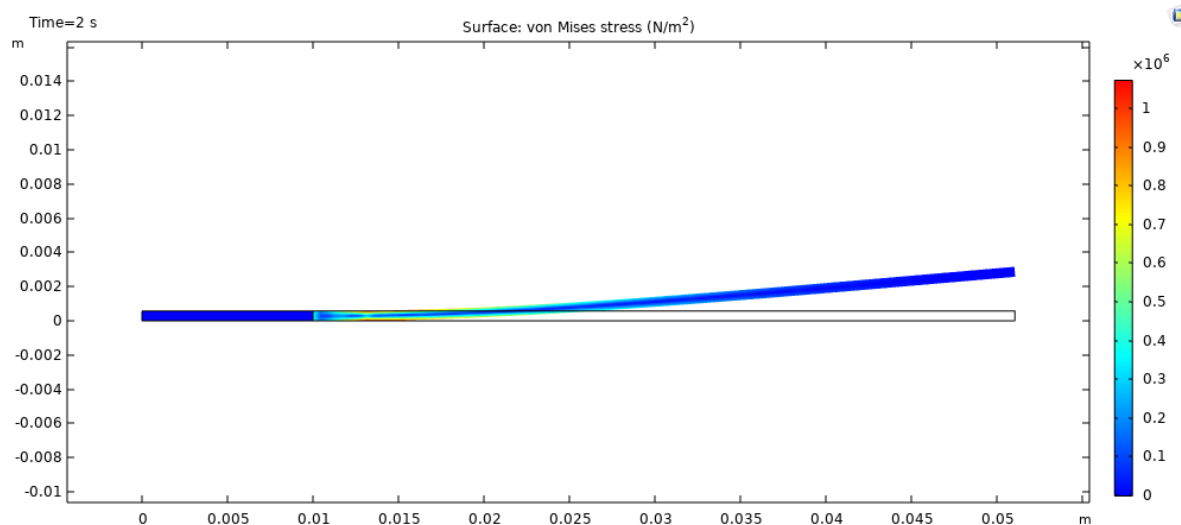


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη έξυπνων υλικών, βασικές αρχές και εφαρμογές»



Φοιτητής

Κωνσταντίνου Σπυριδούλα 516068

Επιβλέπων

Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης

Σεπτέμβριος 2022

Μελέτη έξυπνων υλικών, βασικές αρχές και εφαρμογές

Κωδικός: 22179

Φοιτητής: Κωνσταντίνου Σπυριδούλα

Εισηγητής: Δρ Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 21-03-2022

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 04-09-2022

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Κωνσταντίνου Σπυριδούλα που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Η εργασία αφορά τη μελέτη έξυπνων υλικών, τις βασικές αρχές και εφαρμογές τους. Περιγράφει τα έξυπνα υλικά και τις κατηγορίες τους. Η μελέτη εστίασε σε ένα νέο είδος έξυπνου υλικού το IPMC (Ionic polymer–metal composite) το οποίο ανήκει στην κατηγορία των ιοντικών πολυμερών και ερευνήθηκε η σχεδίαση και η κατασκευή του σε ένα ειδικό πρόγραμμα για προσομοίωση το COMSOL. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η Matlab για να ερευνηθεί το μοντέλο και τα χαρακτηριστικά του IPMC εξάγοντας χρήσιμες κυματομορφές.

Abstract

This work concerns the study of smart materials, their basic principles and applications. Describes smart materials and their categories. The study focused on a new type of smart material IPMC (Ionic polymer–metal composite) which belongs to the category of ionic polymers and its design and construction was developed in a special simulation program COMSOL. Also, Matlab was used to investigate the model and characteristics of the IPMC by extracting useful waveforms.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη πολύτιμη συμπαράσταση τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Abstract	v
Ευχαριστίες.....	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Σχημάτων	viii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	10
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Δομή της εργασίας	11
Κεφάλαιο 2ο: Εισαγωγή στα έξυπνα υλικά	12
2.1 Συστήματα Έξυπνων Υλικών	12
2.2 Έξυπνα Υλικά	21
2.3 Εφαρμογές.....	23
2.4 ΕΑΡ.....	25
Κεφάλαιο 3ο: IPMC - Μοντέλα	34
Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση Φυσικού Μοντέλου IPMC.....	40
4.1 Σχεδίαση Μοντέλου	40
4.2 Εμφάνιση Αποτελεσμάτων	57
Κεφάλαιο 5ο: Χαρακτηριστικά του Έξυπνου Υλικού IPMC	62
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 2.1: Μηχανισμός Ενεργοποίησης του IPMC	27
Εικόνα 3.1: Ηλεκτρικό μοντέλο IPMC	39
Εικόνα 4.1: Επιλογή Παραθύρου Physics	41
Εικόνα 4.2: Παράθυρο με τις γενικές ρυθμίσεις	43
Εικόνα 4.3: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του Membrane.....	44
Εικόνα 4.4: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του BottomElectrode	45
Εικόνα 4.5: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του TopElectrode	46
Εικόνα 4.6: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του Clamp	47
Εικόνα 4.7: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του Point 1	48
Εικόνα 4.8: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του Point 2	48
Εικόνα 4.9: IPMC δοκός	49
Εικόνα 4.10: Ρυθμίσεις παραμέτρων για το IPMC.....	50
Εικόνα 4.11: Ρυθμίσεις μεταβλητών για το IPMC – μοντέλο 1	51
Εικόνα 4.12: Ρυθμίσεις μεταβλητών για το IPMC – μοντέλο 2	51
Εικόνα 4.13: Ρυθμίσεις Electric Currents	53
Εικόνα 4.14: Ρυθμίσεις Transport of Diluted Species	54
Εικόνα 4.15: Ρυθμίσεις General Form PDE.....	55
Εικόνα 4.16: Ρυθμίσεις Solid Mechanics	56
Εικόνα 4.17: Κουμπί Compute	57
Εικόνα 4.18: Αποτέλεσμα προσομοίωσης – Κάμψη του IPMC – von Mises stress.....	58
Εικόνα 4.19: Αποτέλεσμα προσομοίωσης.....	58
Εικόνα 4.20: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 0.1Hz.....	59
Εικόνα 4.21: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 0.5Hz.....	59
Εικόνα 4.22: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 1Hz.....	60
Εικόνα 4.23: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 2Hz.....	60
Εικόνα 4.24: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται βηματική τάση εισόδου 2V	61
Εικόνα 5.1: Βηματική απόκριση H(s).....	62
Εικόνα 5.2: Βηματική απόκριση H2(s).....	63
Εικόνα 5.3: Bode Διάγραμμα H(s)	64
Εικόνα 5.4: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 0.1Hz.....	64
Εικόνα 5.5: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 0.5Hz.....	65
Εικόνα 5.6: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 1Hz.....	65

Εικόνα 5.7: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 5Hz.....	66
Εικόνα 5.8: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τετραγωνική τάση εισόδου με πλάτος 2V και συχνότητα 0.1Hz.....	66
Εικόνα 5.9: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τετραγωνική τάση εισόδου με πλάτος 2V και συχνότητα 0.5Hz.....	67

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Τα έξυπνα υλικά είναι κοινή ονομασία για μια ευρεία ομάδα διαφορετικών ουσιών. Το γενικό χαρακτηριστικό όλων των είναι το γεγονός ότι μία ή περισσότερες ιδιότητες ενδέχεται να αλλοιωθούν σημαντικά υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Η σημερινή εποχή θεωρείται η εποχή των έξυπνων υλικών. Παλαιότερα, το έξυπνο υλικό ορίστηκε ως το υλικό, το οποίο ανταποκρίνεται έγκαιρα σε αλλαγές του περιβάλλον του. Ωστόσο, ο ορισμός των έξυπνων υλικών επεκτείνεται στα υλικά που λαμβάνουν, μεταδίδουν ή επεξεργάζονται ένα ερέθισμα και ανταποκρίνονται παράγοντας ένα χρήσιμο αποτέλεσμα που μπορεί να περιλαμβάνει ένα σήμα που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε.

Με την ανάπτυξη της επιστήμης των υλικών, έχουν εμφανιστεί πολλά νέα υλικά υψηλής ποιότητας και χαμηλού κόστους σε διάφορους τομείς της μηχανικής. Τα υλικά έγιναν πολυλειτουργικά και απαιτούσαν τη βελτιστοποίηση διαφορετικών χαρακτηρισμών και ιδιοτήτων. Με την τελευταία εξέλιξη, η έρευνα οδήγησε προς τα σύνθετα υλικά. Τα έξυπνα υλικά είναι νέα υλικά που ξεπερνούν τα συμβατικά δομικά και λειτουργικά υλικά. Αυτά τα υλικά διαθέτουν προσαρμοστικές ικανότητες σε εξωτερικά ερεθίσματα, όπως π.χ φορτία ή περιβάλλον, με εγγενή νοημοσύνη. Ο Rogers [1] όρισε τα έξυπνα υλικά ως υλικά, τα οποία διαθέτουν την ικανότητα να αλλάζουν τις φυσικές τους ιδιότητες με συγκεκριμένο τρόπο και την απόκριση τους σε συγκεκριμένο ερέθισμα. Τα ερεθίσματα θα μπορούσαν να είναι πίεση, θερμοκρασία, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, χημικές ουσίες, υδροστατική πίεση ή πυρηνική ακτινοβολία. Οι σχετικές μεταβλητές φυσικές ιδιότητες θα μπορούσαν να είναι το σχήμα, η ακαμψία, το ιξώδες ή η απόσβεση. Τα έξυπνα υλικά ανταποκρίνονται στο περιβάλλον και αλλάζουν στις πιο βέλτιστες συνθήκες. Η 'έξυπνάδα' περιγράφει την αυτοπροσαρμογή, την αυτογνωσία, τη μνήμη και πολλαπλές λειτουργίες των υλικών. Αυτά τα χαρακτηριστικά προσφέρουν πολλές πιθανές εφαρμογές κατασκευές σε συστήματα αεροδιαστημικής, μεταποίησης, μηχανικής κ.α.. Η αυτοπροσαρμογή είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των συστημάτων στα έξυπνα υλικά. Αλλάζοντας τις ιδιότητες τους τα έξυπνα υλικά μπορούν να ανιχνεύσουν σφάλματα και ρωγμές και επομένως είναι χρήσιμα ως διαγνωστικό εργαλείο.[2]

Αυτή η μελέτη εστιάζει στην εισαγωγή των έξυπνων υλικών και τις ταξινομήσεις τους. Αναφέρονται διαφορετικές εφαρμογές έξυπνων υλικών σε διάφορους τομείς. Η εργασία εστίασε σε ένα νέο είδος έξυπνου υλικού το IPMC (Ionic polymer–metal composite) το οποίο ανήκει στην κατηγορία των ιοντικών πολυμερών και ερευνήθηκε η σχεδίαση και η κατασκευή του σε ένα ειδικό πρόγραμμα για προσομοίωση. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η Matlab για να ερευνηθεί το μοντέλο και τα χαρακτηριστικά του IPMC εξάγοντας αντίστοιχες κυματομορφές.

1.2 Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή της εργασίας, οι στόχοι και η δομή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή στα έξυπνα υλικά με ιδιαίτερη έμφαση στα υλικά IPMC.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα μοντέλα έξυπνων υλικών και του IPMC.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η σχεδίαση του φυσικού μοντέλου του IPMC μέσω του COMSOL.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται με τη Matlab τα χαρακτηριστικά του IPMC χρησιμοποιώντας το μοντέλο και τη συνάρτηση μεταφοράς του.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και θέματα για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2ο: Εισαγωγή στα έξυπνα υλικά

2.1 Συστήματα Έξυπνων Υλικών

Ο τομέας των συστημάτων έξυπνων υλικών έχει εξελιχθεί με το πέρασμα του χρόνου με σκοπό να μιμηθεί μηχανικά συστήματα φυσικής προέλευσης. Ο απαραίτητος κοινός στόχος σε όλες αυτές οι πρωτοβουλίες ήταν η ανάπτυξη τεχνολογιών για να παράγουν μη βιολογικά συστήματα που θα επιτύχουν τη βέλτιστη λειτουργικότητα που παρατηρείται ευρέως στα βιολογικά συστήματα μέσω της προσομοίωσης των προσαρμοστικών τους ικανοτήτων και την ολοκληρωμένη σχεδίαση. Τα έξυπνα υλικά συνήθως συνδέονται ή ενσωματώνονται μέσα σε δομικά συστήματα που επιτρέπουν αυτές τις δομές να αισθάνονται διαταραχές, να επεξεργάζονται τις πληροφορίες και προκαλούν αντίδραση στους ενεργοποιητές. Έτσι, τα έξυπνα υλικά ανταποκρίνονται στα περιβαλλοντικά ερεθίσματα και για το λόγο αυτό ονομάζονται και ανταποκρινόμενα υλικά. Δεδομένου ότι αυτά τα έξυπνα συστήματα υλικών θα πρέπει να μιμούνται φυσικά συστήματα, οι απαιτήσεις που αναμένονται σε αυτά τα συστήματα που ενσωματώνουν τις διαδικασίες όπως ανίχνευση, ενεργοποίηση, λογική και ο έλεγχος περιλαμβάνουν:

- Υψηλός βαθμός αξιοπιστίας, αποτελεσματικότητας και βιωσιμότητας ολόκληρων συστημάτων
- Υψηλή ασφάλεια υποδομών, ακόμη και σε ακραίες περιπτώσεις
- Πλήρης ενοποίηση όλων των λειτουργιών του συστήματος
- Συνεχής παρακολούθηση της υγείας και της ακεραιότητας
- Ανίχνευση ζημιών και αυτο-ανάκτηση
- Έξυπνο λειτουργικό σύστημα διαχείρισης.

Τα υλικά που εμπλέκονται στην εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας δεν είναι νέα, αλλά η τεχνολογία των έξυπνων συστημάτων έχει επιταχυνθεί με τρομερό ρυθμό τα τελευταία χρόνια. Αυτό όντως επιτεύχθηκε από διάφορες καινοτόμες ιδέες που αναπτύχθηκαν από την επιστημονική κοινότητα. Οι πρωτοπόροι για αυτήν την τεχνολογία ήταν η στρατιωτική και η αεροδιαστημική βιομηχανία. Κάποια από τα προγράμματα τους έχουν ασχοληθεί με παρακολούθηση της υγείας, καταστολή κραδασμών, έλεγχος σχήματος και πολυλειτουργικές δομικές πτυχές για διαστημόπλοια, οχήματα εκτόξευσης και αεροσκάφη.

Αυτές οι εφαρμογές επικεντρώθηκαν στην βελτίωση του συστήματος απόδοσης με χρήση έξυπνων τεχνολογιών σε ρεαλιστικά αεροδιαστημικά συστήματα. κατασκευές μηχανικών, συμπεριλαμβανομένων γεφυρών, διαδρόμων προσγείωσης και κτιρίων, που ενσωματώνουν αυτή την τεχνολογία με έξυπνα υλικά. Ο σχεδιασμός του συστήματος με έξυπνα υλικά προβλέπει την ενοποίηση των συμβατικών πεδίων της μηχανολογίας, της ηλεκτρολογικής μηχανικής και της επιστήμης των υπολογιστών/τεχνολογίας της πληροφορίας στο στάδιο σχεδιασμού ενός προϊόντος ή ενός συστήματος.

Η έννοια των υλικών με τα υλικά που μπορούν να ‘αυτοδιορθώνονται’ έχει λάβει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Για παράδειγμα, τα αυτοθεραπευόμενα πλαστικά μπορεί να χρησιμοποιούν υλικά που έχουν την ικανότητα θεραπεύουν τις ρωγμές. Στα υλικά shape-memory alloy (SMAs) μπορούν να σταματήσουν να διαδίδονται ρωγμές με την επιβολή συμπιεστικών δυνάμεων, με αποτέλεσμα την αλλοίωση που προκαλείται από το στρες. Οι SMAs έχουν χρησιμοποιήθηκε επίσης σε σκελετούς γυαλιών για την επισκευή κάμψεων. Η τρέχουσα έρευνα στοχεύει στην ανάπτυξη προσαρμοστικών, ‘αυτοεπισκευαζόμενων’ υλικών και δομών που μπορούν να σταματήσουν δυναμική διάδοση ρωγμών, επούλωση ρωγμών, αποκατάσταση της δομικής ακεραιότητας και ακαμψίας και επαναδιαμόρφωση για να εξυπηρετήσει ακόμα περισσότερες λειτουργίες.

Για να οριστεί ένα έξυπνο σύστημα μπορούμε να παραθέσουμε ορισμένους όρους όπως αναφέρεται στην [3]:

Ενεργός: παράγει ή περιλαμβάνει δράση ή κίνηση.

Προσαρμοστικό: δείχνει ή έχει ικανότητα ή τάση για προσαρμογή.

Ευφυής: έχει ή υποδεικνύει υψηλό ή ικανοποιητικό βαθμός νοημοσύνης και νοητικής ικανότητας.

Υλικό: τα στοιχεία, τα συστατικά ή οι ουσίες από τα οποία κάτι συντίθεται

Δομή: το άθροισμα των στοιχείων μιας οντότητας σε τις σχέσεις τους μεταξύ τους.

Σύστημα: μια ομάδα συσκευών ή τεχνητών αντικειμένων ή ένας οργανισμός που σχηματίζει ένα δίκτυο ειδικά για τη διανομή κάτι ή την εξυπηρέτηση ενός κοινού σκοπού.

Το έξυπνο υλικό είναι εκείνο του οποίου ηλεκτρικές, μηχανικές ή ακουστικές ιδιότητες ή σύνθεση ή λειτουργίες αλλάζουν σε ένα καθορισμένο τρόπο ως απάντηση σε κάποιο ερέθισμα

από το περιβάλλον. Αυτή η απάντηση πρέπει να είναι επαναλαμβανόμενη. Ωστόσο, τα μέσα με τα οποία επιτυγχάνονται οι στόχοι θα μπορούσαν να είναι πολλά.

Ως εκ τούτου, ο κύριος στόχος στον τομέα του smart υλικών είναι να εντοπιστούν τα υλικά που θα ανταποκρινόταν σε εξωτερικά ερεθίσματα που τα περισσότερα υλικά δεν ανταποκρίνονται σε αυτά. Επιπλέον θα μπορούσε κάποιος να μεγιστοποιήσει την απόκριση, τουλάχιστον μία ή δύο τάξεις μεγέθους καλύτερη από τα υπόλοιπα υλικά. Το να ανταποκρίνεται σε εξωτερικά ερεθίσματα ένα υλικό δεν είναι αρκεί για να ονομαστεί υλικό έξυπνο.

Μια δομή ή ένα σύστημα υλικού μπορεί να θεωρηθεί έξυπνο εάν με κάποιο τρόπο αξιολογεί τα εξωτερικά ερεθίσματα και να προβεί σε κάποια ενέργεια βάσει αυτών. Αυτή η ενέργεια μπορεί να είναι να εξουδετερώσει τις επιδράσεις των εξωτερικών ερεθισμάτων ή να εκτελεί μια λειτουργία. Αυτός ο ορισμός απαιτεί το σύστημα να διαθέτει αισθητήρα, ελεγκτή ανάδρασης και ενεργοποιητή. Η επιλογή των αισθητήρων μπορεί να είναι με βάση τον τύπο των αναμενόμενων ερεθισμάτων, ο ελεγκτής μπορεί αποτελείται από μονάδες επεξεργασίας και αποθήκευσης πληροφοριών, ενώ ο ενεργοποιητής μπορεί να εξαρτάται από τον τύπο της λειτουργίας που αναμένεται από το σύστημα.

Υπάρχουν υλικά ή συστήματα υλικών που μπορούν να προγραμματιστούν να συμπεριφέρονται με ορισμένο τρόπο ως ένα. Το εξωτερικό ερέθισμα μπορεί να ονομαστεί έξυπνο. Αυτά τα συστήματα πρέπει: να παρακολουθούν τις περιβαλλοντικές και εσωτερικές συνθήκες, να επεξεργάζονται τα δεδομένα ανίχνευσης σύμφωνα με ένα εσωτερικό αλγόριθμο που θα αποφασίζει εάν θα ενεργήσει με βάση τις προϋποθέσεις. Όπως και με κάθε άλλο μηχανολογικό πρόβλημα αυτά τα συστήματα πρέπει να είναι σχεδιασμένα με τους παραπάνω στόχους θα πρέπει επίσης να έχουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, αποτελεσματικότητας και βιωσιμότητας. Θα πρέπει να είναι δυνατή η ενσωμάτωση ενός τέτοιου συστήματος σε υπάρχουσες πλατφόρμες.

Επιπλέον, μια άλλη περιοχή που έχει τεράστιο ενδιαφέρον και δυνατότητες είναι η αυτοανίχνευση, αυτοδιαγνωστικές, αυτοδιορθωτικές και αυτοελεγχόμενες λειτουργίες συστημάτων έξυπνων υλικών [5-6]. Αυτά τα υλικά είναι συνήθως ενσωματωμένα συστήματα για να προσδώσουν ευφυΐα. Τα περισσότερα υλικά που εμπλέκονται σε έξυπνα συστήματα δεν είναι νέα, ενώ η τεχνολογία του έξυπνου συστήματος από μόνη της είναι νέα. Τα έξυπνα συστήματα είναι αποτέλεσμα μιας σχεδιαστικής φιλοσοφίας που δίνουν έμφαση στο προγνωστικό, προσαρμοστικό και επαναλαμβανόμενο σύστημα. Οι βελτιώσεις στην

τεχνολογία και ευρεία διαθεσιμότητα με ενός οικονομικά αποδοτικού ψηφιακού σήματος όπως οι επεξεργαστές (DSP) και τα τσιπ μικροελεγκτών έχουν σημαντική επιρροή στην επιταχυνόμενη ανάπτυξη των συστημάτων με έξυπνα υλικά.

Μια σύντομη περιγραφή των υλικών δίνονται στη συνέχεια.

Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Πρόκειται για κεραμικά ή πολυμερή που μπορούν να προκαλέσουν γραμμική αλλαγή σχήματος από εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί διαστολή ή συστολή του υλικού σχεδόν αμέσως. Αυτά τα υλικά έχουν διάφορες χρήσεις σε ενεργοποιητές σε διάφορους διαφορετικούς τομείς της επιστήμης και τεχνολογίας. Επίσης παρατηρήθηκε και το αντίστροφο αποτέλεσμα, γεγονός που οδήγησε στη χρήση τους ως αισθητήρες.

Ηλεκτροσυσταλτικά υλικά

Αυτά τα υλικά μπορούν επίσης αλλάζουν σημαντικά τις διαστάσεις τους στην εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου και το αποτέλεσμα είναι επίσης αμφίδρομο. Αν και οι αλλαγές που λαμβάνονται με αυτόν τον τρόπο δεν είναι γραμμικές. Σε κάθε κατεύθυνση, αυτά τα υλικά έχουν επίσης βρει ευρεία εφαρμογή στους τομείς της ιατρικής και της μηχανικής.

