχει σημαντικές επιπτώσεις στη μηχανική απόδοση του υλικού.
Almgren, R. F.:	1985	Μελέτη ισότροπων υλικών με ελαστικές ιδιότητες με αρνητικό λόγο Poisson -1	Συγκριτική αξιολόγηση	Ανάλυση της δομής των ράβδων, μεντεσέδων και ελατηρίων και των δομών τους μέσω μικροσκοπικής μελέτης.
Rinde, J. A.	1970	Μελέτη της αναλογίας του αρνητικού λόγου Poisson σε άκαμπτους αφρούς χαμηλής πυκνότητας	Πειραματική μέθοδος	Για αφρούς πολυστερίνης και για αφρούς πολυουρεθάνης, ο λόγος Poisson είναι μεγαλύτερος στην τάση από τη συμπίεση.
Li, Y	1976	Μελέτη της ανισοτροπικής συμπεριφοράς του λόγου Poisson και των συντελεστών διάτμησης και Young σε εξαγωνικούς κρυστάλλους	Υπολογιστική μέθοδος	Υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των συντελεστών που μελετώνται
Lakes, R	1987	Μελέτη δομής αφρού με αρνητικό λόγο Poisson	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Το υλικό παραμορφώνεται ανάλογα με την ιδιότητα του κάθε υλικού και τον αρνητικό λόγο Poisson που έχει.
Friis, E. A.; Lakes, R. S.; Park, J.B.	1988	Μελέτη μηχανικών χαρακτηριστικών και συμπεριφορά πολυμερών υλικών και μεταλλικών αφρών με αρνητικό λόγο Poisson	Πειραματική μέθοδος	Αφροί με δομές επανεισόδου έδειξαν αρνητικές αναλογίες Poisson και μεγάλη ελαστικότητα. Αφροί με αρνητικές αναλογίες Poisson παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές και υλικά.
Caddock, B. D.; Evans, K. E.	1989	Μελέτη των	Βιβλιογραφική	Ο αρνητικό λόγος

		μηχανικών ιδιοτήτων και δομών μικροπορώδων υλικών με αρνητικό λόγο Poisson.	ανασκόπηση	Poisson διαφέρει ανάλογα με τα υλικά. Μπορεί να φτάσει έως και -12. Τα μικροπορώδη υλικά έχουν μεγάλη αρνητική αναλογία Poisson.
Theocaris, P. S.; Panagiotopoulos, P. D.	1993	Έρευνα τεχνικών αποκατάστασης μηχανικών προβλημάτων (ρωγμές)	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Εφαρμογή μοντέλου Horfield και νευρωτικού μοντέλου για αποκατάσταση των ανισοτήτων. Υπάρχουν πολλές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη και δημιουργούν περαιτέρω προβλήματα.
José Miranda, Guedes Noboru Kikuchi	1990	Επεξεργασία των στοιχείων των συνθετικών υλικών μέσα από την ομογενοποίηση και τις προσαρμοστικές μεθόδους	Υπολογιστική μέθοδος	Ανάπτυξη τεχνικών υπολογισμών που αναλύουν την ικανότητα των συνθετικών υλικών
Osher S, Sethian JA.	1988	Έρευνα νέων αλγορίθμων που συσχετίζουν τη ταχύτητα που είναι εξαρτώμενη από τη καμπυλότητα.	Υπολογιστική μέθοδος	Δημιουργία αλγορίθμων παρόμοιους με τις εξισώσεις Hamilton-Jacobi και με τη βοήθεια ολιστικών σχημάτων που καταγράφουν με ακρίβεια το σχηματισμό αιχμηρών κλίσεων και αιχμών στα κινούμενα μέτωπα.
Eberhart RC, Kennedy J. A	1995	Έρευνα για το κατάλληλο εργαλείο βελτιστοποίησης σφαιρικών σωματιδίων	Συγκριτική αξιολόγηση	Υπάρχουν δυο μέθοδοι σύγκρισης που εφαρμόζονται και προτιμώνται. Οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη κατάρτιση νευρωνικών δικτύων και εκμάθησης εργασιών με ρομπότ
Kennedy J, Eberhart RC.	1995	Έρευνα για τη κατάλληλη μέθοδο βελτιστοποίησης των	Συγκριτική αξιολόγηση	Υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της βελτιστοποίησης σμήνους

		μη γραμμικών λειτουργιών σφαιρικών σωματιδίων		σωματιδίων και της τεχνητής ζωής και των γενετικών αλγορίθμων.
Price KV, Storn R.	1995	Μελέτη της νέας μεθόδου για τη προσέγγιση των μη γραμμικών και μη διαφοροποιήσιμων συνεχών διαστημικών λειτουργιών σε συνεχείς χώρους	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Η νέα μέθοδος απαιτεί λίγες μεταβλητές ελέγχου, είναι ισχυρή, εύκολη στη χρήση και προσφέρεται πολύ καλά στην παράλληλη καταμέτρηση.
Sigmund O	2011	Μελέτη της επιστημονικής σημασίας και της πρακτικής των ερευνητών που χρησιμοποιούν τεράστιους υπολογιστικούς πόρους για την επίλυση απλών προβλημάτων.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης τοπολογίας βασίζονται σε κλίση μπορούν να επιλύσουν αποτελεσματικά τα προβλήματα υψηλής ανάλυσης με εκατομμύρια μεταβλητές σχεδιασμού χρησιμοποιώντας μερικές εκατοντάδες λειτουργικές αξιολογήσεις.
Herakovich CT	1984	Έρευνα για το εύρος τιμών του λόγου αποτελεσματικής διεύθυνσης poisson ν_{xz} για γωνιακές πτυχές πλαστικοποιητές.	Υπολογιστική μέθοδος	Τα αποτελέσματα για την εποξική γραφίτη δείχνουν ότι η αναλογία του αποτελεσματικού poisson διαμέσου του πάχους μπορεί να κυμαίνεται από ένα υψηλό 0,49 για ένα φύλλο έως ένα χαμηλό των -0,21 για ένα laminate. Έχει αποδειχθεί ότι οι αρνητικές τιμές της κατά xz είναι επίσης συχνό φαινόμενο για

				τύπους ελασμάτων.
Sigmund O, Torquato S.	1998	Μελέτη της μεθόδου βελτιστοποίησης στα σύνθετα υλικά	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Η μέθοδος βελτιστοποίησης δεν πρέπει να λειτουργεί ως εργαλείο για το σχεδιασμό σύνθετων υλικών.
Stavroulakis GE.	2005	Έρευνα των τελευταίων πληροφοριών της υπάρχουσας βιβλιογραφίας για τα αυξητικά υλικά με αρνητικό λόγο Poisson	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Τα αυξητικά υλικά εμφανίζονται αρκετά σπάνια στη φύση και είναι δύσκολο να κατανοήσουμε τη μηχανική τους συμπεριφορά, τα καινοτόμα προϊόντα και διαδικασίες τους. Προβλήματα στην ελαστοδυναμική και στην περιοχή της ελαστικότητας δεν έχουν συζητηθεί διεξοδικά στην ανοικτή βιβλιογραφία.
Liu Y, Hu H.	2010	Μελέτη των στοιχείων που υπάρχουν σχετικά με τα αγώγιμα πολυμερή υλικά και τις εφαρμογές τους	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Τα ενισχυτικά πολυμερή υλικά έχουν αρνητικό λόγο Poisson (NPR), εμφανίζονται παχύτερα όταν τεντώνονται και λεπτότερα όταν συμπιέζονται. Εμφανίζουν βοηθητική συμπεριφορά. Η εσωτερική δομή του υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκτηση του αυξητικού αποτελέσματος.

Alderson A, Alderson KL	2007	Μελέτη των τελευταίων βιβλιογραφικών στοιχείων σχετικά με τα αυξητικά υλικά και την αεροδιαστημική μηχανική τους.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Παρουσίαση στοιχείων σχετικά με το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη δοκιμή και τις πιθανές εφαρμογές των αυξητικών κυτταρικών στερεών, πολυμερών, σύνθετων υλικών και τις διατάξεις του αισθητήρα καθώς και παρουσίαση των εφαρμογών τους.
Ananthasuresh GK, Kota S, Kikuchi K	1994	Μελέτη της σύνθεσης του συμβατικού μηχανισμού MEMS	Πειραματική μέθοδος	Ο μηχανισμός αποτελεί πολύτιμο εργαλείο σύνθεσης για την αυτοματοποίηση του σχεδιασμού των βέλτιστων μικρομηχανικών συσκευών.
Frecker M.	1972	Μελέτη των μηχανισμών συμμόρφωσης που χρησιμοποιούν βελτιστοποίηση πολλαπλών κριτηρίων	Πειραματική μέθοδος	Οι μηχανισμοί συμμόρφωσης επιτυγχάνουν κίνηση και φόρτωση μέσα από την ελαστική παραμόρφωση. Η δομή εδάφους και το διαδιάστατο συνεχές είναι εξίσου σημαντικοί παράγοντες.
Shield RT, Prager W.	1970	Μελέτη της βελτιστοποίησης και του τρόπου χρήσης της στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.	Πειραματική μέθοδος	Η τεχνική βελτιστοποίησης πραγματοποιείται μακριά από κατοικήσιμες πόλεις και πράγματι πετυχαίνει τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
Rahmatalla S, Swan CC.	2005	Μελέτη της μεθόδου βελτιστοποίησης πάνω σε αραιωμένους μονόλιθους	Πειραματική μέθοδος	Επιτυχής επίλυση των δύο ένθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Bendsøe MP, Kikuchi N.	1988	Μελέτη των ιδιοτήτων των ανισοτροπικών υλικών με τη βοήθεια της μεθόδου της ομογενοποίησης	Πειραματική μέθοδος	Επιτυχής σχεδιασμός σταθερών υπολογιστικών σχημάτων δομικών στοιχείων.
Bendsøe M	1988	Μελέτη των τρόπων εξάλειψης της διακριτικής φύσης ενός προβλήματος με τη βοήθεια μιας συνάρτησης πυκνότητας.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Οι τομείς υψηλής πυκνότητας καθορίζουν το σχήμα του μηχανικού στοιχείου. Για ενδιάμεσες πυκνότητες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν παραμέτρους υλικού που δίδονται από ένα νόμο περί τεχνητών υλικών.
Rozvany GIN	2001	Αξιολόγηση και να σύγκριση των καθιερωμένων αριθμητικών μεθόδων βελτιστοποίησης δομών τοπολογίας	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Ο μηχανισμός έχει κατορθώσει να έχει εφαρμογή στο βιομηχανικό λογισμικό.
YunanPrawoto	2012	Εξέταση μηχανικών χαρακτηριστικών αυξητικών υλικών με μηδενικό ή αρνητικό λόγο Poisson	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Τα αυξητικά υλικά είναι σημαντικά για την ανάπτυξη της τεχνολογίας αλλά και της θεωρίας του αρνητικού λόγου. Χρειάζονται περαιτέρω έρευνες σχετικά με τις μικροδομές τους.
V. H. Carneiro. J.Meireles, H. Puga	2013	Καταγραφή των χαρακτηριστικών των αυξητικών υλικών με αρνητικό λόγο Poisson	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Οι εσωτερική δομή των υλικών (ίνες και κυψελίδες) ευθύνονται για τα χαρακτηριστικά και τις συμπεριφορές παραμόρφωσης που παρουσιάζουν.