Μαγνητοσυσταλτικά υλικά

Αυτά είναι αρκετά παρόμοια με ηλεκτροσυστολικά υλικά, εκτός από το γεγονός ότι ανταποκρίνεται στα μαγνητικά πεδία. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μαγνητοσυσταλτικό υλικό είναι το TERFENOL-D, το οποίο είναι φτιαγμένο από σπάνιες γαίες κάτι που το κάνει την χρήση του σπάνια.

Ρεολογικά υλικά

Ενώ τα υλικά που περιγράφονται παραπάνω είναι όλα τα στερεά, τα ρεολογικά υλικά βρίσκονται σε υγρή φάση. Αυτά μπορούν να αλλάξουν κατάσταση με την εφαρμογή ηλεκτρικού ή μαγνητικού φορτίου. Αυτά τα υγρά μπορεί να βρουν εφαρμογές σε φρένα, αμορτισέρ και αποσβεστήρες για καθίσματα οχημάτων.

Υλικά που ανταποκρίνονται στη θερμότητα

Τα SMA είναι ένας άλλος ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος έξυπνων υλικών, που αλλάζουν σχήμα ως απόκριση στις αλλαγές της θερμοκρασίας. Μόλις κατασκευαστούν σε ένα συγκεκριμένο σχήμα, αυτά τα υλικά μπορούν να διατηρήσουν/ανακτήσουν το σχήμα τους σε

συγκεκριμένη θερμοκρασία. Είναι επομένως χρήσιμα σε θερμοστάτες και σε μέρη αυτοκινήτων.

Ηλεκτροχρωμικά υλικά

Ο ηλεκτροχρωμισμός είναι η ικανότητα ενός υλικού να αλλάζει τις οπτικές του ιδιότητες (χρώμα) όταν εφαρμόζεται τάση σε αυτό. Αυτά χρησιμοποιούνται ως αντιστατικά στρώματα, ηλεκτροχρωμικά στρώματα σε υγρό κρύσταλλο οθόνες (LCD) και κάθοδοι σε μπαταρίες λιθίου.

Βιομιμητικά υλικά

Τα περισσότερα φυσικά υλικά που διατίθενται έρχονται σε έντονη αντίθεση με εκείνα του φυσικού κόσμου όπου τα ζώα και τα φυτά έχουν τη σαφή ικανότητα προσαρμογής στο περιβάλλον τους σε πραγματικό χρόνο. Μερικά από τα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του φυσικού κόσμου περιλαμβάνουν την ικανότητα των φυτών να προσαρμόσουν το σχήμα τους σε πραγματικό χρόνο. Είναι ευρέως γνωστό ότι τα ζωντανά συστήματα έχουν πολλά να μας διδάξουν για τον σχεδιασμό μελλοντικών τεχνητών υλικών. Το πεδίο των βιομιμητικών υλικών διερευνούν τη δυνατότητα τεχνικών ιδιοτήτων υλικών με βάση βιολογικά υλικά και δομές.

Έξυπνα Gel

Αυτά είναι τζελ που μπορεί να συρρικνωθούν ή να διογκωθούν αρκετές τάξεις μεγέθους (με συντελεστή 100). Μερικά από αυτά μπορούν επίσης να προγραμματιστούν ώστε να απορροφούν ή να απελευθερώνουν υγρά ως απόκριση σε ένα χημικό ή φυσικό ερέθισμα. Αυτά τα τζελ χρησιμοποιούνται σε τομείς όπως το φαγητό, η χορήγηση φαρμάκων και κάποιες χημικές επεξεργασίες.

Εκτός από τις ιδιότητες ανίχνευσης-αίσθησης και ενεργοποίησης, τα έξυπνα υλικά θα πρέπει επίσης να έχουν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά:

- Τεχνικές ιδιότητες όπως μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές.
- Τεχνολογικές ιδιότητες όπως κατασκευή, μορφοποίηση, θερμική επεξεργασία.
- Οικονομικές πτυχές όπως πρώτες ύλες και παραγωγή, κόστος και διαθεσιμότητα.
- Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά όπως τοξικότητα, ρύπανση, δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης.

Παρόμοια με ένα έξυπνο υλικό, μια έξυπνη δομή απαιτεί επίσης αισθητήρες, ενεργοποιητές και ελεγκτή. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα έξυπνα συστήματα υλικών, ο αριθμός των δυνατών περιβαλλοντικών ερεθισμάτων που παρακολουθούνται σε αυτό το πλαίσιο είναι πολύ περιορισμένη και μπορεί να περιλαμβάνει κραδασμούς και παρεκκλίσεις. Ένα διακριτικό χαρακτηριστικό των έξυπνων κατασκευών είναι ότι οι ενεργοποιητές και οι αισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν σε διακριτές θέσεις μέσα στη δομή. Επιπλέον, σε πολλές εφαρμογές η συμπεριφορά του συνόλου συνδέεται με το περιβάλλον. Αυτοί οι παράγοντες απαιτούν μια συνδυασμένη μοντελοποίηση και καλύτερη προσέγγιση για την ανάλυση των έξυπνων δομών.

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, ένα έξυπνο σύστημα είναι αυτό που μπορεί να αξιολογήσει μια κατάσταση, να καθορίσει εάν απαιτούνται οποιεσδήποτε ενέργειες-απαντήσεις και στη συνέχεια εκτελέσει τις κατάλληλες ενέργειες. Σε αυτό το πλαίσιο το smart μπορεί να χαρακτηρίζεται από αυτοπροσαρμογή, αυτογνωσία, μνήμη και λήψη αποφάσεων. Συνήθως, οι ενεργοί αισθητήρες και ενεργοποιητές έχουν χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό των έξυπνων δομών. Αυτό βασίζεται στην απαίτηση να παράγουν την απαιτούμενη ισχύ για την εκτέλεση αποκρίσεων.

Τα τελευταία χρόνια εξετάζεται η έννοια της παθητικής εξυπνάδας. Μερικά χαρακτηριστικά παθητικής εξυπνάδας είναι η συνέχεια στη δομή και ότι δεν χρειάζεται εξωτερική παρέμβαση. Επιπλέον, δεν υπάρχει απαίτηση για πηγή ενέργειας. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τα έργα πολιτικού μηχανικού μεγάλης κλίμακας. Η παθητική εξυπνάδα μπορεί να προέλθει από τις μοναδικές εγγενείς ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται στη δομή του. Ένα συνηθισμένο παράδειγμα είναι ένα SMA ενσωματωμένα σε σύνθετα υλικά αεροδιαστημικής. Τέτοιες δομές είναι σχεδιασμένα να αποτρέπουν τη διάδοση ρωγμών. Το έξυπνο σημαίνει ότι πρέπει να εμπλέκονται έξυπνες τεχνικές στην προσαρμογή ενός συστήματος ώστε αυτό να θεωρηθεί ένα έξυπνο προσαρμοστικό σύστημα. Σύμφωνα με αυτό ο αποδεκτός επίσημος ορισμός του προσαρμοστικού έχει τρία επίπεδα ως εξής: [6]

- Προσαρμογή σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον
- Προσαρμογή σε γνωστή ρύθμιση
- Προσαρμογή σε νέα-άγνωστη εφαρμογή

Στην πρώτη περίπτωση, το σύστημα πρέπει να προσαρμοστεί σε μια μεταβαλλόμενη κατάσταση (με το χρόνο κ.α), εφαρμόζοντας τη νοημοσύνη του για να αναγνωρίσει τις αλλαγές και να αντιδράσει ανάλογα. Αυτή είναι ίσως η πιο εύκολη ιδέα προσαρμογής για τα οποία υπάρχουν πολλές εφαρμογές.

Στη δεύτερη περίπτωση, η έμφαση δίνεται περισσότερο στην αλλαγή του ίδιου του περιβάλλοντος παρά σε μια μετατόπιση ορισμένων χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν συστήματα που πρέπει να μεταφερθεί από τη μια κατάσταση στην άλλη χωρίς να αλλάζει οποιαδήποτε από τις κύριες παραμέτρους τους.

Το τρίτο επίπεδο είναι το πιο ακραίο αλλά έχουν γίνει αρκετά σημαντικά βήματα. Για παράδειγμα, στον τομέα της μηχανικής μάθησης, ξεκινώντας από λίγες πληροφορίες για το πρόβλημα, είναι πλέον δυνατή η κατασκευή ενός συστήματος μέσω της σταδιακής μάθησης. Αν και αυτό μπορεί είναι ο απώτερος στόχος των περισσότερων έξυπνων συστημάτων, τέτοιου επιπέδου έξυπνάδα δεν έχει παρατηρηθεί σε κανένα ανθρωπογενές σύστημα.

Αισθητήρες, ενεργοποιητές, μετατροπείς

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα έξυπνα συστήματα θα πρέπει να ανταποκρίνονται εσωτερικά και περιβαλλοντικά-εξωτερικά ερεθίσματα. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να διαθέτουν αισθητήρες και ενεργοποιητές ενσωματωμένα σε αυτά. [7-8]

Μετατροπέας:

Μια συσκευή που ενεργοποιείται με ρεύμα από ένα σύστημα και παρέχει ρεύμα, συνήθως σε άλλο μορφή, σε ένα δεύτερο σύστημα.

Αισθητήρας:

Μια συσκευή που ανταποκρίνεται σε ένα φυσικό ερέθισμα, όπως θερμότητα, φως, ήχος, πίεση κ.α. και μεταδίδει μια προκύπτουσα ώθηση.

Ενεργοποιητής:

Αυτός που ενεργοποιεί για παράδειγμα μια μηχανική συσκευή για μετακίνηση ή έλεγχο κάτι. Μερικές από αυτές τις συσκευές που συναντώνται συνήθως στο πλαίσιο των έξυπνων συστημάτων.

Μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS):

Ο στόχος εδώ είναι να μειωθεί το συνολικό μέγεθος του συστήματος. Η μικρογραφία μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερες συσκευές με βελτιωμένη διαχείριση της θερμότητας. Οι απαιτήσεις κατά την κατασκευή μπορούν να μειωθούν σημαντικά, με αποτέλεσμα να αυξηθούν τα πλεονεκτήματα κόστους/απόδοσης. Σε ένα μικρό χώρο είναι δυνατές συστοιχίες συσκευών. Αυτό έχει τη δυνατότητα για βελτιωμένη λειτουργία. Άλλο ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μικρογραφίας είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης με ηλεκτρονικά, απλοποιώντας έτσι τα συστήματα και μειώνοντας τις απαιτήσεις ισχύος. Η μικροκατασκευή που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση τέτοιων συσκευών έχει βελτιωθεί αρκετά. Οι συσκευές που παράγονται με αυτόν τον τρόπο έχουν αυξημένη επιλεκτικότητα και ευαισθησία, μια ευρύτερη δυναμική εμβέλεια και βελτιωμένη ακρίβεια και αξιοπιστία. Τα Έξυπνα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) αναφέρονται σε συλλογές μικροαισθητήρων και ενεργοποιητών που μπορούν αισθάνονται το περιβάλλον τους και έχουν την ικανότητα να αντιδρούν αλλαγές σε τέτοια περιβάλλοντα με τη χρήση ενός ελέγχου μικροκυκλώματος. [9] Περιλαμβάνουν, εκτός από συμβατικές συσκευασίες μικροηλεκτρονικών, ενσωμάτωση δομών κεραίας για σήματα εντολών σε μικροηλεκτρομηχανικά δομές για τις επιθυμητές λειτουργίες ανίχνευσης και ενεργοποίησης. Αυτά τα συστήματα μπορεί επίσης να χρειάζονται μικροτροφοδοσία, μονάδες επεξεργασίας και μικρορελέ. Τα μικροεξαρτήματα καθιστούν τα συστήματα ταχύτερα, πιο αξιόπιστα, φθηνότερα και ικανά να ενσωματώσουν πιο σύνθετες λειτουργίες. Τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) εμφανίστηκαν με τις προόδους που έγιναν στην ανάπτυξη κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC) και με τις διεργασίες, με τις οποίες αισθητήρες, ενεργοποιητές και λειτουργίες ελέγχου συν-κατασκευάζονται σε πυρίτιο. Από τότε έχει επιτευχθεί πρόοδος στα MEMS με προωθήσεις κεφαλαίων τόσο από την κυβέρνηση όσο και από τις βιομηχανίες. Εκτός από την εμπορευματοποίηση ορισμένων ενσωματωμένων συσκευών MEMS, όπως τα μικροεπιταχυνσιόμετρα, κεφαλές εκτυπωτών inkjet, μικροκάτοπτρα για προβολή κ.λπ., τις έννοιες και τη σκοπιμότητα ενός πιο σύνθετου MEMS συσκευές έχουν προταθεί και επιδειχθεί για εφαρμογές σε ποικίλους τομείς όπως η μικρορευστοποίηση, η αεροδιαστημική, βιοϊατρική, χημική ανάλυση, ασύρματες επικοινωνίες, αποθήκευση δεδομένων, οθόνη, οπτικά κ.λπ. . Μερικοί κλάδοι του MEMS, που εμφανίζονται ως μικρο-οπτοηλεκτρομηχανικά συστήματα (MOEMS), συστήματα έχουν προσελκύσει πολλά ερευνητικά ενδιαφέροντα. Πολλές συσκευές MEMS με διάφορους μηχανισμούς αισθητήρων/ενεργοποίησης κατασκευάστηκαν με χρήση πυριτίου. Έχουν γίνει τρισδιάστατες διαδικασίες μικροκατασκευής που ενσωματώνουν περισσότερα υλικά. Η

μικρομηχανική έχει γίνει η θεμελιώδης τεχνολογία για την κατασκευή συσκευών MEMS και ειδικότερα οι μικροσκοπικοί αισθητήρες και ενεργοποιητές. Η μικροκατεργασία πυριτίου είναι η πιο ώριμη από τη μικροκατεργασία και επιτρέπει την κατασκευή MEMS που έχουν διαστάσεις στην περιοχή υποχιλιοστών. Αναφέρεται σε κατασκευή μικροσκοπικών μηχανικών μερών από υπόστρωμα πυριτίου ή σε υπόστρωμα πυριτίου. Χρησιμοποιώντας υλικά όπως το κρυσταλλικό πυρίτιο, πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και νιτρίδιο του πυριτίου δημιουργείται ποικιλία μηχανικών μικροδομών, συμπεριλαμβανομένων των δοκών, διαφράγματα, αυλακώσεις, στόμια, ελατήρια, γρανάζια, αναρτήσεις και μια μεγάλη ποικιλία από άλλα πολύπλοκα μηχανικά δομές. Η μικρομηχανική με πυρίτιο ήταν ο βασικός παράγοντας για την γρήγορη πρόοδος του MEMS την τελευταία δεκαετία του 20ού αιώνα.

Η μικρομηχανική είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος αλλά αντικαθίσταται από την επιφανειακή μικρομηχανική η οποία προσφέρει την ελκυστική δυνατότητα ενσωμάτωσης της μηχανικής συσκευής με την μικροηλεκτρονική που μπορεί να είναι συναρμολογημένα στην ίδια πλακέτα. Έτσι κυκλώματα τροφοδοσίας και επεξεργασίας σήματος χρησιμοποιώντας τα ASIC (Application Specific Integrated Circuits) μπορούν να είναι συσσωματωμένα. Η αποτελεσματικότητα της δημιουργίας πολλών τέτοιων ολοκληρωμένων πακέτων χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία είναι από μόνο του μια ελκυστική προσέγγιση. Οι μικροσυσκευές μπορούν επίσης να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας μεθόδους λιθογραφίας πολυμερών κατασκευών. Σε περίπτωση δυσκολίας με τα πολυμερή υλικά, μερικές από αυτές τις συσκευές μπορούν να είναι σε πυρίτιο και η αρχιτεκτονική του συστήματος μπορεί να ληφθεί με φωτοσχηματισμό ή υβριδική επεξεργασία. Η φωτομορφοποίηση ή η φωτοκατασκευή χρησιμοποιεί ένα οπτική μέθοδος, όπως stereo λιθογραφία και φωτογραφική μάσκα. Η συνδυασμένη αρχιτεκτονική μπορεί επίσης να οδηγήσει σε έξυπνες κατασκευές με ενσωματωμένους αισθητήρες και ενεργοποιητές σε κλίμακα mm. Για ορισμένες εφαρμογές, το έξυπνο υπόστρωμα πρέπει να είναι εύκαμπτο και να συμμορφώνεται με το σχήμα της αεροτομής και ταυτόχρονα πρέπει να είναι συμβατή με την επεξεργασία IC για αισθητήρα και έξυπνη ενσωμάτωση ηλεκτρονικών. Ο βρόχος ελέγχου μεταξύ των αισθητήρων και ενεργοποιητών χρησιμοποιούν πολυλειτουργικά υλικά που παρέχουν ηλεκτρική λειτουργικότητα σε επιλεγμένες τοποθεσίες χρησιμοποιώντας αγωγίμα πολυμερή και ηλεκτρόδια που συνδέονται με επί τόπου κεραίες που επικοινωνούν με μια κεντρική κεραία. Σε ορισμένες εφαρμογές οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στις οποίες υπόκειται η δομή μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα για συμβατική καλωδίωση. Επίσης περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος.

Η ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων μικρομηχανικής και μικροηλεκτρονικής σε ένα τσιπ δημιούργησαν τους έξυπνους αισθητήρες. Στο τελευταίο ένας μικρός αισθητήρας του οποίου τα σήματα ενισχύονται, ρυθμίζονται και μετατρέπονται σε μια τυπική μορφή εξόδου. Μπορεί να περιλαμβάνουν μικροελεγκτή, επεξεργαστή ψηφιακού σήματος, ολοκληρωμένο κύκλωμα, αυτοέλεγχο, αυτοβαθμονόμηση και κυκλώματα διεπαφής διαύλου.

Πολλές βασικές συσκευές MEMS έχουν δομή διαφράγματος, μικρογέφυρας ή προβόλου-δοκού. Για μια δεδομένη εφαρμογή, μπορεί να είναι απαραίτητο να υπάρχει ενσωματωμένο MEMS που χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερες από τις βασικές δομές. Αυτές οι τρεις δομές παρέχουν ορισμένα εφικτά σχέδια για μικροαισθητήρες και ενεργοποιητές που τελικά εκτελούν την επιθυμητή εργασία σε τις περισσότερες έξυπνες δομές. Ωστόσο, τα κύρια ζητήματα στην εφαρμογή αυτών των δομών είναι η επιλογή υλικών και στις τεχνολογίες μικροκατεργασίας για την κατασκευή τέτοιων συσκευών. Για την αντιμετώπιση του πρώτου ζητήματος και στις τρεις δομές πρότειναν ότι η αίσθηση και η ενεργοποίηση συμβαίνουν ως αποτέλεσμα της διέγερσης ενός πιεζοηλεκτρικού στρώματος από την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Αυτή η διέγερση σχετίζεται με την αίσθηση ή/και με την ενεργοποίηση στο διάφραγμα, ή στην ελεύθερη δοκό ή στη δοκό προβόλου. Στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις παρουσιάζεται ανοδική καμπυλότητα στο διάφραγμα ή στην ελεύθερη δοκό, ως εκ τούτου έχει ως αποτέλεσμα μια κατακόρυφη μετατόπιση από τη μη διεγερμένη πλευρά. Στον δοκό κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου η ενεργοποίηση γίνεται με μια κατακόρυφη ανοδική κίνηση της ελεύθερης άκρης. Προφανώς και στα τρία σχέδια στη δομή του συστήματος του ενεργού μέρους (διάφραγμα, ελεύθερη δοκός ή δοκός προβόλου) στον μικροενεργοποιητή πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα πιεζοηλεκτρικό στρώμα όπως και αγώγιμα ηλεκτρόδια για την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου σε αυτό το στρώμα.

2.2 Έξυπνα Υλικά

Ο τομέας των έξυπνων υλικών και δομών είναι μεταξύ επιστήμης και τεχνολογίας και συνδυασμών τις γνώσεις φυσικής, μαθηματικών, χημείας, επιστήμης υπολογιστών, με υλικά, ηλεκτρικά και μηχανικά. Εφαρμόζει την ανθρώπινη δημιουργικότητα και καινοτόμες ιδέες για να εξυπηρετήσει την ανθρώπινη κοινωνία όπως φτιάχνοντας ένα ασφαλέστερο αυτοκίνητο,

ένα πιο άνετο αεροπλάνο. Οι έξυπνες κατασκευές μπορούν να βοηθήσουν να ελέγχουμε καλύτερα το περιβάλλον και να αυξάνουν την αποτελεσματικότητα των συσκευών.

Οι έξυπνες δομές συνήθως περιέχουν συστήματα με πολυλειτουργικά εξαρτήματα που μπορούν να εκτελούν ανίχνευση(αισθητήρας), έλεγχος και ενεργοποίηση. Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών ονομάζονται έξυπνα υλικά. Η ‘έξυπνάδα’ αυτών μετράται από την ανταπόκρισή τους και ευκινησία ή ταχύτητα απόκρισης τους. Για παράδειγμα το μαγνητοσυσταλτικό υλικό θα εμφανίσει παραμόρφωση κάτω από ένα μαγνητικό πεδίο. Η παραμόρφωση προκαλεί τάση στο πιεζοηλεκτρικό υλικό που δημιουργεί ηλεκτρικό φορτίο.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι έξυπνες δομές περιλαμβάνουν αισθητήρες, ενεργοποιητές και ένα σύστημα ελέγχου. Εκτός από τη χρήση τους ως αισθητήρες και ενεργοποιητές, ένα σημαντικό μέρος μιας ‘έξυπνης’ δομής είναι να αναπτυχθεί ένας βελτιστοποιημένος αλγόριθμος ελέγχου που θα μπορούσε να καθοδηγήσει τους ενεργοποιητές για την εκτέλεση των απαιτούμενων λειτουργιών μετά την ανάγνωση του αισθητήρα. Η ενεργή απόσβεση είναι ένας από τους πιο μελετημένους τομείς χρησιμοποιώντας έξυπνες δομές. Για ένα πλήθος ενεργών αποσβέσεων έχουν αναπτυχθεί συστήματα με εγγυημένη σταθερότητα με τη χρήση ενεργοποιητών και αισθητήρων φυσικά τοποθετημένοι στο ίδιο σημείο και ενεργειακά συζευγμένοι. Αυτά τα σχήματα κατηγοριοποιούνται με βάση τον τύπο ανατροφοδότησης στη διαδικασία ελέγχου, δηλαδή ταχύτητα, μετατόπιση ή επιτάχυνση. Αν και αρκετά φυσικά υλικά όπως τα πιεζοηλεκτρικά, τα ηλεκτροσυστολικά και τα μαγνητοσυστολικά υλικά είναι ταξινομημένα ως έξυπνα υλικά, αυτά συνήθως έχουν περιορισμένα αποκρίσεις πλάτους και πρέπει να λειτουργούν σε περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας. Κάποιες χημικές και μηχανικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή των ιδιοτήτων τους για ένα συγκεκριμένο έξυπνο σχεδιασμό.