Wei Yang Zhong-Ming Li Wei Shi Μπανγκ-Χου Xie Ming-Bo Yang	2004	Εύρεση αυξητικών υλικών πέρα από τη πολυουθεράνη και καταγραφή ιδιοτήτων, μηχανισμών και εφαρμογών τους	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Βρέθηκαν υλικά με αντί – δαισθητικό αποτέλεσμα της αυξητικότητας τους λόγω των διαφορετικών εσωτερικών μικροδομών τους.
Katia Bertoldi, Pedro M. Reis Stephen Willshaw Tom Mullin	2009	Μελέτη του αρνητικού λόγου Poisson και της σχέσης που έχει με την ελαστική αστάθεια των αυξητικών υλικών	Πειραματικής μέθοδος	Η συμπεριφορά των αυξητικών υλικών σχετίζεται με τον μετασχηματισμό των πρότυπων υλικών που είναι φτιαγμένα τα υλικά.
G. N. Greaves, A. L. Greer, R. S. Lakes & T. Rouxel	2011	Σύγκριση της ανθεκτικότητας των αυξητικών υλικών όταν βρίσκονται σε παραμόρφωση εξαιτίας κάποιου μηχανικού φορτίου.	Υπολογιστική μέθοδος	Το ελαστικό όριο των αυξητικών υλικών σχετίζεται με τη πυκνότητα, τη συνδεσιμότητα, την ολκιμότητα και την ανθεκτικότητα των στερεών υλικών.
J. Dirrenberger a S. Forest και D. Jeulin	2012	Διερεύνηση της ελαστικό ποιήσης των αυξητικών υλικών	Πειραματική μέθοδος	Η πλαστική ανισοτροπία εξασθενεί με πλαστικό κορεσμό.
F. Dos Reis, J.F. Ganghoffer	2012	Οι μηχανικές ιδιότητες των αυξητικών υλικών και ο ρόλος του λόγου Poisson	Πειραματική μέθοδος	Ο λόγος του Poisson έχει την ικανότητα να προβλέπει με ακρίβεια τις συμπεριφορές των υλικών.
Richard Critchley Ilaria Corni Julian A. Wharton Frank C. Walsh Robert J. K. Wood Keith R. Stokes	2013	Μελέτη των αυξητικών υλικών και πιο συγκεκριμένα των αυξητικών αφρών, των επιδράσεων, των παραμέτρων και των ιδιοτήτων του.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Έχουν ιδιότητες που τα χαρακτηρίζουν και ευθύνονται για τις ιδιότητες τους όπως: η πυκνότητα, η ακαμψία, η αντοχή στη θραύση και η υγρασία.
M. Bianchia F. Scarpaa C.W. Smith	2010	Έλεγχος της μνήμης των υλικών σχετικά με την επαναφορά	Πειραματική μέθοδος	Παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες διαφορές πριν και μετά την

		τους στο αρχικό τους σχήμα ύστερα από την παραμόρφωση τους.		επίδραση μνήμης, που έδειξαν μηχανική συμπεριφορά μοναδική σε κάθε μια από αυτές τις φάσεις. Το φαινόμενο μνήμης σχήματος παίζει σημαντικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά των αφουρτικών αφρών.
Sigmund O.	2001	Παρουσίαση και μελέτη της εφαρμογής Matlab	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	Το πρόγραμμα μπορεί να λύσει προβλήματα με περιπτώσεις πολλαπλών φορτίων ενώ η χρήση του προορίζεται για εκπαιδευτικούς σκοπούς.
Svanberg K	1987	Μελέτη και παρουσίαση της νέας μεθόδου για τον μη γραμμικό προγραμματισμό γενικά και τη δομική βελτιστοποίηση.	Πειραματική μέθοδος	Σε κάθε βήμα της μεθόδου λύνεται και ένα υπό-πρόβλημα μέρος του κυρίως προβλήματος. Η λύση των υπό προβλημάτων μπορεί να σταθεροποιήσει και να επιτύχει τη σύγκλιση της γενικής διαδικασίας.

3.2 Μετανάλυση

Στο παραπάνω πίνακα καταγράφονται οι 41 πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγγραφή δυο πολύ σημαντικών άρθρων από τον κ. Σταυρουλάκη, σχετικά με τα αυξητικά υλικά και τον αρνητικό λόγο Poisson. Από το συγκεντρωτικό πίνακα παρατηρείται ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στα άρθρα προκειμένου να εξάγουν νέες πληροφορίες για τα αυξητικά υλικά ήταν τέσσερις: η βιβλιογραφική, η πειραματική, η συγκριτική και η υπολογιστική μέθοδος.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Συγγραφέας	Χρονολογία	Σκοπός	Αποτέλεσμα
Rozvany, G. I. N	1989	Έρευνα των κριτηρίων στατικής-κινηματικής βελτιστοποίησης και τις εφαρμογές τους	Σύνοψη όλων των θεωριών από το 1980-1988
Lakes, R	1987	Μελέτη δομής αφρού με αρνητικό λόγο Poisson	Το υλικό παραμορφώνεται ανάλογα με την ιδιότητα του κάθε υλικού και τον αρνητικό λόγο Poisson που έχει.
Caddock, B. D.; Evans, K. E.	1989	Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και δομών μικροπορώδων υλικών με αρνητικό λόγο Poisson.	Ο αρνητικό λόγος Poisson διαφέρει ανάλογα με τα υλικά. Μπορεί να φτάσει έως και -12. Τα μικροπορώδη υλικά έχουν μεγάλη αρνητική αναλογία Poisson.
Theocaris, P. S.; Panagiotopoulos, P. D.	1993	Έρευνα τεχνικών αποκατάστασης μηχανικών προβλημάτων (ρωγμές)	Εφαρμογή μοντέλου Horfield και νευρωτικού μοντέλου για αποκατάσταση των ανισοτήτων. Υπάρχουν πολλές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν και δημιουργούν περαιτέρω προβλήματα.
Price KV, Storn R.	1995	Μελέτη της νέας μεθόδου για τη προσέγγιση των μη γραμμικών και μη διαφοροποιήσιμων συνεχών διαστημικών λειτουργιών σε συνεχείς χώρους	Η νέα μέθοδος απαιτεί λίγες μεταβλητές ελέγχου, είναι ισχυρή, εύκολη στη χρήση και προσφέρεται πολύ καλά στην παράλληλη καταμέτρηση.
Sigmund O	2011	Μελέτη της επιστημονικής σημασίας και της πρακτικής των ερευνητών που	Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης τοπολογίας βασίζονται σε κλίση μπορούν να επιλύσουν αποτελεσματικά τα προβλήματα υψηλής ανάλυσης με εκατομμύρια μεταβλητές σχεδιασμού