Στη δεκαετία του 1970 άρχισαν να εμφανίζονται εμπορικά προϊόντα βασισμένα σε SMA. Οι αρχικές εφαρμογές για αυτά τα υλικά ήταν σε στατικές συσκευές όπως εξαρτήματα σωληνώσεων. Αργότερα συσκευές SMA έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε αισθητήρες και ενεργοποιητές για να έχει καλύτερη απόδοση σε θέματα θέρμανσης, ψύξης και παραμόρφωσης.

2.3 Εφαρμογές

Οι εξελίξεις στους τομείς των έξυπνων υλικών και των δομικών συστημάτων έχουν επικεντρωθεί στο φυσικό ένστικτο του ανθρώπου για μίμηση της φύσης. Αν και η τεχνολογία απέχει ακόμα πολύ από αυτόν τον στόχο, τα τελευταία χρόνια πολλά συστήματα έχουν δημιουργηθεί για αεροδιαστημικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Πολλές από αυτές τις εφαρμογές αφορούν τη μείωση των κραδασμών σε αθλητικά είδη, σε πολλά νέα έξυπνα αθλητικά είδη όπως ρακέτες τένις, σκι κ.α. Επίσης για τον έλεγχο θορύβου στα οχήματα χρησιμοποιούνται σύνθετα πιεζοηλεκτρικών με κεραμικές ίνες που μειώνουν το θόρυβο στα οχήματα, όπως και το κούνημα σε πτερύγια ρότορα ελικοπτέρου ή κραδασμούς στο κλιματιστικό. Σε αεροδιαστημικές εφαρμογές των έξυπνων δομών περιλαμβάνουν το χωρικό υψηλό σύστημα κωδικοποίησης και ελέγχου θέσης ακρίβειας. Επιπλέον, έχουν γίνει αρκετές στρατιωτικές εφαρμογές με έξυπνα υλικά και κατασκευές. Στο πεδίο μάχης οι στρατιώτες μπορούν να φορούν ρούχα από ειδικά απτικό υλικό που μπορεί να ανιχνεύσει σήματα από τον άνθρωπο σώμα για τον προσδιορισμό των τραυμάτων από σφαίρες.

Υπάρχουν πολλές πιθανές τοποθεσίες για χρήση έξυπνα υλικά σε αεροσκάφη, επίγεια, θαλάσσια ή διαστημικά έξυπνα οχήματα, επανδρωμένα ή μη επανδρωμένα συστήματα μεταφοράς, εξοπλισμένα με αισθητήρες, ενεργοποιητές και εξελιγμένα χειριστήρια, τα οποία μπορούν να βελτιώσουν την επιτήρηση και την αναγνώριση στόχων και βελτίωση της ευαισθητοποίησης στο πεδίο της μάχης.

Παραδείγματα εφαρμογών σε πολλές διαφορετικές περιοχές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Στο μέλλον, μπορεί ακόμη και να αναπτυχθεί δομές που είναι αρκετά έξυπνες ώστε να επικοινωνούν άμεσα με τον ανθρώπινο εγκέφαλο χρησιμοποιώντας συσκευές που βασίζονται σε MEMS. Έξυπνες μύτες, γλώσσες κ.λ.π. έχουν ήδη αναπτυχθεί από διάφορες ομάδες. Οι νεότεροι αισθητήρες μπορεί να επεκτείνουν ακόμη και τον άνθρωπο ανιχνευτικές ικανότητες, όπως το να μας δίνει τη δυνατότητα να ανιχνεύσουμε περισσότερες μυρωδιές, ακούστε πέρα από το κανονικό μας εύρος συχνοτήτων, και δείτε τι δεν μπορούμε να δούμε κανονικά. Υπάρχουν επίσης σημαντικά περιθώρια για την ανάπτυξη νέων δυνατοτήτων στον τομέα των έξυπνων δομών.

Πίνακας 2.1 Εφαρμογές των έξυπνων υλικών ανα πεδίο [10]

Smart material type	Application
Piezoelectric ceramics	Actuators
	Flow meters
	Fluid level sensors
	Piezoelectric transducers
	Audible sound transducers
	Transmission of ultrasonic signals in air or water
Adaptive composite materials	Noise suppression
	Self-repair of smart materials
	Precise position control
	Structural health monitoring
Biomimics of smart structures	Drug delivery systems
	Superhydrophobic surfaces

	Aircraft design
Smart electrochemical cells	Batteries
	Electrochemical energy conversion and storage technologies
	Energy storage technologies
Shape-memory alloys	Biomedical applications
	Implants and stents
	Surgical and dental instruments
	Orthodontic fixtures
	Biopsy forceps
Electrode coated polymers	Biomedical sensing
Biomimetic electromagnetic sensors	Smart detectors
Nanoporous silicon	Photoluminescent transduction
	Thin-film photovoltaics
	Drug delivery
Piezoelectric ceramics	Gas igniters
	Acoustic pressure
	Vibration sensors
	Accelerometers
Piezoelectric materials (in general)	Ultrasonic transducers and actuators,
	Ultrasonic motors
	Electronic components such as resonators, wave filters, delay lines, and etc.
Chemical indicating devices	Ph indicators, temperature and time-temperature indicators
Cement-matrix composites	Construction industry
Polymer-matrix composites	Construction industry
Conductive polymer composites	Thermistors
	Circuit protection devices
	Self-regulating heaters
Conductive polymers	Energy conversion/storage
	Response to chemical and physical stimuli

2.4 EAP

Ένα ηλεκτροενεργό πολυμερές (EAP - electroactive polymer) είναι ένα πολυμερές που παρουσιάζει αλλαγή στο μέγεθος ή στο σχήμα όταν διεγείρεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο. Οι πιο κοινές εφαρμογές αυτού του τύπου υλικού είναι σε ενεργοποιητές και αισθητήρες.[8-12]

Μια τυπική χαρακτηριστική ιδιότητα ενός EAP είναι ότι θα υποστούν μεγάλη ποσότητα παραμόρφωσης ενώ διατηρούν μεγάλες δυνάμεις. Η πλειοψηφία των ιστορικών ενεργοποιητών είναι κατασκευασμένοι από κεραμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά. Ενώ αυτά τα υλικά είναι σε θέση να αντέχουν μεγάλες δυνάμεις, συνήθως παραμορφώνουν μόνο ένα κλάσμα του ποσοστού από τη μορφή τους. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, αποδείχθηκε ότι ορισμένα EAP μπορούν να παρουσιάσουν τάση πάνω 100%, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από οποιονδήποτε κεραμικό ενεργοποιητή. Μία από τις πιο κοινές εφαρμογές για τα EAPs είναι στον τομέα της ρομποτικής στην ανάπτυξη τεχνητών μυών.

Το πεδίο των EAP εμφανίστηκε το 1880 από τον Wilhelm Röntgen[12] Η λαστιχένια λωρίδα στερεώθηκε στο ένα άκρο και στερεώθηκε σε μια μάζα στο άλλο. Στη συνέχεια ψεκάστηκαν ηλεκτρικά φορτία πάνω στο λάστιχο και παρατηρήθηκε ότι το μήκος άλλαξε.

Η επόμενη σημαντική ανακάλυψη στα EAP έλαβε χώρα στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Το πολυβινυλιδενοφθορίδιο (PVDF) παρουσιάζει μεγάλο πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα. Αυτό πυροδότησε ερευνητικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη άλλων συστημάτων πολυμερών που θα έδειχναν παρόμοιο αποτέλεσμα.

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980, ένας αριθμός άλλων πολυμερών είχε αποδειχθεί ότι εμφανίζουν πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα ή αποδείχθηκε ότι είναι αγωγίμα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, αναπτύχθηκαν σύνθετα υλικά ιοντικού πολυμερούς-μετάλλου (IPMCs) και αποδείχθηκε ότι παρουσιάζουν ηλεκτρενεργές ιδιότητες πολύ ανώτερες από τα προηγούμενα EAP. Το κύριο πλεονέκτημα των IPMC ήταν ότι ήταν σε θέση να παρουσιάζουν ενεργοποίηση (παραμόρφωση) σε τάσεις τόσο χαμηλές όσο 1 ή 2 V.[13-16] Αυτό είναι τάξεις μεγέθους μικρότερο από οποιοδήποτε προηγούμενο EAP. Όχι μόνο η ενέργεια ενεργοποίησης για αυτά τα υλικά ήταν πολύ χαμηλότερη, αλλά μπορούσαν επίσης να υποστούν πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Τα IPMC αποδείχθηκε ότι παρουσιάζουν οπουδήποτε μεγάλη κάμψη, τάξεις μεγέθους πολύ μεγαλύτερες από τα προηγούμενα EAP που είχαν αναπτυχθεί.

Ένα άλλο σημαντικό ορόσημο του τομέα είναι ότι η πρώτη εμπορικά αναπτυγμένη συσκευή που περιλαμβάνει EAPs ως τεχνητό μυ κατασκευάστηκε το 2002 από την Eamex στην

Ιαπωνία. Αυτή η συσκευή ήταν ένα ψάρι που μπορούσε να κολυμπήσει μόνο του, κινώντας την ουρά του χρησιμοποιώντας έναν μν ΕΑΡ.

Το ΕΑΡ μπορεί να έχει πολλές διαμορφώσεις, αλλά γενικά χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες: Διηλεκτρικό και Ιονικό.

Διηλεκτρικό ΕΑΡ

Τα διηλεκτρικά ΕΑΡ είναι υλικά στα οποία η ενεργοποίηση προκαλείται από ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που συμπιέζουν το πολυμερές. Τα διηλεκτρικά ελαστομερή είναι ικανά για πολύ υψηλές καταπονήσεις και είναι ουσιαστικά ένας πυκνωτής που αλλάζει την χωρητικότητά του όταν εφαρμόζεται τάση επιτρέποντας στο πολυμερές να συμπιέζεται σε πάχος και να διαστέλλεται στην περιοχή λόγω του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτός ο τύπος ΕΑΡ τυπικά απαιτεί μεγάλη τάση ενεργοποίησης για την παραγωγή υψηλών ηλεκτρικών πεδίων αλλά πολύ χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα διηλεκτρικά ΕΑΡ δεν απαιτούν ρεύμα για να κρατήσουν τον ενεργοποιητή σε μια δεδομένη θέση.

Μερικά παραδείγματα είναι τα ηλεκτροσυστολικά πολυμερή και τα διηλεκτρικά ελαστομερή. Επίσης τα σιδηροηλεκτρικά πολυμερή είναι μια ομάδα κρυσταλλικών πολικών πολυμερών που σημαίνει ότι διατηρούν μια μόνιμη ηλεκτρική πόλωση που μπορεί να αντιστραφεί ή να αλλάξει σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Τα σιδηροηλεκτρικά πολυμερή, όπως το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF), χρησιμοποιούνται σε ακουστικούς μετατροπείς και ηλεκτρομηχανικούς ενεργοποιητές λόγω της εγγενούς πιεζοηλεκτρικής απόκρισής τους και ως αισθητήρας θερμότητας

Στα ηλεκτροσυστολικά πολυμερή όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο, ασκείται δύναμη σε κάθε μερικό φορτίο και προκαλεί περιστροφή ολόκληρης της μονάδας πολυμερούς. Αυτή η περιστροφή προκαλεί ηλεκτροσυστολή τάση και παραμόρφωση του πολυμερούς.

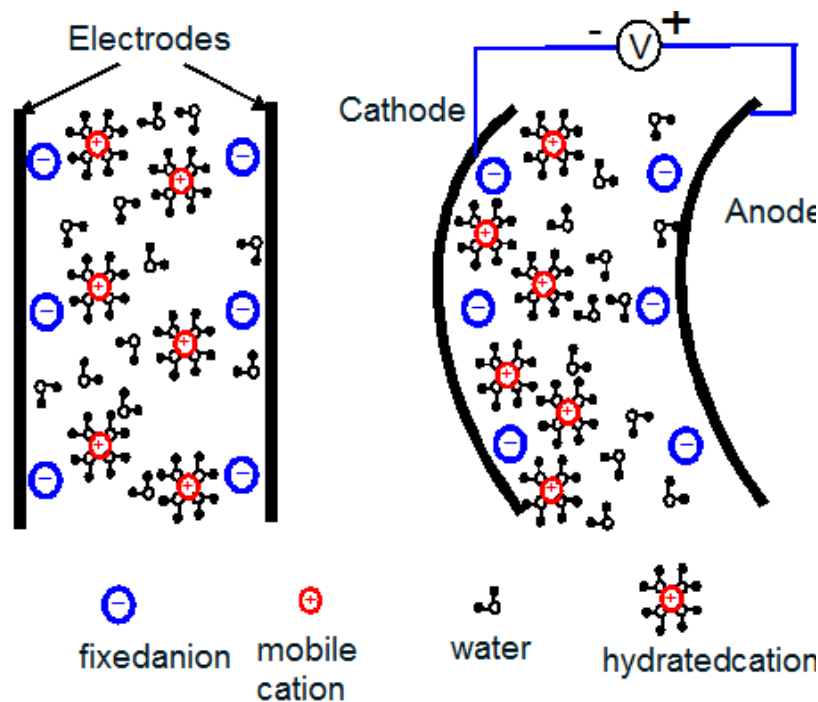
Σε μια άλλη κατηγορία, τα υγρά κρυσταλλικά πολυμερή κύριας αλυσίδας έχουν μεσογόνες ομάδες που συνδέονται μεταξύ τους με έναν εύκαμπτο διαχωριστή. Η σύνθεση ελαστομερών υψηλού προσανατολισμού οδηγεί σε μια μεγάλη θερμική ενεργοποίηση καταπόνησης κατά μήκος της κατεύθυνσης της αλυσίδας του πολυμερούς με διακύμανση θερμοκρασίας με αποτέλεσμα μοναδικές μηχανικές ιδιότητες και πιθανές εφαρμογές ως μηχανικοί ενεργοποιητές.

Ιονικό EAP

Τέλος οι Ionic EAPs, στα οποία η ενεργοποίηση προκαλείται από τη μετατόπιση ιόντων μέσα στο πολυμερές. Απαιτούνται μόνο λίγα V για την ενεργοποίηση, αλλά η ιοντική ροή συνεπάγεται μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ που απαιτείται για την ενεργοποίηση και απαιτείται ενέργεια για να διατηρείται ο ενεργοποιητής σε μια δεδομένη θέση. Παραδείγματα ιοντικών EAPS είναι αγώγιμα πολυμερή, ιοντικά σύνθετα υλικά πολυμερούς-μετάλλου (IPMC).

Σύνθετο ιοντικό πολυμερές-μέταλλο IPMC

Τα σύνθετα υλικά ιοντικού πολυμερούς-μετάλλου αποτελούνται από μια λεπτή ιοντομερή μεμβράνη με ηλεκτρόδια ευγενούς μετάλλου επιστρωμένα στην επιφάνειά της. Έχει επίσης κατιόντα για να εξισορροπεί το φορτίο των ανιόντων που είναι στερεωμένα στη ραχοκοκαλιά του πολυμερούς. Είναι πολύ ενεργοί ενεργοποιητές που παρουσιάζουν πολύ υψηλή παραμόρφωση σε χαμηλή εφαρμοζόμενη τάση και παρουσιάζουν χαμηλή σύνθετη αντίσταση. Τα σύνθετα υλικά ιοντικού πολυμερούς-μετάλλου λειτουργούν μέσω ηλεκτροστατικής έλξης μεταξύ των κατιονικών αντίθετων ιόντων και της καθόδου του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, μια σχηματική αναπαράσταση φαίνεται στην Εικόνα 2.1. Το Nafion και το Flemion είναι συνήθως χρησιμοποιούμενα σύνθετα ιοντικά πολυμερή μετάλλων.



Εικόνα 2.1: Μηχανισμός Ενεργοποίησης του IPMC

[<https://www.intechopen.com/chapters/39979>]

Υπάρχουν πολλά υλικά EAP και αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Τα ηλεκτρονικά πολυμερή (ηλεκτροσυστολικά, ηλεκτροστατικά, πιεζοηλεκτρικά και σιδηροηλεκτρικά) μπορούν να κατασκευαστούν για να συγκρατούν την επαγόμενη μετατόπιση υπό την ενεργοποίηση μιας τάσης συνεχούς ρεύματος, επιτρέποντάς τους να χρησιμοποιηθούν σε ρομποτικές εφαρμογές. Επίσης, αυτά τα υλικά έχουν μεγαλύτερη μηχανική ενεργειακή πυκνότητα και μπορούν να λειτουργήσουν στον αέρα χωρίς σημαντικούς περιορισμούς. Ωστόσο, απαιτούν υψηλό πεδίο ενεργοποίησης ($>100 \text{ V}/\mu\text{m}$) κοντά στο επίπεδο διάσπασης.

Αντίθετα, τα ιοντικά υλικά EAP (σύνθετα υλικά πολυμερών μετάλλων, αγώγιμα πολυμερή) οδηγούνται από τη διάχυση ιόντων και απαιτούν έναν ηλεκτρολύτη για τον μηχανισμό ενεργοποίησης. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι η απαίτηση για χαμηλές τάσεις περίπου 1-2 Volt. Ωστόσο, υπάρχει ανάγκη διατήρησης της υγρασία τους – να είναι ενυδατωμένα, και εκτός από τα αγώγιμα πολυμερή και τους νανοσωλήνες άνθρακα, είναι δύσκολο να διατηρηθούν οι μετατοπίσεις που προκαλούνται από DC.

Η παραγόμενη μετατόπιση τόσο του ηλεκτρονικού όσο και του ιοντικού EAP μπορεί να είναι γεωμετρικά σχεδιασμένο για να κάμπτεται, να τεντώνεται ή να συστέλλεται. Οποιοδήποτε από τα υπάρχοντα υλικά EAP μπορεί να είναι κατασκευασμένο για να κάμπτεται με σημαντική απόκριση καμπυλότητας. Ωστόσο, οι ενεργοποιητές κάμψης έχουν σχετικά περιορισμένες εφαρμογές λόγω χαμηλής δύναμης ή ροπής που μπορεί να προκληθεί.

Πίνακας 2.2 Λίστα με κατηγορίες EAP [17]

Electronic EAP	Ionic EAP
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dielectric elastomer EAP ▪ Electrostrictive Graft Elastomers ▪ Electrostrictive Paper ▪ Electro-Viscoelastic Elastomers ▪ Ferroelectric Polymers ▪ Liquid Crystal Elastomers (LCE) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carbon Nanotubes (CNT) ▪ Conductive Polymers (CP) ▪ ElectroRheological Fluids (ERF) ▪ Ionic Polymer Gels (IPG) ▪ Ionic Polymer Metallic Composite (IPMC)

Πίνακας 2.3 Σύνοψη πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων δυο κατηγοριών των EAP [17]

EAP type	Advantages	Disadvantages
Ionic EAP	<ul style="list-style-type: none"> • Natural bi-directional actuation that depends on the voltage polarity. • Some ionic EAP like conducting polymers have a unique capability of bi-stability • Requires low voltage 	<ul style="list-style-type: none"> • Requires using an electrolyte • Electrolysis occurs in aqueous systems at >1.23 V • Require encapsulation or protective layer in order to operate in open air conditions • Low electromechanical coupling efficiency. • Except for CPs and NTs, ionic EAPs do not hold strain under dc voltage • Slow response (fraction of a second) • Bending EAPs induce a relatively low actuation force • High currents require rare earth electrodes such as gold or platinum • Except for CPs, it is difficult to produce a consistent material (particularly IPMC)
Electronic EAP	<ul style="list-style-type: none"> • Exhibits high mechanical energy density. • Induces relatively large actuation forces • Can operate for a long time in room conditions • Exhibit rapid response (mSec) • Can hold strain under DC activation 	<ul style="list-style-type: none"> • Independent of the voltage polarity, it produces mostly monopolar actuation due to associated electrostriction effect. • Requires high voltages (~ 100 MV/m). Recent development allowed for a fraction of the field in the Ferroelectric EAP

Σύγκριση διηλεκτρικών και ιοντικών EAP

Τα διηλεκτρικά πολυμερή είναι σε θέση να συγκρατούν την επαγόμενη μετατόπισή τους ενώ ενεργοποιούνται υπό τάση DC. Αυτό επιτρέπει να ληφθούν υπόψη τα διηλεκτρικά πολυμερή για ρομποτικές εφαρμογές. Αυτοί οι τύποι υλικών έχουν επίσης υψηλή μηχανική πυκνότητα ενέργειας και μπορούν να λειτουργήσουν στον αέρα χωρίς σημαντική μείωση στην απόδοση. Ωστόσο, τα διηλεκτρικά πολυμερή απαιτούν πολύ υψηλά πεδία ενεργοποίησης (>10 V/ μ m) που είναι κοντά στο επίπεδο διάσπασης.

Η ενεργοποίηση των ιοντικών πολυμερών, από την άλλη, απαιτεί μόνο 1-2 V. Ωστόσο, πρέπει να διατηρούν την υγρασία τους, αν και ορισμένα πολυμερή έχουν αναπτυχθεί ως αυτόνομοι ενεργοποιητές που επιτρέπουν τη χρήση τους σε ξηρά περιβάλλοντα. Τα ιοντικά πολυμερή έχουν επίσης χαμηλή ηλεκτρομηχανική σύζευξη. Ωστόσο, είναι ιδανικά για βιομημητικές συσκευές.

Χαρακτηρισμός

Ενώ υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να χαρακτηριστούν τα ηλεκτρενεργά πολυμερή, μόνο τρεις θα εξεταστούν εδώ: καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, δυναμική μηχανική θερμική ανάλυση και διηλεκτρική θερμική ανάλυση.

Stress–strain curve

Οι καμπύλες καταπόνησης παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του πολυμερούς όπως η ευθραυστότητα, η ελαστικότητα και η αντοχή διαρροής του πολυμερούς. Αυτό γίνεται παρέχοντας μια δύναμη στο πολυμερές με ομοιόμορφο ρυθμό και μετρώντας την παραμόρφωση που προκύπτει.