		χρησιμοποιούν τεράστιους υπολογιστικούς πόρους για την επίλυση απλών προβλημάτων.	χρησιμοποιώντας μερικές εκατοντάδες λειτουργικές αξιολογήσεις.
Sigmund O, Torquato S.	1998	Μελέτη της μεθόδου βελτιστοποίησης στα σύνθετα υλικά	Η μέθοδος βελτιστοποίησης δεν πρέπει να λειτουργεί ως εργαλείο για το σχεδιασμό σύνθετων υλικών.
Stavroulakis GE.	2005	Έρευνα των τελευταίων πληροφοριών της υπάρχουσας βιβλιογραφίας για τα αυξητικά υλικά με αρνητικό λόγο Poisson	Τα αυξητικά υλικά εμφανίζονται αρκετά σπάνια στη φύση και είναι δύσκολο να κατανοήσουμε τη μηχανική τους συμπεριφορά, τα καινοτόμα προϊόντα και διαδικασίες τους. Προβλήματα στην ελαστοδυναμική και στην περιοχή της ελαστικότητας δεν έχουν συζητηθεί διεξοδικά στην ανοικτή βιβλιογραφία.
Liu Y, Hu H.	2010	Μελέτη των στοιχείων που υπάρχουν σχετικά με τα αγώγιμα πολυμερή υλικά και τις εφαρμογές τους	Τα ενισχυτικά πολυμερή υλικά έχουν αρνητικό λόγο Poisson (NPR), εμφανίζονται παχύτερα όταν τεντώνονται και λεπτότερα όταν συμπιέζονται. Εμφανίζουν βοηθητική συμπεριφορά. Η εσωτερική δομή του υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκτηση του αυξητικού αποτελέσματος.
Alderson A, Alderson KL	2007	Μελέτη των τελευταίων βιβλιογραφικών στοιχείων σχετικά με τα αυξητικά υλικά και την αεροδιαστημική μηχανική τους.	Παρουσίαση στοιχείων σχετικά με το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη δοκιμή και τις πιθανές εφαρμογές των αυξητικών κυτταρικών στερεών, πολυμερών, σύνθετων υλικών και τις διατάξεις του αισθητήρα καθώς και παρουσίαση των εφαρμογών τους.

Bendsøe M	1988	Μελέτη των τρόπων εξάλειψης της διακριτικής φύσης ενός προβλήματος με τη βοήθεια μιας συνάρτησης πυκνότητας.	Οι τομείς υψηλής πυκνότητας καθορίζουν το σχήμα του μηχανικού στοιχείου. Για ενδιάμεσες πυκνότητες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν παραμέτρους υλικού που δίδονται από ένα νόμο περί τεχνητών υλικών.
Rozvany GIN	2001	Αξιολόγηση και να σύγκριση των καθιερωμένων αριθμητικών μεθόδων βελτιστοποίησης δομών τοπολογίας	Ο μηχανισμός έχει κατορθώσει να έχει εφαρμογή στο βιομηχανικό λογισμικό.
Sigmund O.	2001	Παρουσίαση και μελέτη της εφαρμογής Matlab	Το πρόγραμμα μπορεί να λύσει προβλήματα με περιπτώσεις πολλαπλών φορτίων ενώ η χρήση του προορίζεται για εκπαιδευτικούς σκοπούς.
V. H. Carneiro. J. Meireles, H. Puga	2013	Καταγραφή των χαρακτηριστικών των αυξητικών υλικών με αρνητικό λόγο Poisson	Οι εσωτερική δομή των υλικών (ίνες και κυψελίδες) ευθύνονται για τα χαρακτηριστικά και τις συμπεριφορές παραμόρφωσης που παρουσιάζουν.
Wei YangZhong-Ming LiWei ShiΜπανγκ-ΧουXieMing-Bo Yang	2004	Εύρεση αυξητικών υλικών πέρα από τη πολυουθεράνη και καταγραφή ιδιοτήτων, μηχανισμών και εφαρμογών τους	Βρέθηκαν υλικά με αντί – δισαιθητικό αποτέλεσμα της αυξητικότητας τους λόγω των διαφορετικών εσωτερικών μικροδομών τους.
RichardCritchleyIlariaCorniJulianA. WhartonFrankC. WalshRobertJ. K. WoodKeithR. Stokes	2013	Μελέτη των αυξητικών υλικών και πιο συγκεκριμένα των αυξητικών αφρών, των επιδράσεων, των παραμέτρων και των ιδιοτήτων	Έχουν ιδιότητες που τα χαρακτηρίζουν και ευθύνονται για τις ιδιότητες τους όπως: η πυκνότητα, η ακαμψία, η αντοχή στη θραύση και η υγρασία.

		του.	
YunanPrawoto	2012	Εξέταση μηχανικών χαρακτηριστικών αυξητικών υλικών με μηδενικό ή αρνητικό λόγο Poisson	Τα αυξητικά υλικά είναι σημαντικά για την ανάπτυξη της τεχνολογίας αλλά και της θεωρίας του αρνητικού λόγου. Χρειάζονται περαιτέρω έρευνες σχετικά με τις μικροδομές τους.

Οι 17 πηγές που μεταναλύθηκαν χρησιμοποίησαν τη μέθοδο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης προκειμένου να πραγματοποιήσουν τη μελέτη τους και να εξάγουν τα συμπεράσματά τους. Παρατηρείται ότι αυτή η μέθοδος ήταν διαδεδομένη από τα παλιά χρόνια ενώ χρησιμοποιείται από τους επιστήμονες μέχρι και σήμερα. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση χρησιμοποιήθηκε από τους συγγραφείς προκειμένου να ομαδοποιήσουν όλα τα υπάρχοντα στοιχεία σχετικά με το θέμα που ερευνούσαν οι συγγραφείς των άρθρων. Ύστερα από τη καταγραφή των στοιχείων οι συγγραφείς οδηγούνταν σε συμπεράσματα.