Δυναμική μηχανική ανάλυση (DMTA)

Η δυναμική μηχανική ανάλυση είναι μια μη καταστροφική τεχνική που είναι χρήσιμη για την κατανόηση του μηχανισμού παραμόρφωσης σε μοριακό επίπεδο. Στο DMTA εφαρμόζεται μια ημιτονοειδής τάση στο πολυμερές και με βάση την παραμόρφωση του πολυμερούς επιτυγχάνονται ο συντελεστής ελαστικότητας και τα χαρακτηριστικά απόσβεσης. Τα ελαστικά υλικά παίρνουν τη μηχανική ενέργεια της τάσης και τη μετατρέπουν σε δυναμική ενέργεια που μπορεί αργότερα να ανακτηθεί. Ένα ιδανικό ελατήριο θα χρησιμοποιήσει όλη τη δυναμική ενέργεια για να ανακτήσει το αρχικό του σχήμα, ενώ ένα υγρό θα χρησιμοποιήσει όλη τη δυναμική ενέργεια για να ρέει, χωρίς να επιστρέψει ποτέ στην αρχική του θέση ή σχήμα (υψηλή απόσβεση). [18]

Διηλεκτρική θερμική ανάλυση (DETA)

Το DETA είναι παρόμοιο με το DMTA, αλλά αντί για εναλλασσόμενη μηχανική δύναμη εφαρμόζεται ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Το εφαρμοζόμενο πεδίο μπορεί να οδηγήσει σε πόλωση του δείγματος και εάν το πολυμερές περιέχει ομάδες που έχουν μόνιμα δίπολα, θα ευθυγραμμιστούν με το ηλεκτρικό πεδίο. Η διαπερατότητα μπορεί να μετρηθεί από την αλλαγή στο πλάτος και να αναλυθεί σε διηλεκτρικά στοιχεία αποθήκευσης και απώλειας. Το πεδίο ηλεκτρικής μετατόπισης μπορεί επίσης να μετρηθεί ακολουθώντας το ρεύμα. Μόλις αφαιρεθεί το πεδίο, τα δίπολα θα χαλαρώσουν και πάλι σε έναν τυχαίο προσανατολισμό. [19]

Εφαρμογές

Τα υλικά EAP μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν σε διάφορα σχήματα λόγω της ευκολίας στην επεξεργασία πολλών πολυμερών υλικών, καθιστώντας τα πολύ ευέλικτα υλικά. Μια πιθανή εφαρμογή για τα EAP είναι ότι μπορούν ενδεχομένως να ενσωματωθούν σε μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) για την παραγωγή έξυπνων ενεργοποιητών. [17]

Τεχνητοί μύες

Ως η πιο προοπτική πρακτική κατεύθυνση έρευνας, τα EAPs έχουν χρησιμοποιηθεί σε τεχνητούς μύες. Η ικανότητά τους να μιμούνται τη λειτουργία βιολογικών μυών με υψηλή αντοχή σε θραύση, μεγάλη καταπόνηση ενεργοποίησης και εγγενή απόσβεση κραδασμών επιστούν την προσοχή των επιστημόνων σε αυτόν τον τομέα.

Οι φυσικοί μύες είναι ένας από τους πιο σημαντικούς ενεργοποιητές σε βιολογικά συστήματα που είναι μεγαλύτερα από ένα βακτήριο. Τα Ηλεκτροενεργά πολυμερή που εμφανίστηκαν τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια εκθέτοντας μεγάλη καταπόνηση ως απόκριση στην ηλεκτρική διέγερση, είναι ανθρωπογενείς ενεργοποιητές που είναι πιο κοντά στους μύες. Για αυτήν την απόκριση, το EAP έχει κερδίσει το όνομα τεχνητοί μύες. Είναι ιδιαίτερα ελκυστικά σε εμπειρογνώμονες βιομιμητικής, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μιμηθούν τις κινήσεις ανθρώπων, ζώων και έντομα για την κατασκευή βιολογικά εμπνευσμένων μηχανισμών, συσκευών και ρομπότ.

Επιπλέον, τα υλικά EAP είναι ανώτερα από τη μνήμη σχήματος κράματα (SMA) σε υψηλότερη ταχύτητα απόκρισης, χαμηλότερη πυκνότητα και μεγαλύτερη ελαστικότητα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μηχανικών συσκευών χωρίς την ανάγκη για

παραδοσιακά εξαρτήματα όπως γρανάζια και ρουλεμάν, που ευθύνονται για το υψηλό κόστος, το βάρος και τις αστοχίες τους. Οι περιορισμοί των υλικών EAP που περιλαμβάνουν χαμηλή δύναμη ενεργοποίησης και χαμηλή μηχανική πυκνότητα ενέργειας και στιβαρότητα είναι περιορίζουν την πρακτική εφαρμογή, αλλά οι βελτιώσεις στον τομέα αναμένεται να ξεπεράσουν αυτούς τους περιορισμούς.

Απτικές οθόνες

Τα τελευταία χρόνια, τα ηλεκτροενεργά πολυμερή χρησιμοποιούνται για ανανεώσιμες οθόνες Braille για να βοηθήσουν τα άτομα με προβλήματα όρασης στη γρήγορη ανάγνωση και την επικοινωνία με υπολογιστή. Αυτή η ιδέα βασίζεται στη χρήση ενός ενεργοποιητή EAP διαμορφωμένου σε μορφή πίνακα.

Ως πολυμερή, τα υλικά EAP έχουν πολλές ελκυστικές ιδιότητες που είναι ανώτερες από άλλες υλικά. Το EAP μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί σε διάφορα σχήματα, οι ιδιότητές τους μπορούν να ενσωματωθούν με μικροσκοπικούς αισθητήρες για την παραγωγή έξυπνων ενεργοποιητών. Δυστυχώς, τα υπάρχοντα υλικά EAP εξακολουθούν να παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση μετατροπής, δεν είναι στιβαρά και δεν υπάρχουν τυπικά εμπορικά υλικά διαθέσιμα προς εξέταση στην πράξη εφαρμογές. Προκειμένου να μεταφερθούν αυτά τα υλικά από τη φάση ανάπτυξης στην εφαρμογή ως αποτελεσματικοί ενεργοποιητές, πρέπει να βελτιωθεί η εμπορική διαθεσιμότητα αυτών των υλικών για ευρύτερη χρήση. Τα τελευταία χρόνια, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος και περισσότερα εμπορικά προϊόντα αρχίζουν να εμφανίζονται. Επιπλέον, πολλοί οργανισμοί διερευνούν πιθανές εφαρμογές για υλικά EAP για τέτοια τομείς όπως η ιατρική, η ρομποτική, οι εξωσκελετές, οι μηχανισμοί άρθρωσης, η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, ψυχαγωγία, κινούμενα σχέδια, παιχνίδια, ρούχα, απτικές και απτικές διεπαφές, έλεγχος θορύβου, μετατροπείς, γεννήτριες ενέργειας και έξυπνες κατασκευές.

Μερικές από τις εφαρμογές που εξετάζονται περιλαμβάνουν και Ιατρικές εφαρμογές και πιθανά τεχνητά όργανα Τα ηλεκτρονικά υλικά EAP φαίνεται να είναι τα πιο εφαρμόσιμα αφού δημιουργούν το μεγαλύτερες δυνάμεις ενεργοποίησης και έχουν την υψηλότερη ευρωστία. Ωστόσο, οι απαιτούμενες τάσεις που μπορεί να είναι τόσο υψηλές αποτελούν πιθανό κίνδυνο που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Παρόλο που το ηλεκτρικό ρεύμα είναι σχετικά χαμηλό, η χρήση υψηλών τάσεων μπορεί να προκαλέσει θρόμβους αίματος ή τραυματισμό λόγω πιθανής διακοπής τάσης και βραχυκύκλωσης στο σώμα. Από την άλλη πλευρά, η ιοντική ομάδα EAP

είναι χημικά ευαίσθητη και απαιτεί αποτελεσματική σφράγιση για προστασία του εσωτερικού όργανα και αποφεύγοντας τη μόλυνση του ιοντικού περιεχομένου, γεγονός που μειώνει την απόδοση αποδοτικότητα. Επίσης, είναι δύσκολο να διατηρηθεί η στατική τους θέση, ιδιαίτερα για το IPMC, λόγω του γεγονότος ότι αυτά τα υλικά περιλαμβάνουν χημική αντίδραση.

Κεφάλαιο 3ο: IPMC - Μοντέλα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα σύνθετα υλικά ιοντικού πολυμερούς μετάλλου παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες ως ενεργοποιητές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλά διαφορετικά περιβάλλοντα, ιδιαίτερα σε υποβρύχιες εφαρμογές. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές φυσικές μορφές, για παράδειγμα, ως πολυμερή ή ως ιοντικά πολυμερή με βάση το υγρό. Οι ενεργοποιητές IPMC προσφέρουν μια ελκυστική επιλογή για εφαρμογές που απαιτεί μεγάλη μετατόπιση ενεργοποιητή με λιγότερη δύναμη, ευελιξία, χαμηλή μάζα και τάσεις. Αυτοί είναι μαλακοί σε σύγκριση με άλλα εύθραυστα κεραμικά EAP, κάτι που είναι καλό χαρακτηριστικό για εφαρμογές που απαιτούν κάμψη. Οι ενεργοποιητές IPMC έχουν αποδειχθεί με επιτυχία ότι λειτουργούν καλά σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως ιατρικές, βιομηχανικές, διαστημικές και μικροηλεκτρονικές μηχανές (MEMS). [20]

Μερικές εφαρμογές των ενεργοποιητών IPMC είναι οι παρακάτω:

Εφαρμογές Ρομποτικής

Λόγω των ικανοτήτων ενεργοποίησής τους σε υγρές συνθήκες όπως ακριβώς κάνουν οι βιολογικοί μύες, τα IPMC ήταν το κέντρο έλξης για την ανάπτυξη τεχνητών μυών για πολλές εφαρμογές ρομποτικής. Οι προσπάθειες για την ανάπτυξη ρομπότ που να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στον άνθρωπο σε φυσική εμφάνιση/ικανότητες και συμπεριφορά περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, ανάπτυξη ευέλικτων μηχανισμών ενεργοποίησης που μοιάζουν με βιολογικούς μύες. Έτσι τα IPMCs δείχνουν μεγάλες δυνατότητες χρήσης στην κατασκευή τέτοιων ρομπότ. Έχει σχεδιαστεί ένας ρομποτικός βραχίονας χρησιμοποιώντας IPMC από τον Shahinpoor [22]. Αυτό το σχέδιο χρησιμοποιούσε μια λαβή τεσσάρων δακτύλων που αποτελείται από IPMC, με γάντζους παρέχεται στο κάτω μέρος για να λειτουργεί ως νύχια. Μαζί με το ενδιαφέρον για τα ανθρώπινα ρομπότ, υπήρξαν ενδιαφέροντα και για άλλα βιομιμητικά ρομπότ όπως τα ρομπότ κολύμβησης.

Ένας άλλος εννοιολογικός σχεδιασμός ενός ρομποτικού κολύμβησης προτάθηκε από τον Shahinpoor [22]. Σε αυτή τη δομή, τα δείγματα IPMC κόπηκαν και ενώθηκαν σε ρομποτική μορφή που μοιάζει με ψάρι και με επιθυμητές αλλαγές στο σχήμα και στο μέγεθος ώστε να βοηθήσουν στην κολύμβηση. Οι ενέργειες επιτεύχθηκαν με την εφαρμογή εναλλασσόμενης τάσης κατά μήκος της κατασκευής. Επομένως, ένα ρομπότ ψαριού ή μια υποθαλάσσια δομή με σφραγισμένη ισχύ και σήμα μπορεί να σχεδιαστεί για να κολυμπά ακόμα και σε βαθιά επίπεδα αλλάζοντας την άνωση του.

Διαστημικές Εφαρμογές

Οι ενεργοποιητές IPMC μπορούν να λειτουργήσουν εξίσου καλά σε χαμηλές θερμοκρασίες καθώς και στο κενό ενώ παραμένουν εξαιρετικά ανθεκτικοί με καλή αντοχή σε θραύση κάτω από αυτές τις ακραίες συνθήκες. Εξαιτίας αυτών των χαρακτηριστικών, τα IPMC είναι πιθανοί υποψήφιοι για διαστημικές εφαρμογές. Στις αποστολές Viking και Mars Pathfinder της NASA ανακάλυψαν συσσώρευση σωματιδίων σκόνης στην επιφάνεια του υλικού λειτουργίας, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει την μακροχρόνια χρήση οπτικών οργάνων. Τα IPMC λήφθηκαν υπόψη στο σχεδιασμό υαλοκαθαριστήρα σκόνης με βάση το IPMC και επιλέχθηκε ως βασική τεχνολογία για την υπέρυθη κάμερα.

Ιατρικές Εφαρμογές

Τα βασικά χαρακτηριστικά του IPMC όπως η απαλότητα, η ευελιξία και οι μεγάλες μετατοπίσεις τα καθιστούν μια καλή επιλογή για χρήση ως υποκατάστατα του ανθρώπινου μυός. Το πιο δημοφιλές μοντέλο χρησιμοποιούσε πολλές λωρίδες IPMC που ήταν συνδεδεμένες μεταξύ τους που περιβάλλει έναν σωλήνα μεταφοράς υγρού. Με μια απλή μονάδα ελέγχου που ενεργοποιεί επιλεκτικά κάθε τμήμα του αυτός ο τεχνητός μυς χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ενός κινούμενου κύματος κατά μήκος του μυς, ο οποίος με τη σειρά του ανάγκασε το υγρό να ρέει μέσα από τον κλειστό σωλήνα, μεταφέροντας έτσι το υγρό στο σωληνάριο. Τα Nafion IPMC είναι βιοσυμβατά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας ως μυϊκά εμφυτεύματα όπως μέτρηση βαλβίδες, εξωσκελετική αύξηση της ανθρώπινης ισχύος και αντλίες διαφράγματος [9]. Επιπλέον, αφού τα IPMC λειτουργούν πολύ καλά σε υγρά περιβάλλοντα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ρομποτικές συσκευές που είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν μέσα στο ανθρώπινο σώμα για να εκτελούν χειρουργικές επεμβάσεις ή ως βοηθητικές συσκευές όπως τεχνητοί κοιλιακοί μύες για καρδιοπαθείς. Επίσης υπάρχουν τεχνητές συσκευές συμπίεσης καρδιάς με IPMC που αποφεύγουν τη θρόμβωση που προκύπτει όταν ρέει αίμα έρχεται σε επαφή με μη βιολογική επιφάνεια.

Εφαρμογή Micro-Manipulation

Τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) είναι ένα ταχέως αναπτυσσόμενο πεδίο που εφαρμόζεται σε περιοχές που δεν περιορίζονται σε μικρο-χειρισμό, μικροσυναρμολόγηση και μικρο-αρπαστήρες. Τα IPMC μπορούν να διαμορφωθούν ως μικρο- ή μακρο- αρπαγές για να λειτουργήσουν ως ενεργοποιητές στη συναρμολόγηση μικροσυστημάτων και στον βιομικροχειρισμό. Τα μικροσυστήματα ασχολούνται με τον χειρισμό άκαμπτων και

εύκαμπτων αντικειμένων μικρού μεγέθους, ενώ ο βιομικροχειρισμός απαιτεί εργασία με εύκαμπτα και εύθραυστα μικροαντικείμενα όπως κύτταρα, μικροοργανισμούς και βακτήρια. Τα IPMC μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε μικρορομπότ. Συσκευές MEMS που αποτελούνται από ηλεκτροενεργά τα πολυμερή IPMC καθιστούν δυνατή την κατασκευή αισθητήρα και ενεργοποιητή μικροσυστοιχίες, διεργασίες μικροκατασκευής και μικροβιο-αισθητήρες μιας χρήσης.

Μοντέλα

Ανάμεσα στα σημαντικά και ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά των υλικών IPMC είναι αυτό της κάμψης όταν το δείγμα υποβάλλεται σε ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή η κάμψη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες λειτουργίες. Με ειδική κατασκευή, τα δείγματα IPMC μπορούν επίσης να συμπεριφέρονται σαν να συστέλλονται αντί να λυγίζουν, γεγονός που τους κάνει να λειτουργούν ως μύες. Αν και υπάρχει σημαντικός όγκος πληροφοριών σχετικά με τη μηχανική κάμψης στα δείγματα IPMC, η φυσική αρχή πίσω από τη συμπεριφορά κάμψης της μεμβράνης IPMC δεν έχει επαληθευτεί ακόμη πλήρως. Ως εκ τούτου, δεν κατέστη δυνατό να ολοκληρωθεί και να εκφράσουν μοναδικά αυτή τη συμπεριφορά μαθηματικά. Παρά αυτό το μειονέκτημα, υπήρξε καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια για την ανάπτυξη καλύτερων ηλεκτρομηχανικών μαθηματικών μοντέλων που εκφράζουν τη συμπεριφορά κάμψης αυτών των υλικών. Είναι γνωστό ότι η υλική συμπεριφορά εξαρτάται σε διάφορα εσωτερικά φυσικά φαινόμενα των ίδιων των υλικών· για παράδειγμα, εσωτερικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις, ιοντικές βαθμίδες συγκέντρωσης; ιοντικές κινήσεις και διεργασίες διάχυσης προς τα πίσω και όλα συμβάλλουν στις φυσικές συμπεριφορές του υλικού. Μελέτες για τον τρόπο αλληλεπίδρασης αυτών των εσωτερικών φαινόμενα εξηγούν τις κάμψεις που αναπτύσσονται στα δείγματα IPMC όταν υποβάλλονται σε ηλεκτρικά πεδία και έχουν δείξει ότι υπάρχει κάποια ηλεκτρομηχανική σύζευξη μέσα στο υλικό. Αυτή η σύζευξη επιτρέπει τη χρήση ηλεκτρικών σημάτων για την πραγματοποίηση μηχανικών μετατοπίσεων που τελικά οδηγούν στην επιδιωκόμενη μηχανική εργασία, όπως η μετατόπιση του ελεύθερου τμήματος του δείγματος. Αυτή η ηλεκτρομηχανική σύζευξη έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές σε όλο τον κόσμο οδηγούν στην ανάπτυξη πολλών ξεχωριστών μοντέλων IPMC [23].

Αυτά τα μοντέλα μπορούν να χωριστούν σε τρεις διαφορετικές ομάδες ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξή τους. Η πρώτη ομάδα, γνωστή ως μοντέλα μαύρου

κουτιού, έχει μοντέλα που αναπτύχθηκαν με βάση τα εμπειρικά δεδομένα των ηλεκτρικών τάσεων εισόδου της μεμβράνης ή ρεύματα και τις αντίστοιχες μηχανικές μετατοπίσεις ή δυνάμεις εξόδου τους. Αυτά τα μοντέλα είναι απλά, και αναπτύχθηκαν με απευθείας αντιστοίχιση ένας προς έναν των εισόδων στις εξόδους. Η απόδοσή τους εξαρτάται πλήρως από το δείγμα για το οποίο προορίζονταν, δηλ. εξαρτώνται από το δείγμα μοντέλο.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχει μια άλλη ομάδα μοντέλων που είναι γνωστά ως μοντέλα white-box, τα οποία περιλαμβάνουν πολύ περίπλοκες διαδικασίες μοντελοποίησης. Αυτά τα μοντέλα αναπτύσσονται με τη μελέτη των φυσικών και χημικών φαινομένων που συμβαίνουν μέσα στο δείγμα. Αυτά τα μοντέλα είναι πιο λεπτομερή, τείνουν να είναι πολύ περίπλοκα και δυσεπίλυτα για χρήση σε εφαρμογές ελέγχου. Ανάμεσα στα μοντέλα της ομάδας μαύρου κουτιού και των μοντέλων ομάδας λευκού κουτιού βρίσκεται το γκρι κουτί ομάδα μοντέλων. Αυτά τα μοντέλα προέρχονται εν μέρει από τα φυσικά φαινόμενα του υλικού ως μοντέλα λευκού κουτιού, αλλά απλοποιούνται μέσω μεθόδων αναγνώρισης συστήματος όπως στο μαύρο κουτί. Αυτά τα μοντέλα με γκρι κουτί είναι εύκολο να αντιμετωπιστούν σε εφαρμογές ελέγχου και ήταν αντικείμενο των περισσότερων ερευνών εστιασμένες στον έλεγχο. Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής λαμβάνουν υπόψη το IPMC ως δοκός προβόλου. Ας τα γνωρίσουμε καλύτερα στις παρακάτω υποενότητες.

Μοντέλα Black-Box

Τα μοντέλα μαύρου κουτιού ή τα εμπειρικά μοντέλα αναπτύχθηκαν κυρίως όταν δεν υπήρχε αρκετή γνώση σχετικά με τη δυναμική του IPMC και υπήρχε έντονη ανάγκη για ένα ακριβές μοντέλο προκειμένου να διερευνηθούν πιθανές εφαρμογές της IPMC. Το πρώτο μοντέλο μαύρου κουτιού προτάθηκε το 1994 από τον Kanno [24] και έκτοτε περισσότεροι ερευνητές εξέτασαν το πρόβλημα. Σε αυτά τα πρώιμα μοντέλα, ο μηχανισμός του ενεργοποιητή η απόκριση σε μια εφαρμοζόμενη βηματική τάση μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια γραμμική σχέση, η οποία είχε ως αποτέλεσμα μια συνάρτηση μεταφοράς πραγματικών πόλων μοντελοποιώντας τη μετατόπιση του άκρου της μεμβράνης.

Η μη γραμμικότητα στην εξίσωση του μοντέλου συνεπάγεται ότι τα χαρακτηριστικά ενεργοποίησης των IPMC δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν ως γραμμικά και χρονο-αμετάβλητο σύστημα. Τα μοντέλα που βασίζονται σε αυτή τη σύνθεση είχαν δύο βασικούς περιορισμούς. Ο πρώτος περιορισμός ήταν το γεγονός ότι οι σταθερές του μοντέλου δεν ήταν σε θέση να προσδιορίσουν το επίπεδο της τάση εισόδου, και έτσι το μοντέλο να εξαρτάται από

την τάση διέγερσης εισόδου. Ο δεύτερος περιορισμός ήταν ότι αυτά τα μοντέλα δεν εξέτασαν ποτέ τις φυσικές διαστάσεις του δείγματος όπως το μήκος και το πάχος, κάτι που δεν είναι πρακτικό, ειδικά επειδή το μήκος τείνει να ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή.