Οι έρευνες αφορούσαν τα αυξητικά υλικά και πιο συγκεκριμένα τη μελέτη των δομών των υλικών με αρνητικό λόγο Poisson, τις ιδιότητές τους, τις τεχνικές κατασκευής τους, τα χαρακτηριστικά τους και τους τρόπους αξιοποίησής τους αλλά και τον λόγο που χαρακτηρίζονται ως βοηθητικά υλικά. Τα χαρακτηριστικά των υλικών είναι η ελαστικότητα, η διόγκωση λόγω υγρασίας, η διαστολή λόγω θερμότητας, η αντοχή και η αγωγιμότητα. Οι έρευνες κατέληξαν στο ότι τα αυξητικά υλικά έχουν διαφορετικούς αρνητικούς λόγους Poisson και ανάλογα με το βαθμό που έχει το κάθε ένα υφίσταται και την ανάλογη παραμόρφωση. Ο αρνητικός λόγος κυμαίνεται μεταξύ

του -1 έως -12. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αρνητικός βαθμός τόσο περισσότερο λεπταίνουν και τεντώνονται τα υλικά όταν συμπιέζονται. Ακόμη μελετούσαν τη μηχανική τους, τη λειτουργικότητα τους, των στατικών και κινηματικών χαρακτηριστικών τους, την αγωγιμότητα και την αεροδυναμική τους. Μέσα από αυτές τη συγκέντρωση αυτών των ερευνών οι αναγνώστες αποκτούν πλήρη εικόνα για τα αυξητικά υλικά και τα χαρακτηριστικά τους. Ακόμα μέσα από τη συγκέντρωση της βιβλιογραφίας εξαγόntonουσαν οι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν από τη χρήση των υλικών αυτών. Επιπλέον παρατηρείται ότι η πρώτη θεωρία σχετικά με τη βελτιστοποίηση των υλικών του AGM Michell χρησιμοποιείται ως βασικό θεώρημα από όλους μέχρι και σήμερα. Τέλος, παρουσιάζονται και αναλύονται νέες μέθοδοι εφαρμογής των υλικών, όπως είναι το μοντέλο Hopfield.

Πειραματική μέθοδος			
Συγγραφέας	Χρονολογία	Σκοπός	Αποτέλεσμα
Evans, K.	1989	Μελέτη μικροδομών εφελκυσμού που έχουν διαμορφωθεί έτσι ώστε να εμφανίζουν αρνητικές αναλογίες Poisson	Σε όλες τις δομές συμβαίνουν τοπολογικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ πρώτου και δεύτερου πλησιέστερου σωματιδίου γειτόνων για την παραγωγή συνεργατικών εγκάρσιων επεκτάσεων υπό διαμήκη φόρτιση.
Evans, K.	1990	Μελέτη της δραστηριότητας των υλικών με αρνητικό λόγο Poisson	Μια σημαντική αλλαγή στην τιμή του λόγου έχει σημαντικές επιπτώσεις στη μηχανική απόδοση του υλικού.
Rinde, J. A.	1970	Μελέτη της αναλογίας του αρνητικού λόγου Poisson σε άκαμπτους αφρούς χαμηλής	Για αφρούς πολυστερίνης και για αφρούς πολουρεθάνης, ο λόγος Poisson είναι μεγαλύτερος στην τάση από τη συμπίεση.

		πυκνότητας	
Friis, E. A.; Lakes, R. S.; Park, J.B.	1988	Μελέτη μηχανικών χαρακτηριστικών και συμπεριφορά πολυμερών υλικών και μεταλλικών αφρών με αρνητικό λόγο Poisson	Αφροί με δομές επανεισόδου έδειξαν αρνητικές αναλογίες Poisson και μεγάλη ελαστικότητα. Αφροί με αρνητικές αναλογίες Poisson παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές και υλικά.
Ananthasuresh GK, Kota S, Kikuchi K	1994	Μελέτη της σύνθεσης του συμβατικού μηχανισμού MEMS	Ο μηχανισμός αποτελεί πολύτιμο εργαλείο σύνθεσης για την αυτοματοποίηση του σχεδιασμού των βέλτιστων μικρομηχανικών συσκευών.
Frecker M.	1972	Μελέτη των μηχανισμών συμμόρφωσης που χρησιμοποιούν βελτιστοποίηση πολλαπλών κριτηρίων	Οι μηχανισμοί συμμόρφωσης επιτυγχάνουν κίνηση και φόρτωση μέσα από την ελαστική παραμόρφωση. Η δομή εδάφους και το διαστάτο συνεχές είναι εξίσου σημαντικοί παράγοντες.
Shield RT, Prager W.	1970	Μελέτη της βελτιστοποίησης και του τρόπου χρήσης της στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.	Η τεχνική βελτιστοποίησης πραγματοποιείται μακριά από κατοικήσιμες πόλεις και πράγματι πετυχαίνει τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
Rahmatalla S, Swan CC.	2005	Μελέτη της μεθόδου βελτιστοποίησης πάνω σε αραιωμένους μονόλιθους	Επιτυχής επίλυση των δύο ένθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης.
Bendsøe MP, Kikuchi N.	1988	Μελέτη των ιδιοτήτων των ανισοτροπικών υλικών με τη βοήθεια της μεθόδου της ομογενοποίησης	Επιτυχής σχεδιασμός σταθερών υπολογιστικών σχημάτων δομικών στοιχείων.
Svanberg K	1987	Μελέτη και παρουσίαση της νέας μεθόδου για τον μη γραμμικό προγραμματισμό γενικά και τη δομική	Σε κάθε βήμα της μεθόδου λύνεται και ένα υπο- πρόβλημα μέρος του κυρίως προβλήματος. Η λύση των υπο προβλημάτων μπορεί να σταθεροποιήσει και να επιτύχει τη σύγκλιση της γενικής διαδικασίας.

		βελτιστοποίηση.	
J. Dirrenberger a S. Forest και D. Jeulin	2012	Διερεύνηση της ελαστικό ποιήσης των αυξητικών υλικών	Η πλαστική ανισοτροπία εξασθενεί με πλαστικό κορεσμό.
F.Dos Reis, J.F.Ganghoffer	2012	Οι μηχανικές ιδιότητες των αυξητικών υλικών και ο ρόλος του λόγου Poisson	Ο λόγος του Poisson έχει την ικανότητα να προβλέπει με ακρίβεια τις συμπεριφορές των υλικών.
M.BianchiaF.ScarpaaC.W.Smith	2010	Έλεγχος της μνήμης των υλικών σχετικά με την επαναφορά τους στο αρχικό τους σχήμα ύστερα από την παραμόρφωση τους.	Παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες διαφορές πριν και μετά την επίδραση μνήμης, που έδειξαν μηχανική συμπεριφορά μοναδική σε κάθε μια από αυτές τις φάσεις. Το φαινόμενο μνήμης σχήματος παίζει σημαντικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά των αφουετικών αφρών
Katia Bertoldi, Pedro M. Reis Stephen Willshaw Tom Mullin	2009	Μελέτη του αρνητικού λόγου Poisson και της σχέσης που έχει με την ελαστική αστάθεια των αυξητικών υλικών	Η συμπεριφορά των αυξητικών υλικών σχετίζεται με τον μετασχηματισμό των πρότυπων υλικών που είναι φτιαγμένα τα υλικά.