Μοντέλα White-Box

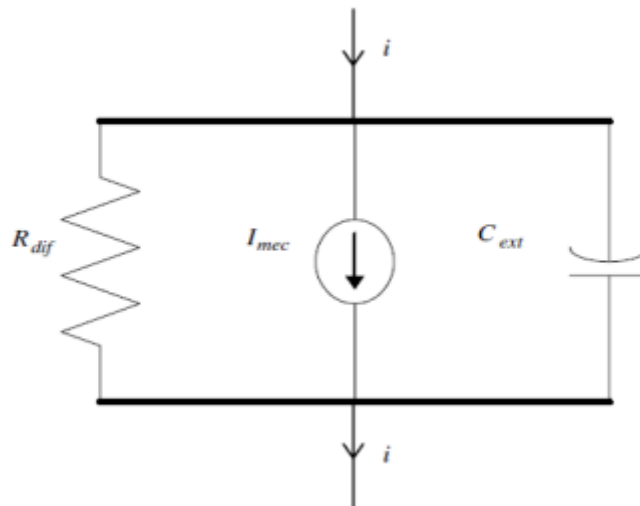
Τα μοντέλα που ομαδοποιούνται ως μοντέλα White-box έχουν σχεδιαστεί αποκλειστικά από την πλήρη γνώση της φυσικής που εμπλέκεται στις διαδικασίες ενεργοποίησης IPM και συσχετίζουν τα ηλεκτρολογικά και τις μηχανικές ιδιότητες του με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται γενικά και εκφράζονται ως μερικές διαφορικές εξισώσεις που εξηγούν το φαινόμενο της μηχανικής παραμόρφωσης του IPMC. Ένα από τα πρώτα μοντέλα λευκού κουτιού ήταν προτάθηκε το 1995 από τον Shahinpoor [21]. Αυτό το μοντέλο, το οποίο θεωρούσε ότι η οσμωτική πίεση επάγεται από το ηλεκτρικό πεδίο ως ο πρωταρχικός λόγος για την καταπόνηση που δημιουργείται στη μεμβράνη. Το μοντέλο γενικά θεωρείται ελλιπές επειδή δεν υποστηρίζεται από πειραματικά αποτελέσματα. Το πρώτο πλήρες μοντέλο λευκού κουτιού που επιλύθηκε πλήρως σύμφωνα με τους φυσικούς νόμους και σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα προτάθηκε το 2000 [25]. Μοντελοποίησαν τους σύνθετους ενεργοποιητές Nafion χρησιμοποιώντας έξι βασικές φυσικές αρχές: συστολή και διόγκωση της μεμβράνης IPMC, κίνηση ιόντων που διεγείρεται από την εφαρμοζόμενη τάση, κίνηση των μορίων του νερού που σύρονται από τα κατιόντα, αποτελέσματα της ορμής και ηλεκτροστατική δύναμη και αλλαγές στη διαμόρφωση. Το μοντέλο υπέθεσε ότι η ισορροπία των δυνάμεων από τα κινητά κατιόντα μέσω της μεμβράνης παρέχει μια σχέση μεταξύ της ιξώδους αντίστασης και την ηλεκτροστατική δύναμη. Οι ιξώδεις αντιστάσεις είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων διάχυσης που δημιουργούνται από κινούμενα κατιόντα και μόρια νερού.

Μοντέλα Grey-Box

Τα μοντέλα Gray-Box βασίζονται στο γνωστό φυσικό φαινόμενο αλλά αντιπροσωπεύουν αρχές που χρησιμοποιούν απλές τυποποιήσεις παραμέτρων. Αφού είναι σχεδιασμένα με αρκετές πληροφορίες για τις αρχές λειτουργίας της μεμβράνης, οδηγούν στην απαιτούμενη ακρίβεια ενώ λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις πειραματικές πτυχές που απαιτούνται για την αποτύπωση της συμπεριφοράς της μεμβράνης. Επομένως, τα μοντέλα με γκρι κουτί είναι λιγότερο περίπλοκα και πιο πρακτικά για χρήση στον έλεγχο εφαρμογές. Ο Kanno και οι

συνεργάτες του ήταν οι πρώτοι που πρότειναν ένα ευρέως αποδεκτό μοντέλο γκρι κουτιού για ενεργοποιητές IPMC [24].

Το μοντέλο γκρίζου κουτιού, εξήγησε την κάμψη της μεμβράνης IPMC χρησιμοποιώντας τις συνεχείς ηλεκτρομηχανικές αρχές [26]. Ένα μοντέλο κυκλώματος ομαδοποιημένων παραμέτρων που προέρχεται από τον υπολογισμό της συσχέτισης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης του. Αυτό το μοντέλο σχεδιάστηκε σε μακροσκοπικό επίπεδο όπου τα αποτελέσματα των μορίων του νερού θεωρούνται σε πολύ μικρό επίπεδο σε σύγκριση με τις επιδράσεις των κινητών κατιόντων. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο προσδιορίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή και το ηλεκτρικό μοντέλο IPMC όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Ηλεκτρικό μοντέλο IPMC

Αρχικά, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα μηχανικά χαρακτηριστικά του IPMC και υποθέτει ότι οι μηχανικές καταπονήσεις προκαλούνται μόνο από ηλεκτροστατικές δυνάμεις που υφίστανται τα ανιόντα ανάλογα με πώς κατανέμονται τα κατιόντα. Στη συνέχεια καθιερώνεται το ηλεκτρικό μοντέλο για το IPMC προκειμένου να προσδιορίζει τις ηλεκτρικές δυνάμεις. Αυτό βοηθά στον προσδιορισμό της κατανομής των κατιόντων και επομένως της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

Αυτό το μοντέλο είναι αρκετά περίπλοκο για χρήση σε εφαρμογές ελέγχου. Το κύκλωμα που προτείνεται από αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει μια ενεργή πηγή ρεύματος.

Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση Φυσικού Μοντέλου IPMC

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται βήμα προς βήμα ένας οδηγός για τον τρόπο μοντελοποίησης της βασικής ηλεκτρομηχανικής ενεργοποίησης υλικών IPMC με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics [27]. Για να είναι εύκολη η παρακολούθηση, γίνονται μερικές απλοποιήσεις.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μοντέλου, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες ενότητες φυσικής COMSOL:

Ενότητα Δομικής Μηχανικής,

Μονάδα AC/DC,

Ενότητα Μηχανικής Χημικής Αντίδρασης και

Ενότητα Μαθηματικών.

4.1 Σχεδίαση Μοντέλου

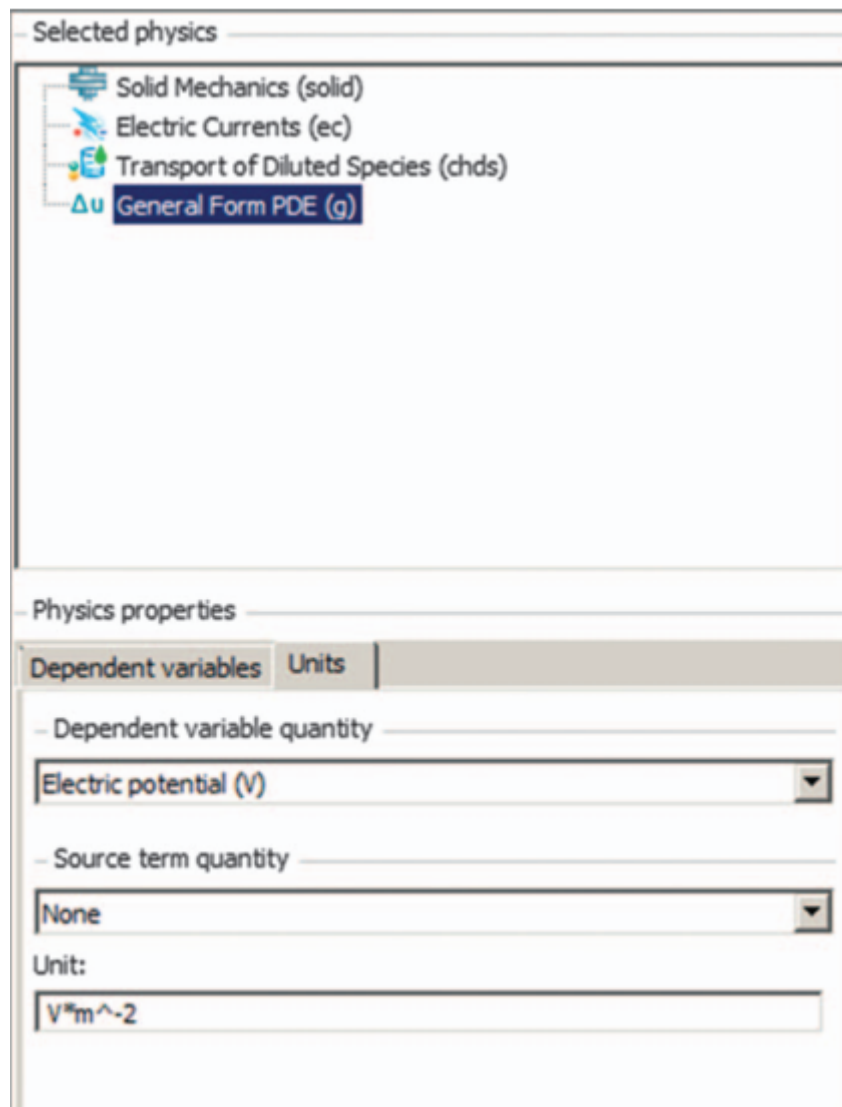
Στον Οδηγό μοντέλου, επιλέξτε 2D ως διάσταση χώρου και κάντε κλικ στο μπλε βέλος «Επόμενο» στην επάνω δεξιά γωνία.

Στην περιοχή Add Physics, αναπτύξτε τη μονάδα AC/DC και κάντε διπλό κλικ στην επιλογή Ηλεκτρικά ρεύματα (ec).

Αναπτύξτε επίσης το Chemical Species Transport και κάντε διπλό κλικ στο Transport of Diluted Species (chds).

Στη συνέχεια, αναπτύξτε την ενότητα Μαθηματικών και επεκτείνετε περαιτέρω τις διεπαφές PDE, κάντε διπλό κλικ στο General Form PDE (g), το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της εξίσωσης Poisson.

Κάτω από την περιοχή Selected physics βρίσκονται οι Φυσικές ιδιότητες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Για τη λειτουργική μονάδα General Form PDE, κάντε κλικ στην καρτέλα Units και ορίστε την εξαρτημένη μεταβλητή ποσότητα σε Ηλεκτρικό δυναμικό (V). Η ποσότητα του όρου πηγής θα πρέπει να παραμείνει ως Καμία. Αλλάξτε τη μονάδα σε $V \cdot m^{-2}$ και κάντε κλικ στο μπλε βέλος «Επόμενο» στην επάνω δεξιά γωνία.



Εικόνα 4.1: Επιλογή Παραθύρου Physics

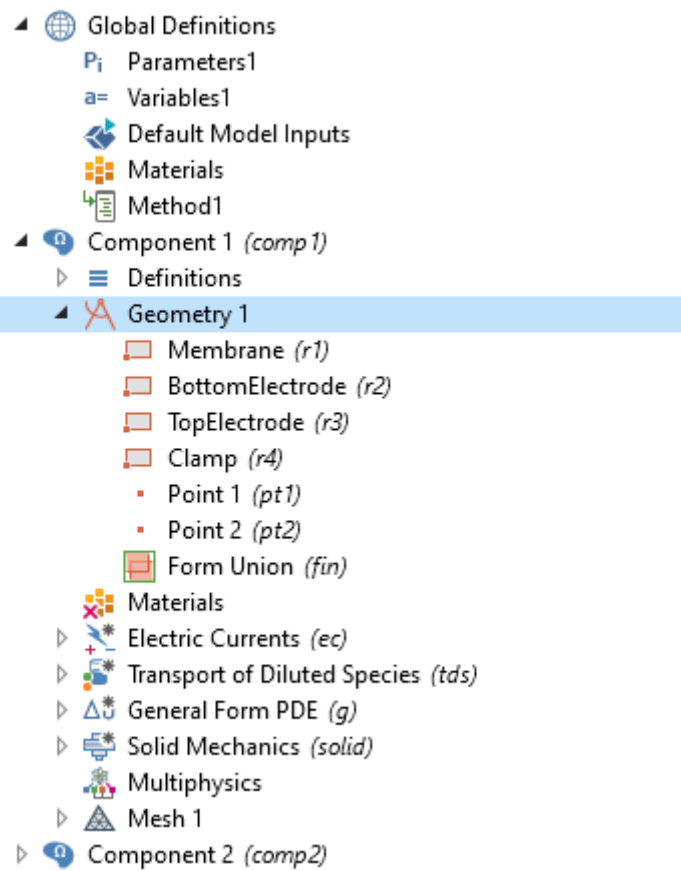
Στην περιοχή Επιλογή τύπου μελέτης, αναπτύξτε τις Custom Studies ακολουθούμενες από Preset Studies για το Some Physics. Επιλέξτε Time Dependent και κάντε κλικ στο καρόκουμπι σημαίας για να ολοκληρώσετε με τον οδηγό μοντέλου για το μοντέλο Poisson–Nernst–Planck και το απλό ηλεκτρόδιο. Κάντε δεξί κλικ στην κορυφαία επιλογή στο παράθυρο του Model Builder, Untitled.mph (root) και, στη συνέχεια, κάντε κλικ στην Προσθήκη μοντέλου για να ανοίξετε τον Οδηγό μοντέλου για ένα δεύτερο μοντέλο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η ηλεκτρομηχανική μεταγωγή IPMC μοντελοποιείται σε δύο στάδια, πρώτον επίλυση για την πυκνότητα φορτίου σε όλο το πολυμερές και δεύτερο επίλυση για την παραμόρφωση του πολυμερούς. Επιλέξτε 2D ως διάσταση χώρου. Στην περιοχή Add Physics, αναπτύξτε τη μονάδα Structural Mechanics και κάντε διπλό κλικ στην Solid Mechanics.

Στην περιοχή Select Study Type, αναπτύξτε τις Custom Studies -> Preset Studies για Some Physics και επιλέξτε Time Dependent. Στην περιοχή Selected physics, αποεπιλέξτε τις ενότητες Electric Currents, Transport of Diluted Species, και General Form PDE κάνοντας κλικ στο πράσινο σημάδι επιλογής στη στήλη Solve για κάθε λειτουργική μονάδα και, στη συνέχεια, κάντε κλικ στο κουμπί με την καρδιά σημαία για να ολοκληρώσετε με τον οδηγό μοντέλου.

Στο Εργαλείο δημιουργίας μοντέλων, αναπτύξτε τη Study 1 και επιλέξτε Βήμα 1: Time Dependent για να ανοίξετε το παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης Time Dependent. Στην περιοχή ρυθμίσεων μελέτης, αλλάξτε τους χρόνους σε εύρος (0,0.1,20). Στη συνέχεια, στο Πρόγραμμα δημιουργίας μοντέλων, αναπτύξτε τη Study 2 και επιλέξτε Βήμα 1: Time Dependent για να ανοίξετε το παράθυρο ρυθμίσεων μελέτης εξαρτώμενη από τον χρόνο για τη Study 2. Στην περιοχή ρυθμίσεων μελέτης, αλλάξτε τους χρόνους σε εύρος (0,0.1,20). Στη συνέχεια κάντε κλικ στις Values of Dependent Variables για να αναπτύξετε αυτήν την περιοχή. Κάντε κλικ στο πλαίσιο ελέγχου για τις τιμές των μεταβλητών που δεν επιλύθηκαν. Αλλάξτε τη μέθοδο σε Solution, αλλάξτε τη Study σε Study 1, Εξαρτάται από τον χρόνο και αλλάξτε το Time σε Όλα.

Η γεωμετρία που χρησιμοποιείται σε αυτό το μοντέλο έχει διαστάσεις παρόμοιες με αυτές του ενός δείγματος IPMC. Στο Model Builder, αναπτύξτε το Model 1 και κάντε δεξιά κλικ στο Geometry 1. Επιλέξτε Ορθογώνιο για να προσθέσετε ένα ορθογώνιο στη γεωμετρία. Στο νέο παράθυρο με τίτλο Ορθογώνιο, αλλάξτε το Πλάτος σε 51,07 mm και το Ύψος σε 0,57 mm. Αυτή θα είναι η πολυμερής μεμβράνη του IPMC. Προσθέστε ένα άλλο ορθογώνιο με πλάτος 51,07 mm και Ύψος 0,008 mm. Αλλάξτε τη θέση y σε -0,008 mm. Αυτό θα είναι το κάτω ηλεκτρόδιο. Προσθέστε ένα τρίτο ορθογώνιο με πλάτος 51,07 mm και ύψος 0,008 mm. Αλλάξτε τη θέση y σε 0,57 mm. Αυτό θα είναι το κορυφαίο ηλεκτρόδιο. Κάντε κλικ στην επιλογή Δημιουργία όλων στο επάνω μέρος του παραθύρου Ορθογώνιο. Προσθέστε ένα τέταρτο ορθογώνιο με Πλάτος 10 mm και Ύψος 0,586 mm. Αλλάξτε τη θέση y σε 0,008 mm. Αυτό θα αντιπροσωπεύει την περιοχή clamp του IPMC. Στη συνέχεια, κάντε ξανά δεξιά κλικ στο Geometry 1 και επιλέξτε Σημείο για να προσθέσετε ένα σημείο το μοντέλο. Στο παράθυρο Σημείο, αλλάξτε τη θέση x σε 10 mm και τη θέση y σε 0,578 mm. Προσθέστε ένα δεύτερο σημείο σε θέση x 10 mm και θέση y -0,008 mm. Στη συνέχεια, κάντε αριστερό κλικ στο Geometry 1 για να ανοίξετε το παράθυρο Geometry. Κάντε κλικ στο Κουμπί Build All στην επάνω αριστερή πλευρά του παραθύρου.

Όλα τα παραπάνω ρυθμίσεις εμφανίζονται στις παρακάτω Εικόνες 4.2-4.8.



Εικόνα 4.2: Παράθυρο με τις γενικές ρυθμίσεις

Settings

Rectangle

Build Selected Build All Objects

Label:

▼ Object Type

Type:

▼ Size and Shape

Width: m

Height: m

▼ Position

Base:

x: m

y: m

▼ Rotation Angle

Rotation: deg

► Layers

▼ Selections of Resulting Entities

Resulting objects selection

Show in physics:

Color:

— Cumulative selection —

Contribute to:

Εικόνα 4.3: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του Membrane

Settings

Rectangle

Build Selected Build All Objects

Label: BottomElectrode

Object Type

Type: Solid

Size and Shape

Width: 51.07[mm] m

Height: 0.008[mm] m

Position

Base: Corner

x: 0 m

y: -0.008[mm] m

Rotation Angle

Rotation: 0 deg

Layers

Selections of Resulting Entities

Resulting objects selection

Show in physics: Domain selection

Color: None

Cumulative selection

Contribute to: None New

Εικόνα 4.4: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του BottomElectrode

Settings

Rectangle

Build Selected Build All Objects

Label:

Object Type

Type:

Size and Shape

Width: m

Height: m

Position

Base:

x: m

y: m

Rotation Angle

Rotation: deg

Layers

Selections of Resulting Entities

Resulting objects selection

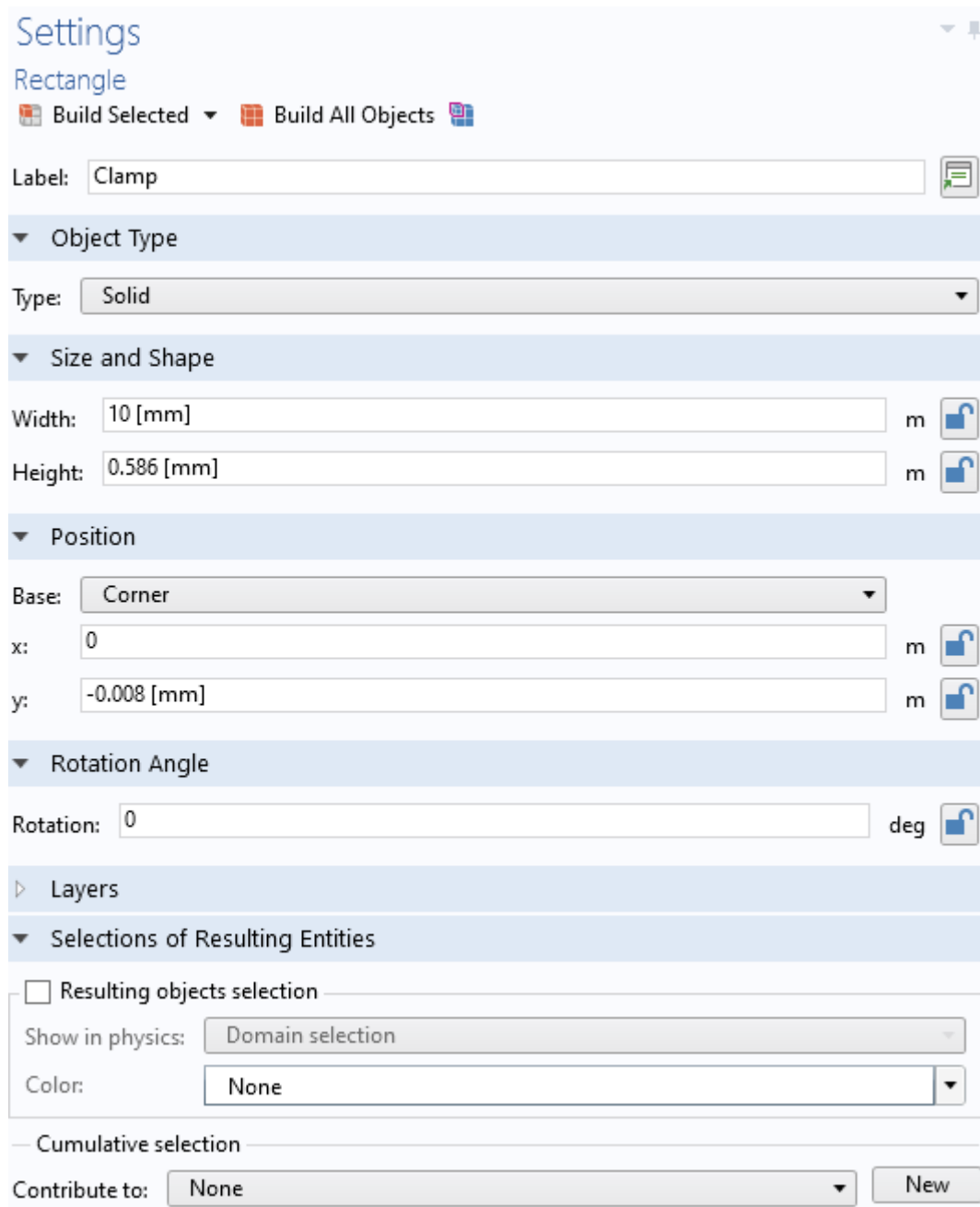
Show in physics:

Color:

Cumulative selection

Contribute to:

Εικόνα 4.5: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του TopElectrode



Εικόνα 4.6: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του Clamp

Settings

Point

Build Selected Build All Objects

Label:

▼ Point

x: m

y: m

▼ Selections of Resulting Entities

Resulting objects selection

Show in physics:

— Cumulative selection

Contribute to:

Εικόνα 4.7: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του Point 1

Settings

Point

Build Selected Build All Objects

Label:

▼ Point

x: m

y: m

▼ Selections of Resulting Entities

Resulting objects selection

Show in physics:

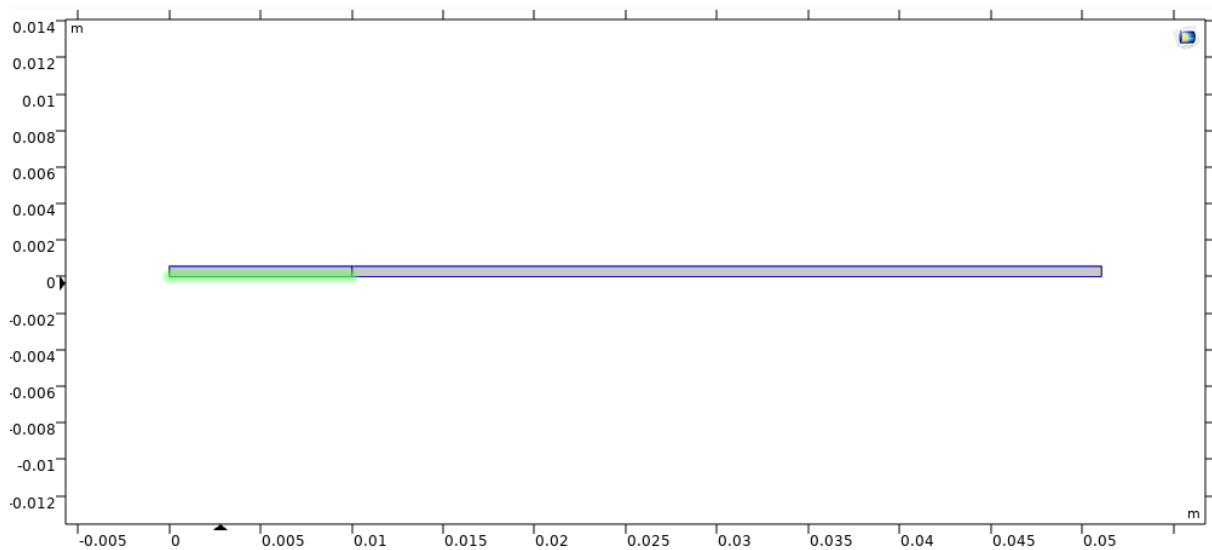
— Cumulative selection

Contribute to:

Εικόνα 4.8: Παράθυρο με τις ρυθμίσεις του Point 2

Επιστρέψτε στο παράθυρο του Model Builder και αναπτύξτε το Model 1, αναπτύξτε το Geometry 1 και αναπτύξτε το Model 2. Κάντε δεξί κλικ στο Rectangle 1 και επιλέξτε Αντίγραφο. Στη συνέχεια, κάντε δεξί κλικ στο Geometry 2 και επιλέξτε Επικόλληση ορθογωνίου. Ομοίως, αντιγράψτε τα ορθογώνια 2, 3 και 4 και σημεία 1 και 2 από τη Geometry 1 έως Geometry 2. Στη συνέχεια, κάντε αριστερό κλικ στο Geometry 2 για να ανοίξετε το παράθυρο Geometry 2 και επιλέξτε Build All. Η δεύτερη γεωμετρία πρέπει να είναι ίδια με την πρώτη.