Δεύτερη δημοφιλέστερη μέθοδος με 14 άρθρα είναι τα πειράματα που πραγματοποιούν οι συγγραφείς – ερευνητές, προκειμένου να δουν κατά πόσο ισχύει ή όχι η θεωρία που μελετάνε. Οι έρευνες που χρησιμοποιήθηκαν στις εργασίες τους θέλησαν να αποδείξουν τις ιδιότητες των αυξητικών υλικών και των δομών τους, οι οποίες ευθύνονται για την εμφάνιση του αρνητικού λόγου Poisson. Από τα πειράματα λοιπόν προκύπτει πως τα υλικά αυτά πράγματι έχουν ιδιότητες κάμψης και λυγίσματος που δεν έχουν τα υπόλοιπα υλικά. Οι ιδιότητες αυτές προκύπτουν μέσα από τις αλληλεπιδράσεις και τις αλλαγές που γίνονται στις δομές των υλικών αλλά και των κυττάρων των κυψελών του αφρού. Τα πειράματα είχαν ως σκοπό να μελετήσουν τον εκφυλισμό των δομών και τα χαρακτηριστικά των κυτταρικών δομών τους και των ινών τους. Ακόμη μέσα από τις πειραματικές διαδικασίες προκύπτει και η αποδοχή της θεωρία που δηλώνει ότι τα αυξητικά υλικά παραμορφώνονται ανάλογα με τον βαθμό του αρνητικού λόγου Poisson που έχουν.

Τα περισσότερα πειράματα ερευνούσαν μεθόδους σχετικά με βελτιστοποίηση των υλικών και πιο συγκεκριμένα τη μέθοδο πάνω σε μονόλιθους η οποία επιτυγχάνεται μετά από επίλυση δυο λίθων, τη μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μπορεί να επιτευχθεί σε απομακρυσμένες περιοχές και τη μέθοδο με τον μη γραμμικό προσανατολισμό στην οποία μέσα από την επίλυση των μικρών προβλημάτων επιτυγχάνεται η σύγκλιση της όλης διαδικασίας.

Υπολογιστική μέθοδος

Συγγραφέας	Χρονολογία	Σκοπός	Αποτέλεσμα
Kolpakov, A. G.:	1985	Υπολογισμός των ελαστικών χαρακτηριστικών των δομών με αρνητικό λόγο Poisson	Η λύση του κυτταρικού προβλήματος σε δομές πλαισίου τύπου δοκού ή κελύφους μπορεί να ληφθεί με προσεγγιστικές μεθόδους με οποιαδήποτε ακρίβεια, η οποία διέπεται απλώς από την επιλογή του μοντέλου.
Milton, G. W.	1992	Μελέτη σύνθετων υλικών με εξαγωνική συμμετρία, τα οποία βρέθηκαν με τους λόγους του Poisson αυθαίρετα κοντά στο -1.	Τα ελαστικά ισοτροπικά δισδιάστατα και τρισδιάστατα σύνθετα με τον λόγο Poisson πλησιάζοντας -1 ως $r \rightarrow 0$ μπορούν να παραχθούν απλά με στρωματοποίηση των συστατικών υλικών σε διαφορετικές κατευθύνσεις σε ευρέως διαχωρισμένες κλίμακες μήκους.
Li, Y	1976	Μελέτη της ανισοτροπικής συμπεριφοράς του λόγου Poisson και των συντελεστών διάτμησης και Young σε εξαγωνικούς κρυστάλλους	Υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των συντελεστών που μελετώνται
José Miranda, Guedes Noboru Kikuchi	1990	Επεξεργασία των στοιχείων των συνθετικών υλικών μέσα από την ομογενοποίηση και τις προσαρμοστικές μεθόδους	Ανάπτυξη τεχνικών υπολογισμών που αναλύουν την ικανότητα των συνθετικών υλικών
Osher S, Sethian JA.	1988	Έρευνα νέων αλγορίθμων που συσχετίζουν τη ταχύτητα που είναι εξαρτώμενη από τη καμπυλότητα.	Δημιουργία αλγορίθμων παρόμοιους με τις εξισώσεις Hamilton-Jacobi και με τη βοήθεια ολιστικών σχημάτων που καταγράφουν με ακρίβεια το σχηματισμό αιχμηρών κλίσεων και αιχμών στα κινούμενα μέτωπα.
G. N. Greaves, A. L. Greer, R. S. Lakes & T. Rouxel	2011	Σύγκριση της ανθεκτικότητας των αυξητικών υλικών όταν βρίσκονται σε παραμόρφωση εξαιτίας κάποιου μηχανικού φορτίου.	Το ελαστικό όριο των αυξητικών υλικών σχετίζεται με τη πυκνότητα, τη συνδεσιμότητα, την ολκιμότητα και την ανθεκτικότητα των στερεών υλικών.
Herakovich CT	1984	Έρευνα για το εύρος τιμών	Τα αποτελέσματα για την εποξική γραφίτη

		<p>του λόγου αποτελεσματικής διεύθυνσης poisson ν_{xz} για γωνιακές πτυχές πλαστικοποιητές.</p>	<p>δείχνουν ότι η αναλογία του αποτελεσματικού poisson διαμέσου του πάχους μπορεί να κυμαίνεται από ένα υψηλό 0,49 για ένα φύλλο έως ένα χαμηλό των -0,21 για ένα laminate. Έχει αποδειχθεί ότι οι αρνητικές τιμές της κατά xz είναι επίσης συχνό φαινόμενο για τύπους ελασμάτων.</p>
--	--	--	--

Υπολογιστικές και μαθηματικές μεθόδους χρησιμοποιούν 7 εκ των συγγραφέων στα άρθρα τους. Οι συγγραφείς αυτοί θέλησαν να δουν κατά πόσο ισχύει μια μέθοδος ή όχι και να την ελέγξουν μέσα από μαθηματικές εξισώσεις και τύπους. Πολλοί από αυτούς χρησιμοποίησαν ακόμη και μεθόδου φυσικής προκειμένου να ελέγξουν τη θεωρία που μελετούσαν.