Η τελική εικόνα θα είναι όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9: IPMC δοκός

Global Definitions

Οι καθολικοί ορισμοί είναι παράμετροι, μεταβλητές και άλλοι ορισμοί που είναι για χρήση σε ολόκληρο το αρχείο COMSOL, συμπεριλαμβανομένων και των δύο μοντέλων.

Settings
Parameters

Label: Parameters1

Parameters

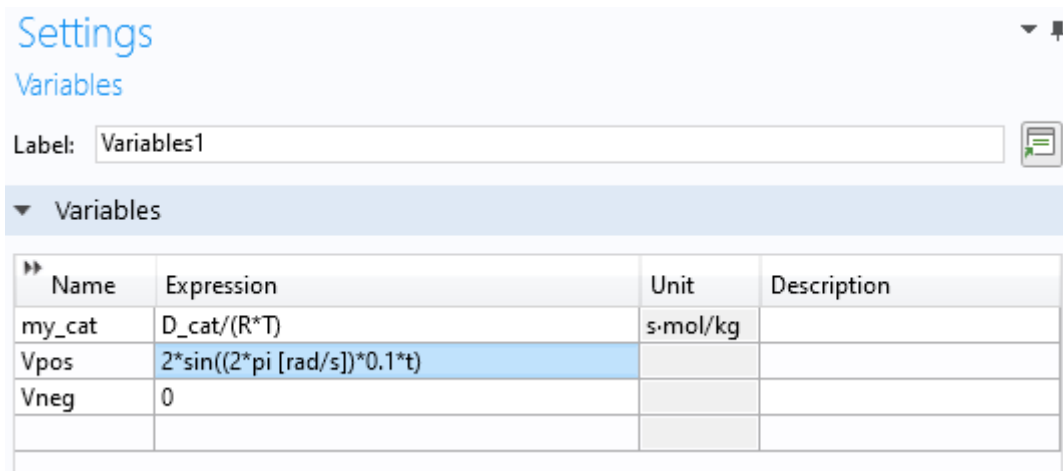
Name	Expression	Value	Description
width_IPMC	9.94 [mm]	0.00994 m	
D_cat	7e-11 [m ² /s]	7E-11 m ² /s	
R	8.31 [J/(mol*K)]	8.31 J/(mol·K)	
T	293 [K]	293 K	
z_cat	1	1	
conc_cat_mol	1200 [mol/m ³]	1200 mol/m ³	
epsilon	2 [mF/m]	0.002 F/m	
Faraday	96485.3415 [s*A/mol]	96485 C/mol	
Young_IPMC	41 [MPa]	4.1E7 Pa	
Poisson_IPMC	0.49	0.49	
density_IPMC	2000 [kg/m ³]	2000 kg/m ³	
Alpha	0.0001 [N/C]	1E-4 V/m	
endtime	20[s]	20 s	

Εικόνα 4.10: Ρυθμίσεις παραμέτρων για το IPMC

Κάντε δεξί κλικ στο Global Definitions στο Model Builder και επιλέξτε Parameters για να προσθέσετε έναν πίνακα για καθολικές παραμέτρους, όπως η Εικόνα 4.10.

Στο Μοντέλο Builder, αναπτύξτε το Global Definitions και επιλέξτε Parameters για να ανοίξετε το παράθυρο Parameters. Κάντε κλικ στο πρώτο στοιχείο πίνακα στη στήλη Όνομα και προσθέστε την παράμετρο "width_IPMC". Στο αντίστοιχο στοιχείο Έκφρασης, είσοδος 9,94 mm.

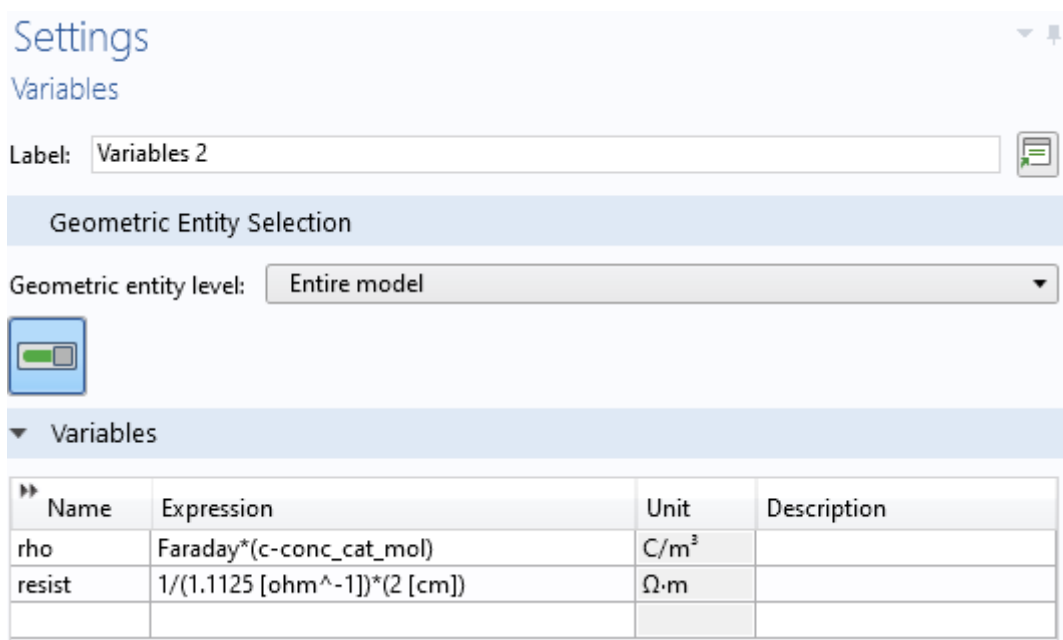
Στη συνέχεια, εισαγάγετε τις παραμέτρους που εμφανίζονται στην Εικόνα 4.10 με παρόμοιο τρόπο. Στη συνέχεια, κάντε δεξί κλικ στο Global Definitions στο Model Builder και επιλέξτε Μεταβλητές για προσθήκη πίνακα καθολικών μεταβλητών και εισάγετε τις μεταβλητές της Εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.11: Ρυθμίσεις μεταβλητών για το IPMC – μοντέλο 1

Model Definitions

Στη συνέχεια, αναπτύξτε το Μοντέλο 2 στο Εργαλείο δημιουργίας μοντέλων. Κάντε δεξί κλικ στην επιλογή Ορισμοί και κάντε κλικ στο Variables για να προσθέσετε ένα σύνολο μεταβλητών, με τίτλο Variables 2, που ορίζονται μόνο για το Μοντέλο 2 (Εικόνα 4.12). Εισαγάγετε τις μεταβλητές Model 2 που εμφανίζονται στην Εικόνα 4.12 παρόμοια με τις μεθόδους εισαγωγής καθολικών παραμέτρων και Μεταβλητές.



Εικόνα 4.12: Ρυθμίσεις μεταβλητών για το IPMC – μοντέλο 2

Για τη δημιουργία του υλικού απαιτούνται διάφορες ρυθμίσεις όπως φαίνονται στις παρακάτω Εικόνες. Αρχικά καταργείτε τους τομείς 3, 4 και 6. Οι τομείς 2 και 5 αντιπροσωπεύουν την πολυμερή μεμβράνη και θα είναι οι μοναδικοί τομείς στην περιοχή Επιλογή τομέα για Transport of Diluted Species. Στη συνέχεια στην περιοχή Transport Mechanisms, καταργήστε την επιλογή Convection και επιλέξτε Migration σε ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό παρέχει τη μορφή της εξίσωσης Nernst–Planck που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με λογικά αποτελέσματα για ηλεκτρομηχανικά IPMC προσομοιώσεις μεταγωγής. Στη συνέχεια, στο Εργαλείο δημιουργίας μοντέλων, αναπτύξτε το στοιχείο Transport of Diluted Species (chds) και επιλέξτε Diffusion and Migration για να ανοίξετε τις αντίστοιχες ρυθμίσεις.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις για όλες τις φυσικές παραμέτρους που χρειάζεται το IPMC στο Comsol.

Settings

Electric Currents

Label:

Name:

Domain Selection

Selection:

1
3
4
6

Equation

Equation form:

Show equation assuming:

$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_{j,v}$

$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_e$

$\mathbf{E} = -\nabla V$

Thickness

Out-of-plane thickness:
 d m

Manual Terminal Sweep Settings

Reference impedance:
 Z_{ref} Ω

Use manual terminal sweep

Discretization

Electric potential:

Dependent Variables

Electric potential:

Εικόνα 4.13: Ρυθμίσεις Electric Currents

Settings
Transport of Diluted Species

Label: Transport of Diluted Species

Name: tds

▼ Domain Selection

Selection: Manual

2
5

▼ Equation

Equation form: Study controlled

Show equation assuming: Study1, Time Dependent

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_i = R_i$$

$$\mathbf{J}_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_{m,i} F c_i \nabla V$$

▼ Transport Mechanisms

Additional transport mechanisms

Convection

Migration in electric field

Mass transfer in porous media

▼ Discretization

Concentration: Linear

▼ Dependent Variables

Number of species: 1

Concentrations: c

Εικόνα 4.14: Ρυθμίσεις Transport of Diluted Species

Settings

General Form PDE

Label:

Name:

Domain Selection

Selection:

2
5

Units

Dependent variable quantity	Unit
Electric potential	V

Source term quantity	Unit
Custom unit	V*m ⁻²

Discretization

Shape function type:

Element order:

Frame:

Dependent Variables

Field name:

Number of dependent variables:

Dependent variables:

Εικόνα 4.15: Ρυθμίσεις General Form PDE

Settings

Solid Mechanics

Label:

Name:

▼ Domain Selection

Selection:

1

2

3

4

5

6

+

-

📄

📁

🔍

▶ Equation

▼ Physics Symbols

Enable physics symbols

— Show or hide all physics symbols —

▼ 2D Approximation

Out-of-plane mode extension (time-harmonic)

Out-of-plane wave number:

k_z rad/m

▼ Thickness

d m

▼ Structural Transient Behavior

▼ Reference Point for Moment Computation

x_{ref}	<input type="text" value="0"/>	x	m
	<input type="text" value="0"/>	y	

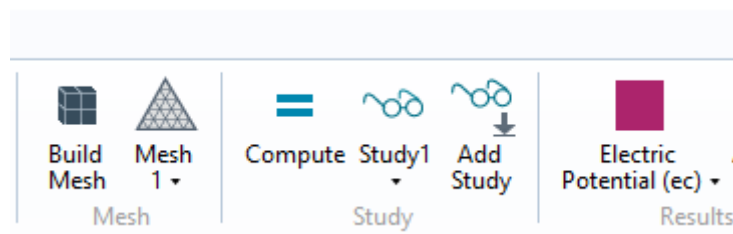
▼ Typical Wave Speed for Perfectly Matched Layers

c_{ref} m/s

Εικόνα 4.16: Ρυθμίσεις Solid Mechanics

4.2 Εμφάνιση Αποτελεσμάτων

Στο Model Builder, κάντε κλικ Στο Study 1 για να ανοίξετε τις αντίστοιχες ρυθμίσεις και κάντε κλικ στο κουμπί Compute όπως φαίνεται την Εικόνα . Αυτό θα ξεκινήσει εκτέλεση υπολογισμών για την πρώτη μελέτη. δηλαδή, αυτό θα λύσει το Poisson– Μοντέλο Nernst–Planck για να βρει την πυκνότητα φόρτισης για την είσοδο τάσης στο ηλεκτρόδια.



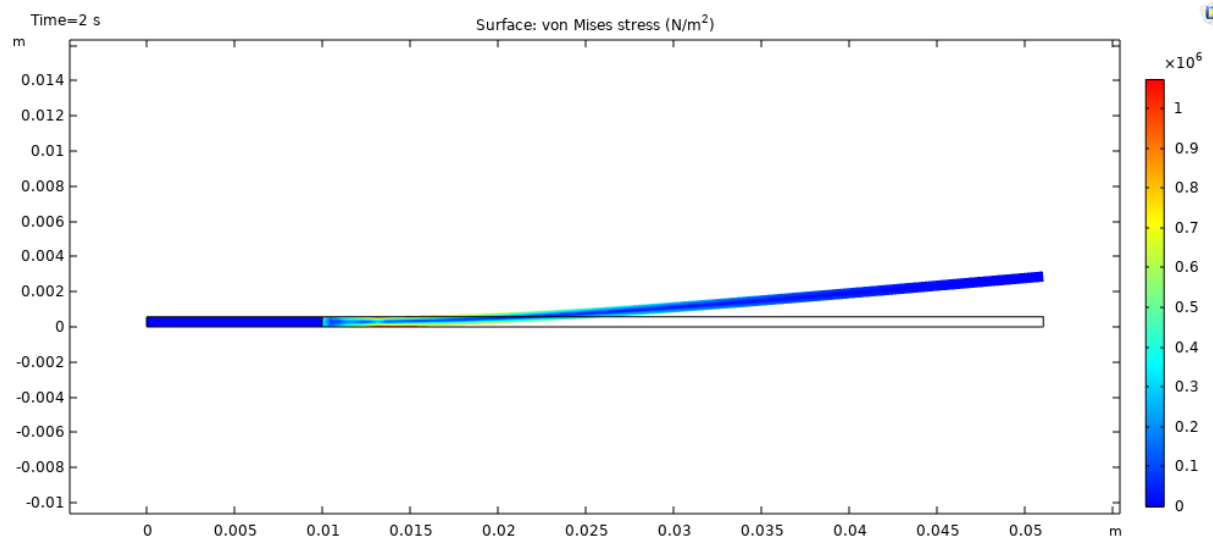
Εικόνα 4.17: Κουμπί Compute

Αφου πατηθεί το Compute εμφανίζεται η πράσινη γραμμή φόρτωσης στην κάτω δεξιά γωνία του COMSOL. Η διεπαφή υποδεικνύει τον όγκο των δεδομένων που υποβάλλονται σε επεξεργασία. Μόλις ολοκληρωθεί, το προεπιλεγμένο αποτέλεσμα εμφανίζεται το ηλεκτρικό δυναμικό, η συγκέντρωση κατιόντων και το φορτίο σε όλη την έκταση.

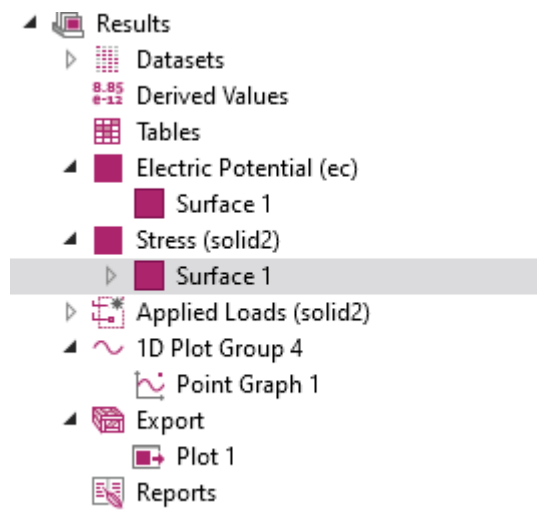
Στη συνέχεια κάντε κλικ στο Study 2 στο Model Builder και κάντε κλικ στο Compute για να εκτελέσετε το Study 2. Αυτό θα ξεκινήσει να εκτελεί υπολογισμούς για την παραμόρφωση που προκαλείται από την πυκνότητα φορτίου, δεδομένης της χρησιμοποιούμενης αναλογικής σύζευξης. Μόλις ολοκληρωθεί, εμφανίζεται μια άλλη προεπιλεγμένη γραφική παράσταση που δείχνει παραμόρφωση και von Mises stress. Η πίεση σε όλο το IPMC σε κάθε χρονικό βήμα εμφανίζεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.18.

Στο Εργαλείο δημιουργίας μοντέλων, αναπτύξτε τα Results, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.19 για να δείτε τα προεπιλεγμένα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι λειτουργίες των συνόλων δεδομένων, των πινάκων και της εξαγωγής δημιουργήστε αρχεία δεδομένων και γραφικές παραστάσεις που καθορίζονται από τον χρήστη,

όπως η μετατόπιση άκρου IPMC γραφική παράσταση για το δεδομένο παράδειγμα που φαίνεται στην Εικόνα 4.20.

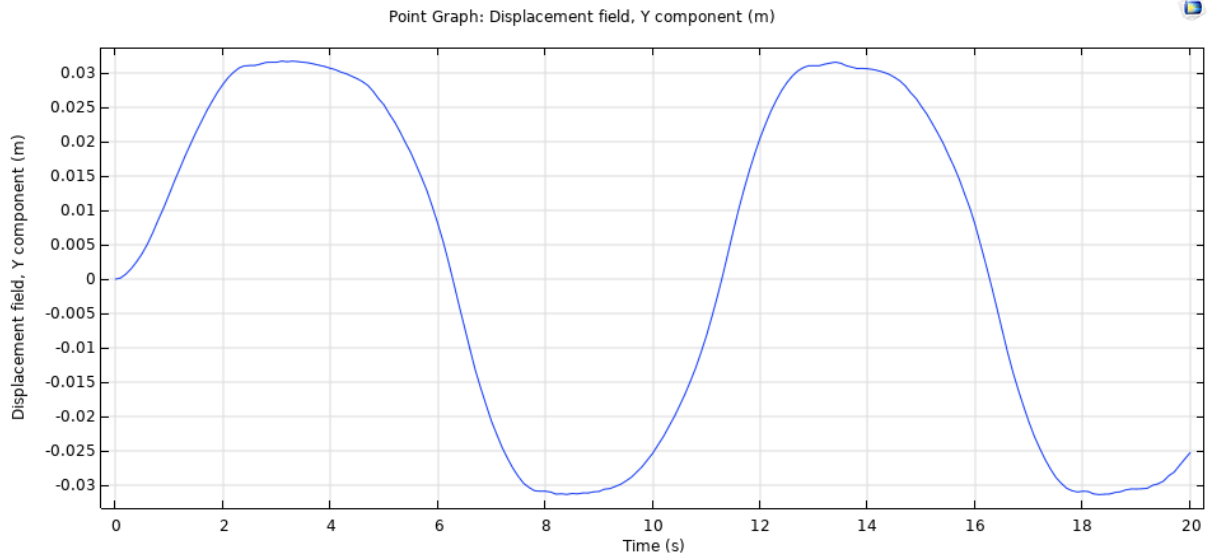


Εικόνα 4.18: Αποτέλεσμα προσομοίωσης – Κάμψη του IPMC – von Mises stress

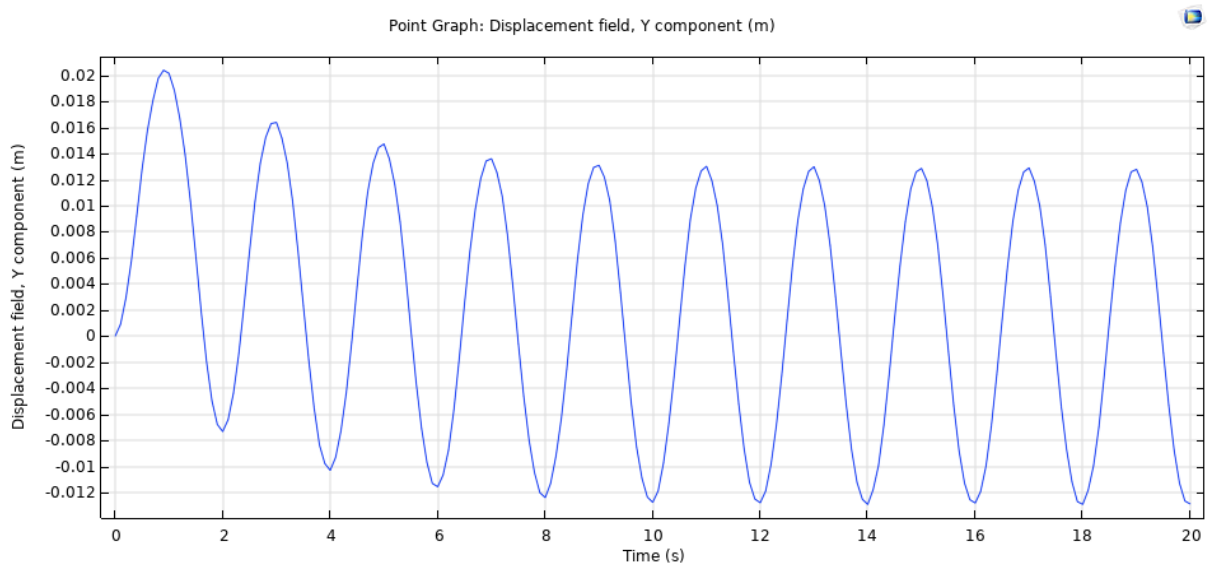


Εικόνα 4.19: Αποτέλεσμα προσομοίωσης

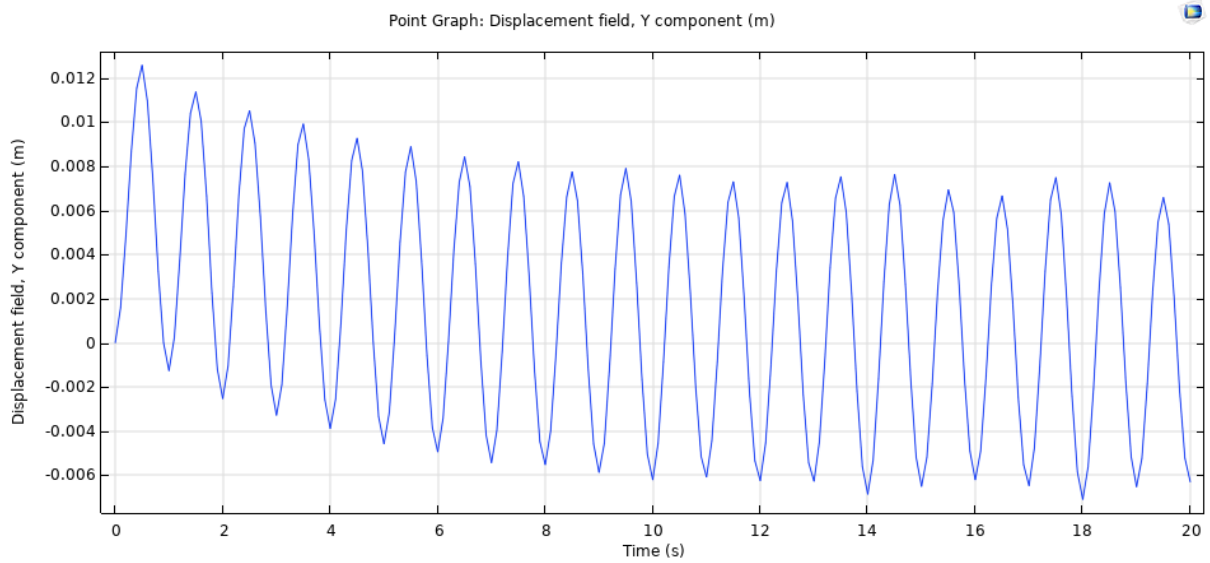
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Μετατόπισης ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζονται διάφορες τάσεις εισόδου sinus.



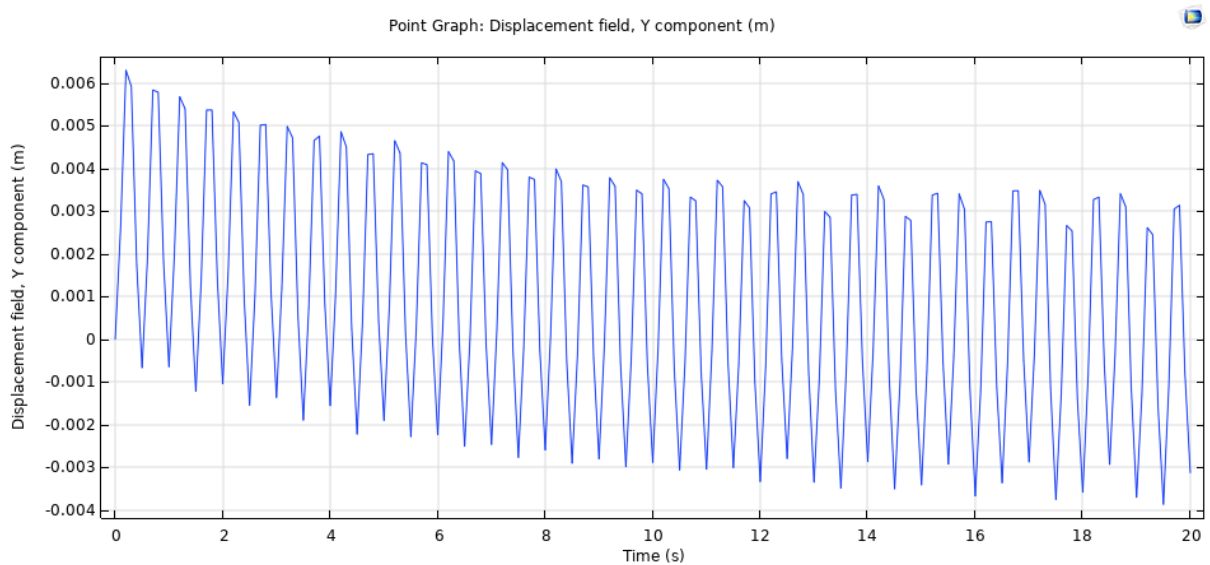
Εικόνα 4.20: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 0.1Hz



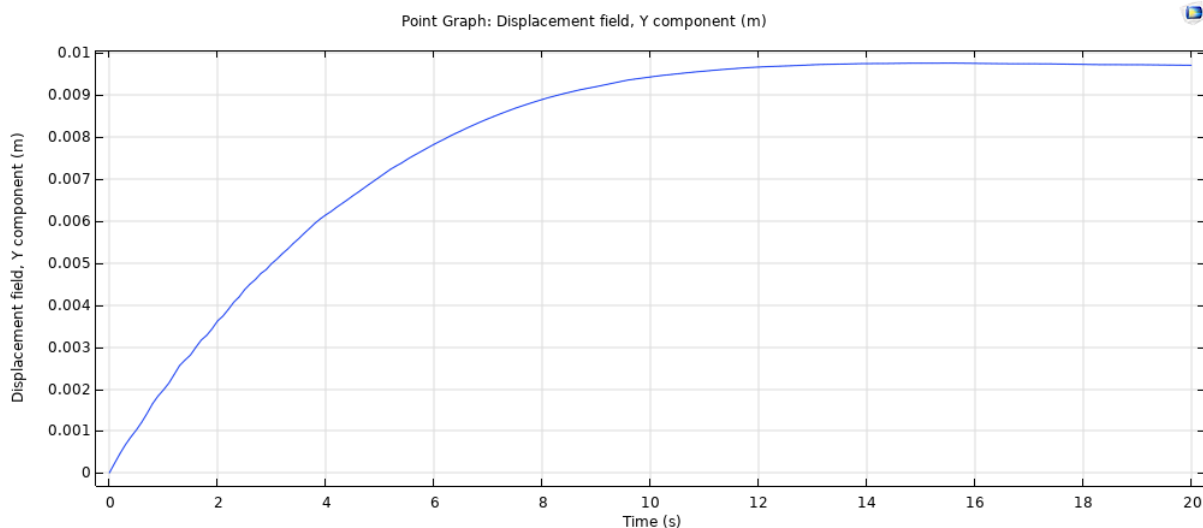
Εικόνα 4.21: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 0.5Hz



Εικόνα 4.22: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 1Hz



Εικόνα 4.23: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 2Hz



Εικόνα 4.24: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται βηματική τάση εισόδου 2V

Στην Εικόνα 4.24 παρουσιάζεται η Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται βηματική τάση εισόδου 2V και φαίνεται ότι το υλικό με τις παραμέτρους που τοποθετήθηκαν στο φυσικό του μοντέλο αποκλίνει από τα γνωστά μοντέλα όσον αφορά την απόκριση του όταν διατηρείται η τάση στην είσοδο. Αυτό που έπρεπε εμφανιστεί είναι η επιστροφή του στην αρχική του θέση.

Κεφάλαιο 5ο: Χαρακτηριστικά του Έξυπνου Υλικού IPMC

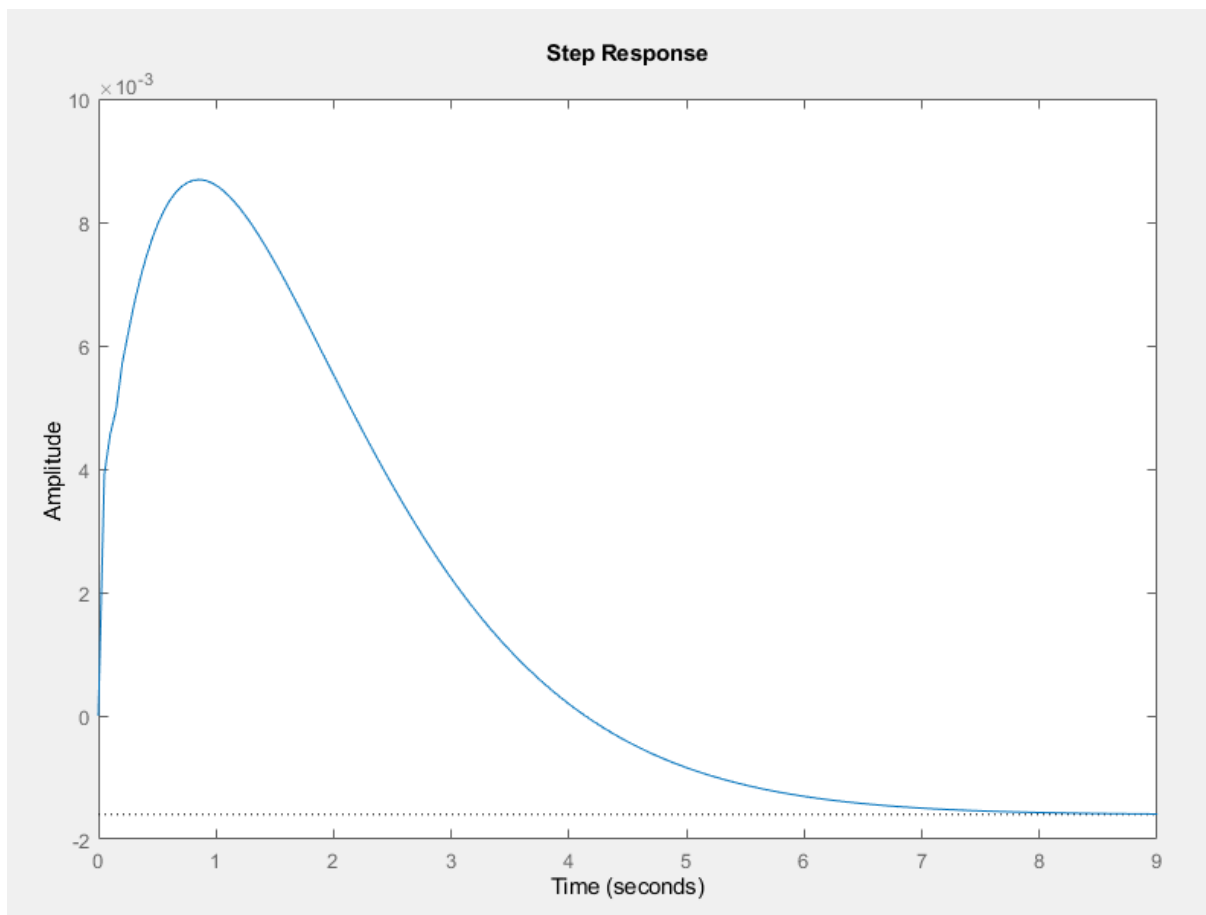
Μελετήθηκε το IPMC Μοντέλο στη Matlab για να εξετασθούν τα χαρακτηριστικά του και μια εφαρμογή του όταν εφαρμοστεί ημιτονοειδή είσοδο.

Η συνάρτηση μεταφοράς του είναι 4^{ης} τάξης ίση με:

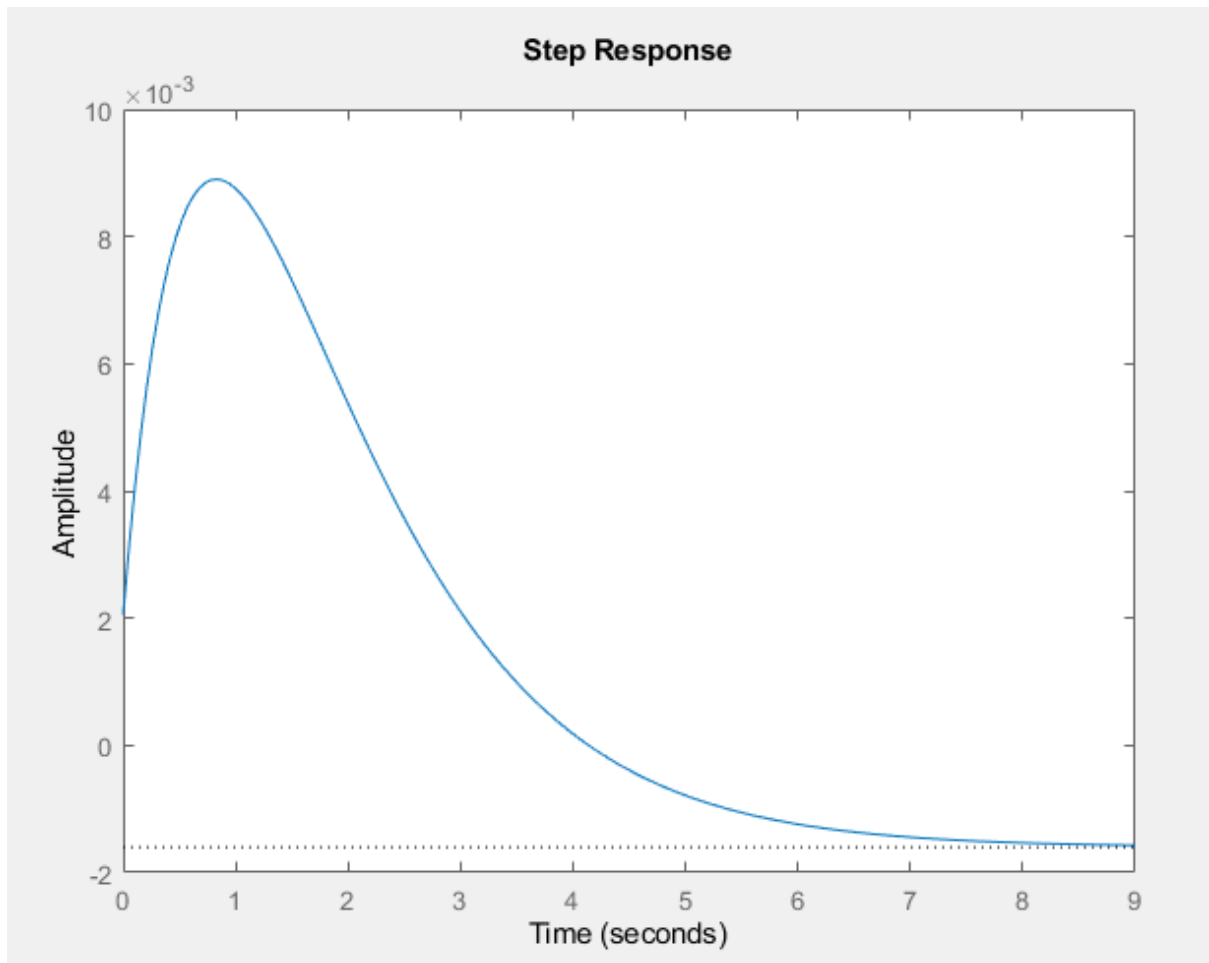
$$8.4 s^2 + 61.2 s - 4$$

$$H(s) = \frac{\text{-----}}{s^4 + 47 s^3 + 2800 s^2 + 5000 s + 2500}$$

με την παρακάτω βηματική απόκριση



Εικόνα 5.1: Βηματική απόκριση H(s)



Εικόνα 5.2: Βηματική απόκριση H2(s)

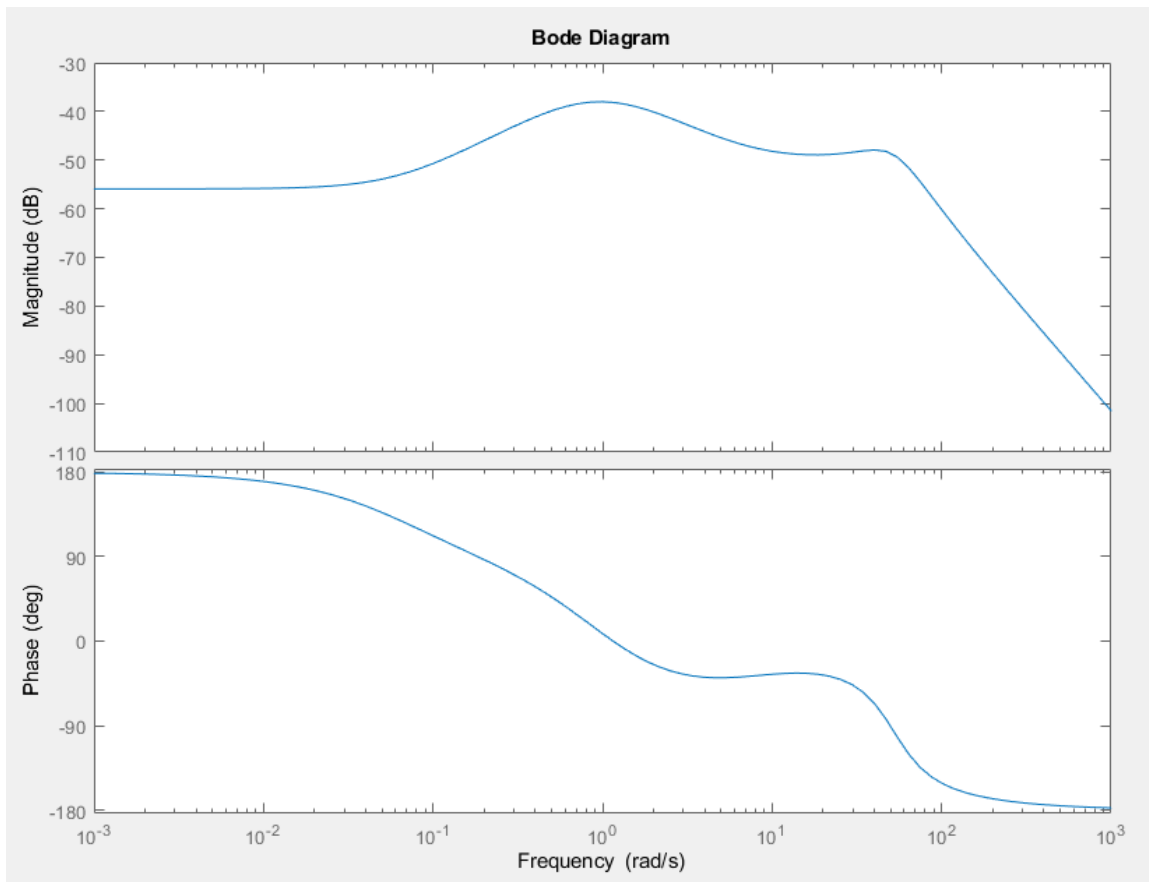
H2 = balred(H, 2)

H2 =

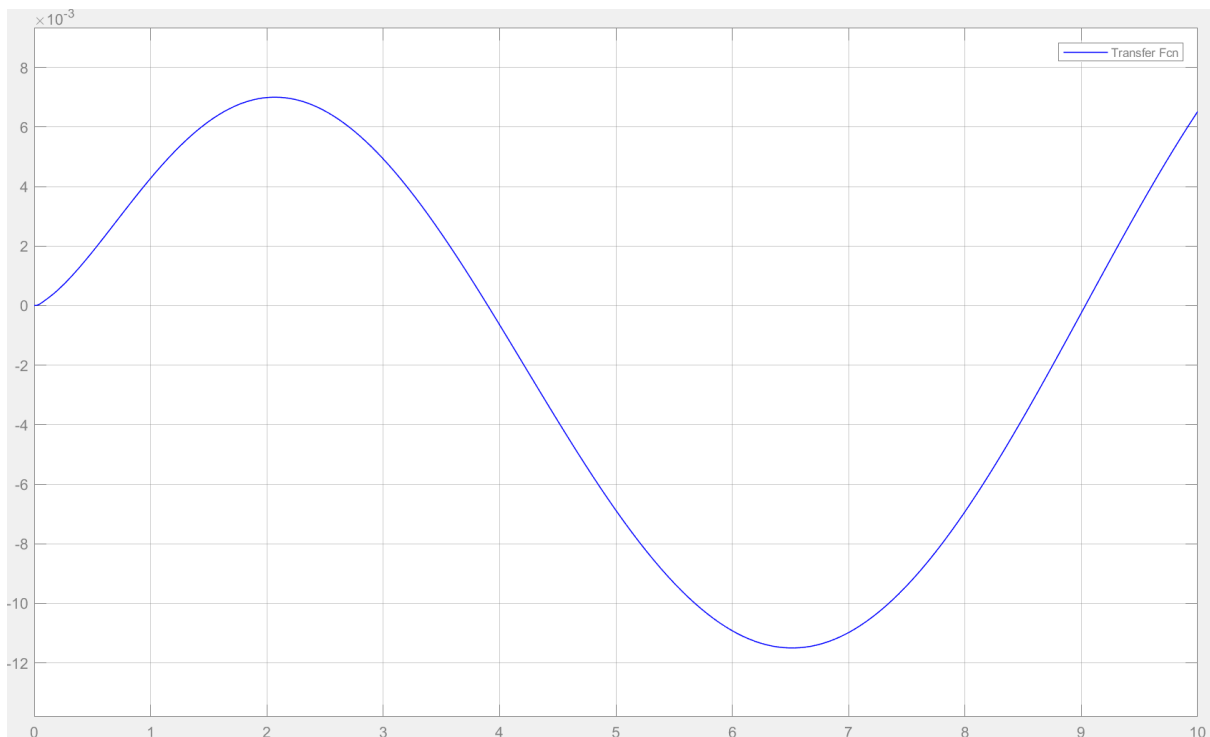
$$0.002053 s^2 + 0.02588 s - 0.001682$$

$$s^2 + 2.075 s + 1.051$$

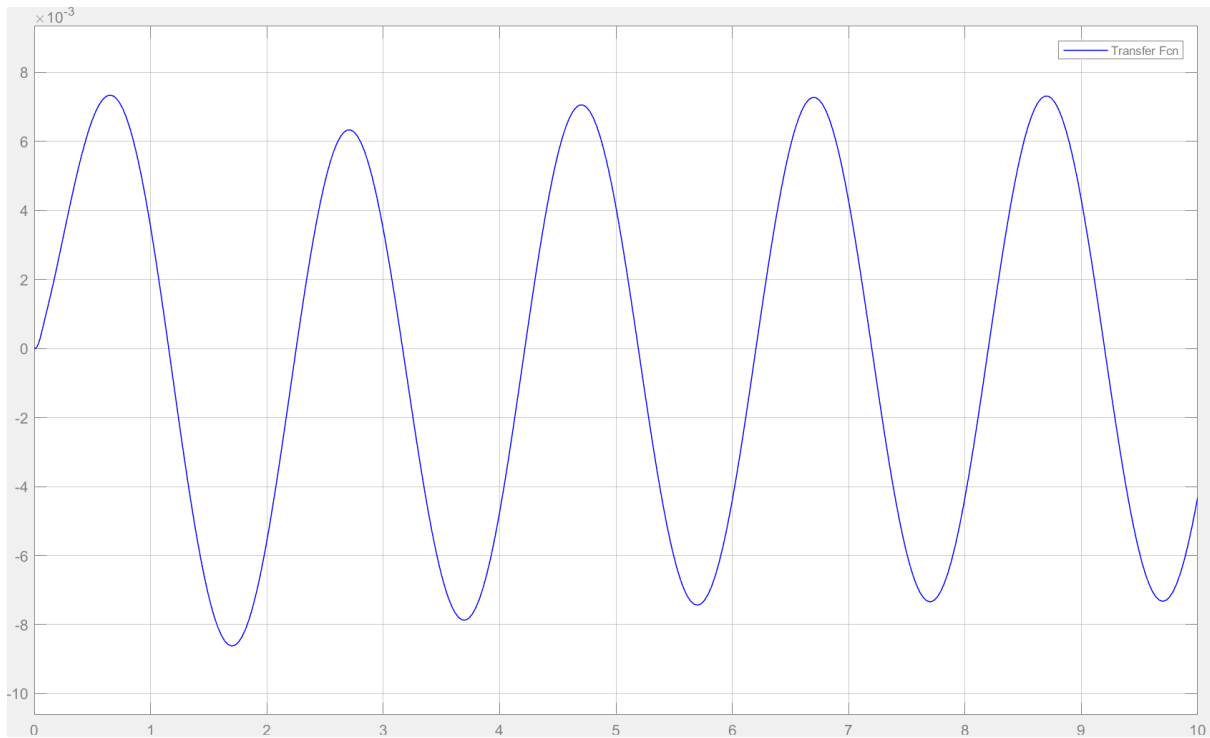
Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται η απλοποιημένη μέσω της συνάρτησης balred 2^{ης} τάξης συνάρτηση μεταφοράς.