Τις υπολογιστικές μεθόδους τις προτιμούσαν οι συγγραφείς που μελετούν και εξετάζουν τις μορφές των αυξητικών υλικών, τον υπολογισμό της ελαστικότητας τους που τα χαρακτηρίζει και τη σχέση που έχει με αυτή ο αρνητικός λόγος Poisson. Ακόμη σχετικά με την ελαστικότητα υπολογίζεται η πυκνότητα της ελαστικής καταπόνησης των υλικών αυτών.

Οι έρευνες αυτές επεκτείνονται και στην εύρεση νέων μεθόδων και αλγορίθμων σχετικά με τα χαρακτηριστικά των υλικών όπως είναι η ταχύτητα, η καμπυλότητα τους, οι τιμές που μπορεί να λάβει ο αρνητικός λόγος Poisson καθώς και την δημιουργία νέων συστημάτων μελέτης όπως είναι το DCOC, το οποίο υπολογίζει την αποδοτικότητα των αυξητικών υλικών αλλά και τα προβλήματα τα οποία μπορούν να παρουσιαστούν.

Συγκριτική μέθοδος

Συγγραφέας	Χρονολογία	Σκοπός	Αποτέλεσμα
Almgren, R. F.:	1985	Μελέτη ισότροπων υλικών με ελαστικές ιδιότητες με αρνητικό λόγο Poisson -1	Ανάλυση της δομής των ράβδων, μεντεσέδων και ελατηρίων και των δομών τους μέσω μικροσκοπικής μελέτης.
Eberhart RC, Kennedy J. A	1995	Έρευνα για το κατάλληλο εργαλείο βελτιστοποίησης σφαιρικών σωματιδίων	Υπάρχουν δυο μέθοδοι σύγκρισης που εφαρμόζονται και προτιμώνται. Οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη κατάρτιση νευρωνικών δικτύων και εκμάθησης εργασιών με ρομπότ
Kennedy J, Eberhart RC.	1995	Έρευνα για τη κατάλληλη μέθοδο βελτιστοποίησης των μη γραμμικών λειτουργιών σφαιρικών σωματιδίων	Υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και της τεχνητής ζωής και των γενετικών αλγορίθμων.

Σε 3 άρθρα βρέθηκε ότι οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τη μέθοδο της σύγκριση προκειμένου να στηρίξουν και να αποδείξουν τη θεωρία τους. Τη συγκριτική μέθοδο χρησιμοποίησαν όσοι ήθελαν να μελετήσουν τη διαφορά της τάσης μεταξύ των ορθότροπων υλικών και των αυξητικών. Ωστόσο, επιλέχθηκαν κυρίως για να βρουν τις καταλληλότερες μεθόδους για τη βελτιστοποίηση των σφαιρικών σωματιδίων, οι οποίες είναι η κατάρτιση νευρωνικών δικτύων και η εκμάθηση εργασιών με ρομπότ, αλλά και για τη βελτιστοποίηση αλλά και των μη σφαιρικών σωματιδίων, οι οποίες είναι η μέθοδος της τεχνητής ζωής και η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων.

Επιπλέον, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να συγκριθούν οι ιδιότητες των αυξητικών υλικών με αρνητικό βαθμό Poisson -1 , τα οποία μετά από σύγκριση

έδειξαν πως διαφέρουν μεταξύ τους καθώς εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες στην ένταση της συμπίεσης.

Τέλος κάποια πολύ σημαντικά άρθρα τα οποία δεν κατηγοριοποιήθηκαν γιατί αποτελούν υπολογιστικές προσομοιώσεις αυξητικών υλικών, βέλτιστου σχεδιασμού της μικροδομής και διερεύνηση εφαρμογής σε κατασκευές είναι τα εξής :

P.S. Theocaris, G.E. Stavroulakis, P.D. Panagiotopoulos: Negative Poisson's ratio in composites with star-shaped inclusions: a numerical homogenization approach . Archive of Applied Mechanics (πρώην Ingenieur Archiv) 67(4), 274-286, 1997.

P.S. Theocaris, G.E. Stavroulakis, P.D. Panagiotopoulos: Calculation of effective transverse elastic moduli of fiber-reinforced composites by numerical homogenization. Composites Science and Technology, 57(5), 573-586, 1997.

P.S. Theocaris, G.E. Stavroulakis: The effective elastic moduli of plane-weave woven fabric composites by numerical homogenization. Journal of Reinforced Plastics and Composites 16(18), 1675-1691, 1997.

P.S. Theocaris, G.E. Stavroulakis: Multilevel optimal design of composite structures, including materials with negative Poisson's ratio. Structural Optimization 15(1), 8-15, 1998.

P.S. Theocaris, G.E. Stavroulakis: The homogenization method for the study of variation of Poisson's ratio in fiber composites. Archive of Applied Mechanics, 69(3-4), 281-295, 1998.

Kaminakis, N.T., Stavroulakis, G.E. Topology optimization for compliant mechanisms, using evolutionary-hybrid algorithms and application to the design of auxetic materials (2012) Composites Part B: Engineering, 43 (6), pp. 2655-2668.

Kaminakis, N.T., Drosopoulos, G.A., Stavroulakis, G.E. Design and verification of auxetic microstructures using topology optimization and homogenization (2014) Archive of Applied Mechanics, 85 (9-10), pp. 1289-1306

Drosopoulos, G.A., Kaminakis, N., Papadogianni, N., Stavroulakis, G.E. Mechanical behaviour of auxetic microstructures using contact mechanics and elastoplasticity(2016) Key Engineering Materials, 681, pp. 100-116.

4. Συμπεράσματα

Τα αυξητικά υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές κατασκευές. Σε συνδυασμό με τα κατάλληλα προϊόντα μπορούν να πετύχουν ισχυρές και μοναδικές ιδιότητες. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των υψηλής αντοχής σε κράσεις που τα χαρακτηρίζει. Οι νέες τεχνολογίες που έχουν ανακαλυφθεί έχουν βοηθήσει πολύ στην εξέλιξη τους και έχουν ενδυνάμωση ακόμη περισσότερο την αντοχή που δείχνει στους κραδασμούς και τα κύματα. Ακόμη χαρακτηρίζονται από αντοχή, ελαστικότητα και μεγάλη απορροφητική ικανότητα των κραδασμών λόγω των κυψελοειδών δομών τους. Χρησιμοποιούνται πιο συχνά στις κατασκευές σπιτιών καθώς τα προστατεύουν από τις ισχυρές σεισμικές δονήσεις.

Είναι γνωστά και ως υλικά Poisson εξαιτίας της ελαστικότητας που διαθέτουν. Σε αντίθεση με άλλα υλικά τα συγκεκριμένα γίνονται παχύτερα όταν τεντωθούν και λεπτότερα όταν συμπυκνωθούν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το αυξητικό συνθετικό υλικό πολυμερές πολυτετραφθοροαιθυλένιο (teflon) που εφαρμόζεται πολύ συχνά τα τελευταία έτη.

Ο λόγος του Poisson χρησιμοποιείται για να μετρηθούν οι μεταβολές που συμβαίνουν στα ελαστικά στα υλικά κατά τη συμπίεση και την αποσυμπίεση τους. Όσα από αυτά εμφανίζουν αρνητικό λόγο στην εξίσωση αυτή ορίζονται ως αυξητικά υλικά. Πιο συγκεκριμένα ο λόγος του Poisson εκφράζει τις αναλογίες των εγκάρσιων συστολών προς τις διαμήκειες συστολές που συμβαίνουν εξαιτίας των εκφυλιστικών δυνάμεων.

Σήμερα, η τεχνολογία έχει προχωρήσει πολύ και αυτό έχει βοηθήσει στην εφαρμογή τους καθώς, τα αυξητικά υλικά χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς πέρα από την

κατασκευή κτηρίων. Οι βιοιατρικές επιστήμες χρησιμοποιούν αυξητικά υλικά για την δημιουργία νέων μεθόδων. Το ίδιο συμβαίνει και με τις βιομηχανίες που τα χρησιμοποιούν για να δημιουργήσουν αυτοκίνητα, πλοία, σκάφη αλλά ακόμα και συσκευασίες και ωτοασπίδες.

Παραπάνω συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αυξητικών υλικών με αρνητικό λόγο Poisson τα οποία επιβεβαιώνονται μέσα από τη συστηματική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε. Η συστηματική ανασκόπηση έδειξε πως τα υλικά αυτά έχουν αρνητικό λόγο που κυμαίνεται από το -1 έως το -12. Ακόμη έδειξε πως τα αυξητικά υλικά έχουν αυτές τις ιδιότητες εξαιτίας των κυτταρικών δομών και των ινών τους.

Συνοψίζοντας παρατηρείται πως τα αυξητικά υλικά έχουν κάποιες πολύ χρήσιμες ιδιότητες για τον κατασκευαστικό τομέα, οι οποίες μπορούν να επιβεβαιωθούν και να καταγραφούν μέσα από τον αρνητικό λόγο Poisson που τα χαρακτηρίζει.

5. Βιβλιογραφία

Advances In Experimental Mechanics VIII (TTP, Trans Tech Publications 2011)

Choi, J. B. and Lakes, R. S., Design of a fastener based on negative Poisson's ratio foam. (1991). 205-212, Cellular Polymers.

Dvorak G, Micromechanics Of Composite Materials (Springer 2013)

Eliot GR Ashton, The Mill On The Floss (Penguin Books 2018)

Evans K, 'Auxetic Polymers: A New Range Of Materials' (1991) 15 Endeavour

Ghiasi, E. K. 'Numerical Investigation of Auxetic Materials Due to the Elastic' (2015). Ferdowsi University of Mashhad

Ghiasi, E. K. 'Numerical Investigation of Auxetic Materials Due to the Elastic' (2015). Ferdowsi University of Mashhad

Guo YW Goddard, 'Is Carbon Nitride Harder Than Diamond? No, But Its Girth Increases When Stretched (Negative Poisson Ratio)' (1995) 237 Chemical Physics Letters

He C, P Liu A Griffin, 'Toward Negative Poisson Ratio Polymers Through Molecular Design' (1998) 31 Macromolecules

Keams S, 'Analysis And Mitigation Of Mechanical Shock Effects, Massachusetts.' [2001]. Massachusetts Institute of Technology

Lakes R, 'No Contractile Obligations' (1992) 358 Nature

Liam, C., 'Testing and Modeling of Shock Mitigating Seats for High Speed Craft, Blacksburg' (2011). Virginia Polytechnic Institute and State University

Lim T, Auxetic Materials And Structures

LIM T, AUXETIC MATERIALS AND STRUCTURES (SPRINGER 2016)

Prawoto Y, Integration Of Mechanics Into Materials Science Research

Wilde W, C BrebbiaSHernández, High Performance Structures And Materials VI (WIT Press 2012)

Wojciechowski K, 'Constant Thermodynamic Tension Monte Carlo Studies Of Elastic Properties Of A Two-Dimensional System Of Hard Cyclic Hexamers' (1987) 61 Molecular Physics

Yanping LH Hong, 'A Review On Auxetic Structures And Polymeric Materials.' (2010) 5 Scientific research and essays

Κατρανίδης, Β., 'Μελέτη αυξητικών υλικών: Ανάλυση μηχανικών συνδέσμων σε πολύστρωτα σύνθετα και μεταλλικούς αφρούς' (2013). Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Παπαδογιάννη, Ν 'Μελέτη της επιρροής μη γραμμικών φαινομένων υλικού και επαφής - τριβής στη μηχανική απόκριση αυξητικών υλικών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.' (2015). Πολυτεχνείο Κρήτης

Παπανικολάου Γιώργος, Μουζάκης Διονύσης 'Σύνθετα υλικά'. (2007) Κλειδάριθμος, Αθήνα

Συντζανάκης, Α 'Μελέτη Αυξητικών Κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία', (2015).

Πολυτεχνείο Κρήτης