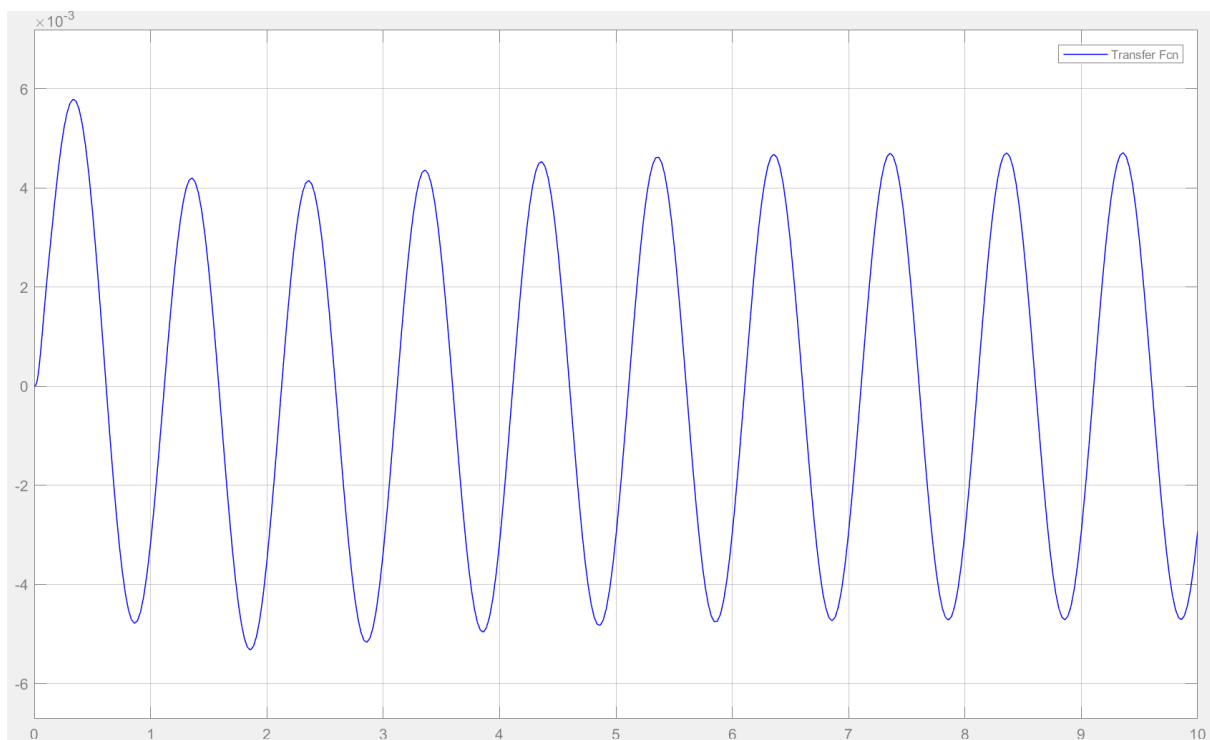
Εικόνα 5.3: Bode Διάγραμμα H(s)



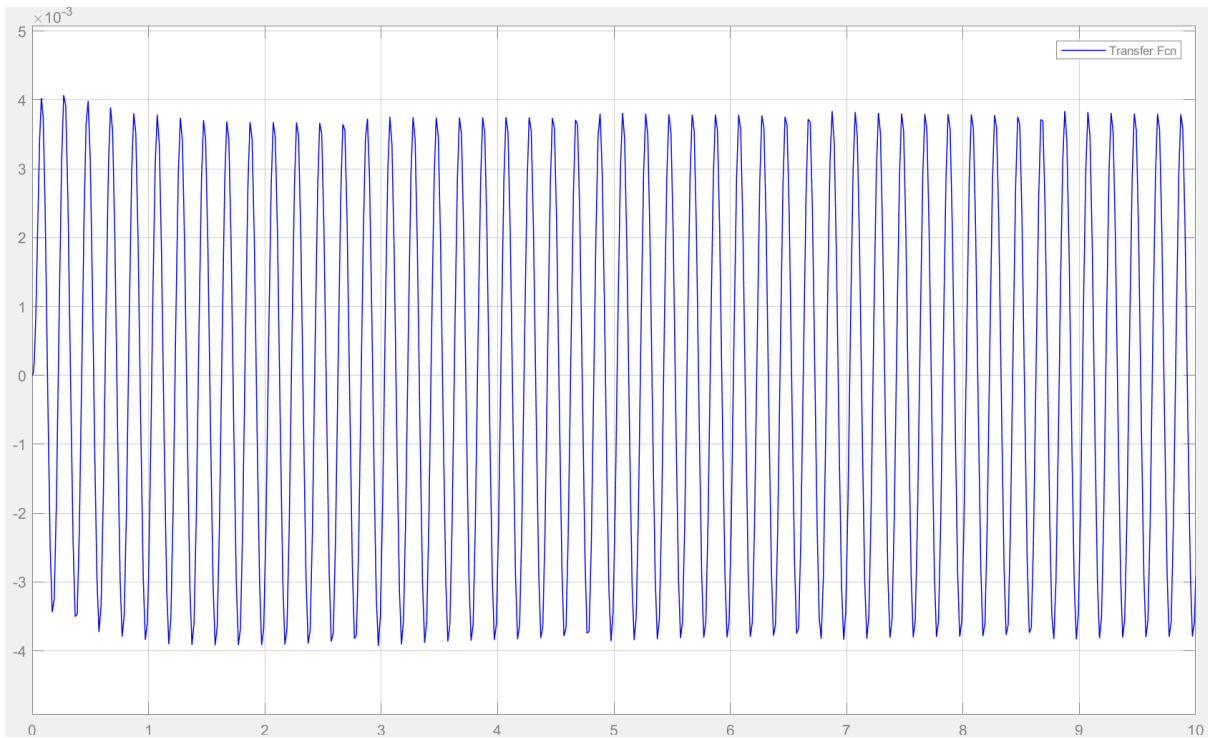
Εικόνα 5.4: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 0.1Hz



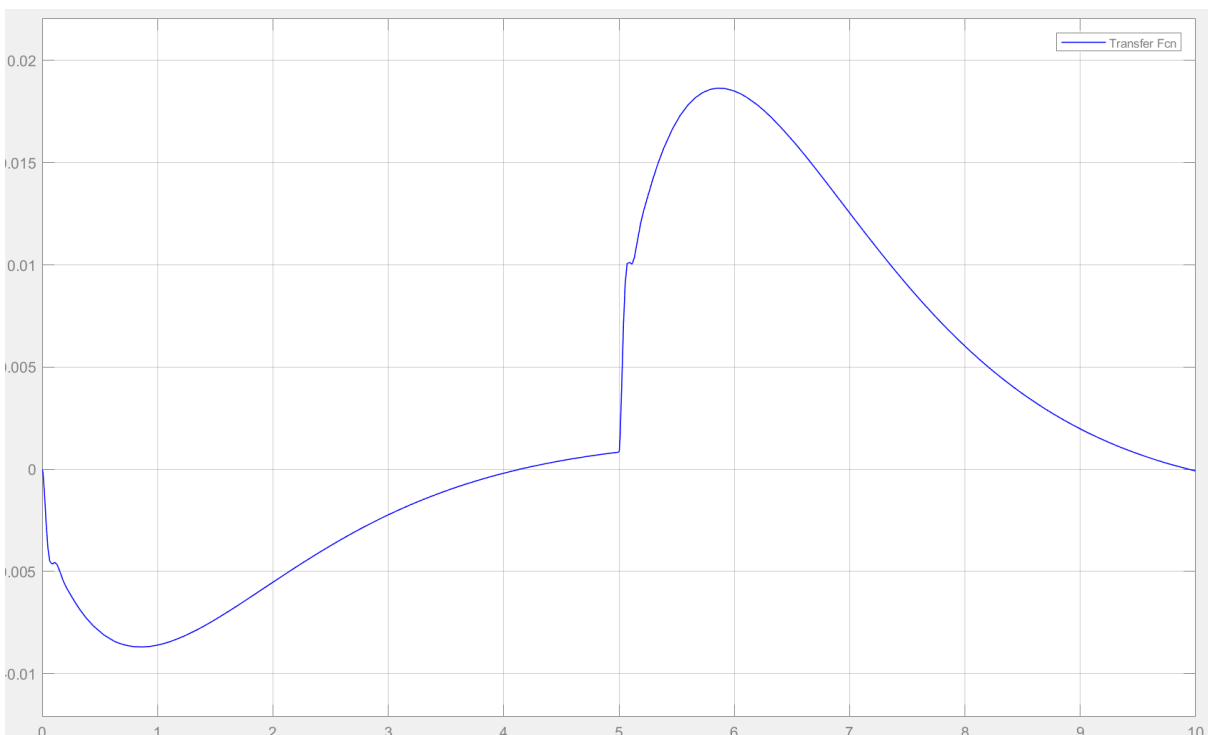
Εικόνα 5.5: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 0.5Hz



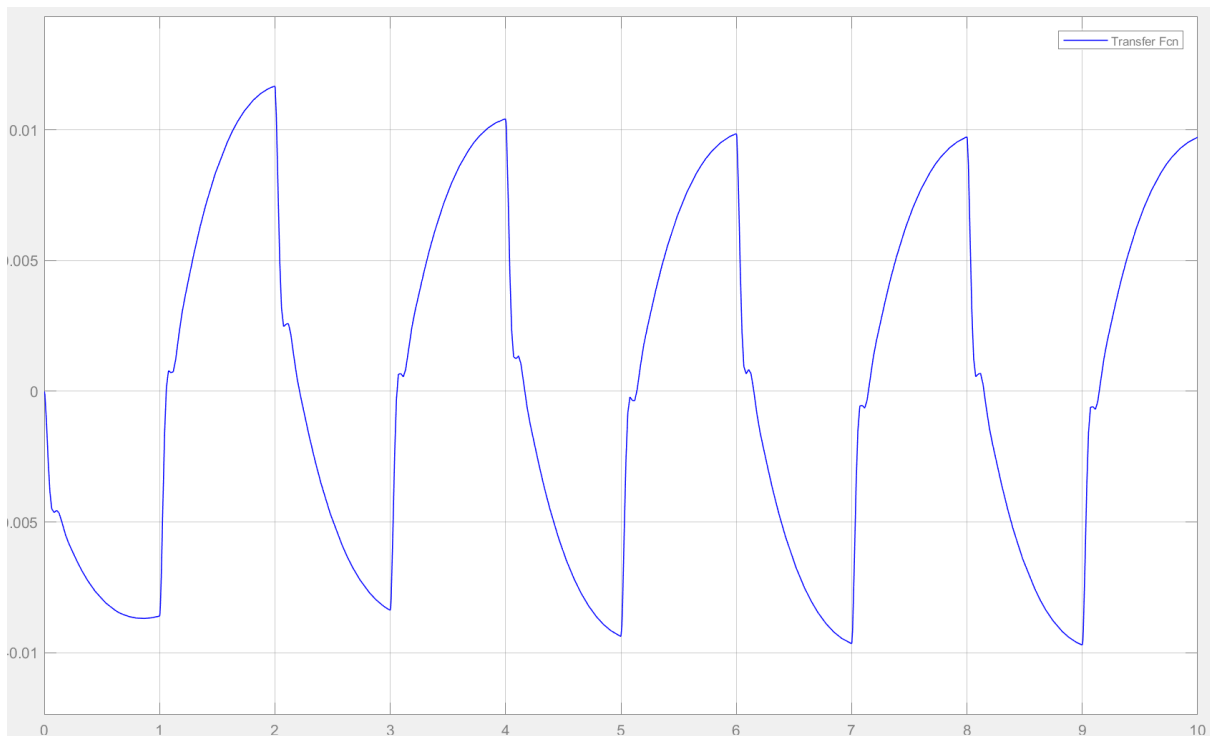
Εικόνα 5.6: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 1Hz



Εικόνα 5.7: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τάση εισόδου sinus με πλάτος 2V και συχνότητα 5Hz



Εικόνα 5.8: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τετραγωνική τάση εισόδου με πλάτος 2V και συχνότητα 0.1Hz



Εικόνα 5.9: Μετατόπιση ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τετραγωνική τάση εισόδου με πλάτος 2V και συχνότητα 0.5Hz

Στις Εικόνες 5.4-5.7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μετατόπισης ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται ημιτονοειδής τάση εισόδου με πλάτος 2V και διάφορες συχνότητες.

Στις Εικόνες 5.8-5.9 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μετατόπισης ελεύθερου άκρου IPMC όταν εφαρμόζεται τετραγωνική τάση εισόδου με πλάτος 2V και διάφορες συχνότητες.

Καθώς εφαρμόζεται ημιτονοειδής τάση στα άκρα του IPMC το υλικό μπορεί να κάμπτεται με μορφή ημιτόνου σταθερής συχνότητας ενώ με τετραγωνική είσοδο παρουσιάζει σταθερή συχνότητα αλλά διαφορετική μορφή στην μετατόπιση του ελευθέρου άκρου του.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Το IPMC γίνεται όλο και πιο δημοφιλές υλικό μεταξύ μελετητών, μηχανικών και επιστημόνων λόγω της εγγενούς του ιδιότητας της χαμηλής τάσης ενεργοποίησης, της μεγάλης κάμψης, δηλαδή της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια και των ιδιοτήτων που πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως αμφίδρομο υλικό, δηλ. χρησιμοποιούνται ως ενεργοποιητές και αισθητήρες. Μεταξύ της ποικιλίας των ηλεκτροενεργών πολυμερών (EAPs), τα πρόσφατα αναπτυγμένα IPMC είναι καλοί υποψήφιοι για χρήση σε εφαρμογές που σχετίζονται με το βιολογικό, λόγω της βιοσυμβατότητάς τους. Ωστόσο, η πρόκληση βρίσκεται στον έλεγχο αυτού του περίπλοκου υλικού καθώς οι μηχανικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους στο ιοντικό πολυμερές. Έχουν αναφερθεί αρκετές διαδικασίες κατασκευής IPMC, μελέτες για τα μηχανικά χαρακτηριστικά και την απόδοσή τους, πλήθος πρόσφατων εφαρμογών IPMC και σχετικές μαθηματικές μοντελοποιήσεις. Οι εφαρμογές του IPMC αυξάνονται και πρόσφατα έχουν πραγματοποιηθεί πιο εξελιγμένες εφαρμογές ενεργοποιητών IPMC. Αυτό δείχνει ότι οι ενεργοποιητές IPMC έχουν δυνατότητα για καλύτερες εφαρμογές ελέγχου.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη έξυπνων υλικών, οι βασικές αρχές τους και οι εφαρμογές τους εστιάζοντας στην κατηγορία των πολυμερών IPMC. Περιγράφηκαν οι υποκατηγορίες τους και τα ισοδύναμα μοντέλα τους. Σχεδιάστηκε σε ειδικό πρόγραμμα COMSOL το μοντέλο του IPMC χρησιμοποιώντας φυσικές παραμέτρους. Χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα και μέσω της συνάρτησης μεταφοράς του ενεργοποιητή IPMC με τη βοήθεια εργαλείων της Matlab έχουν εξαχθεί σημαντικά χαρακτηριστικά τους.

Μελετήθηκαν διάφοροι μέθοδοι και συναρτήσεις της Matlab. Ξεκινώντας από μια απλή βηματική απόκριση ενός IPMC υλικού παράχθηκαν συναρτήσεις μεταφοράς 4^{ης} τάξης. Η τάξη του μοντέλου είναι ικανοποιητική και όσο ανεβαίνει η τάξη τόσο καλύτερη προσέγγιση γίνεται αλλά είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα ελέγχου και στους μικροελεγκτές. Εφόσον το IPMC έχει χαρακτηριστικά μιας δοκού μπορεί να προσεγγιστεί καλύτερα με μια 4^{ης} τάξης συνάρτηση μεταφοράς. Στη συνέχεια μελετήθηκε η μείωση σε τάξη 2^η.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Rogers C A, Liang C and Barker D K 1988 Dynamic control concept using shape memory alloy reinforced plates US Army Research Office Workshop on Smart Materials, Structures and Mathematical Issues (VPI & SU, VA, 15-16 September 1988)
- [2] Kamila, S. (2013). Introduction, Classification and Applications of Smart Materials: An Overview. American Journal of Applied Sciences, 10(8), 876-880. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2013.876.880>
- [3] G. Akhras, 'Smart materials and smart systems for the future', Canadian Military Journal, 1(3), 25–31
- [4] H. Fujita, 'Future of actuators and microsystems', Sensors and Actuators, A56, 105–111 (1996).
- [5] S. H. Fujita, 'Microactuators and micromachines', Proceedings of the IEEE, 86, 1721–1732 (1998)
- [6] S. Fatikow and U. Rembold, Microsystem Technology and Microrobotics, Springer-Verlag, Berlin, Germany (1997)
- [7] "Bar-Cohen, Yoseph: "Artificial Muscles using Electroactive Polymers (EAP): Capabilities, Challenges and Potential".
- [8] Wang, T.; Farajollahi, M.; Choi, Y.S.; Lin, I.T.; Marshall, J.E.; Thompson, N.M.; Kar-Narayan, S.; Madden, J.D.W.; Smoukov, S.K. (2016). "Electroactive polymers for sensing". Interface Focus. 6 (4): 1–19. doi:10.1098/rsfs.2016.0026. PMC 4918837. PMID 27499846.
- [9] V.K.Varadan and V.V. Varadan, 'Microsensors, actuators, MEMS and electronics for smart structures', in Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, Vol. 2, Micromachining and Microfabrication, P. Rai-Choudhury (Ed.), SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, USA, pp. 617–688 (1997)
- [10] Vijay K. Varadan, K. J. Vinoy, S. Gopalakrishnan Smart Material Systems and MEMS: Design and Development Methodologies
- [11] Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs) Set, Editor: Mohsen Shahinpoor, Royal Society of Chemistry, Cambridge 2016, <https://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-1-78262-720-3>
- [12] Keplinger, Christoph; Kaltenbrunner, Martin; Arnold, Nikita; Bauer, Siegfried (2010-03-09). "Röntgen's electrode-free elastomer actuators without electromechanical pull-in instability". Proceedings of the National Academy of Sciences. 107 (10): 4505–4510.
- [13] H. Tamagawa, K. Okada, T. Mulembo, M. Sasaki, K. Naito, G. Nagai, T. Nitta, K.C. Yew, K. Ikeda, Simultaneous enhancement of bending and blocking force of an ionic polymer-

- metal composite (IPMC) by the active use of its material characteristics change. *Actuators* 8, 29 (2019)
- [14] L. Yang, D. Zhang, X. Zhang, A. Tian, X. Wang, Models of displacement and blocking force of ionic-polymer metal composites based on actuation mechanism. *Appl. Phys. A* 126, 365 (2020)
- [15] A. Khan, R.K. Inamuddin, M. Jain, A.M.Asiri Luqman, Development of sulfonated poly(vinyl alcohol)/aluminium oxide/graphene based ionic polymer-metal composite (IPMC) actuator. *Sensor. Actuat. A Phys.* 280, 114–124 (2018)
- [16] L. Yang, D.S. Zhang, X.N. Zhang, A.F. Tian, Fabrication and actuation of Cu-ionic polymer metal composite. *Polymers* 12, 460 (2020)
- [17] <https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/37602/05-1898.pdf>
- [18] Nikolaidis, A., Labuza, T.P. Use of dynamic mechanical thermal analysis (DMTA). *Journal of Thermal Analysis* 47, 1315–1328 (1996). <https://doi.org/10.1007/BF01992830>
- [19] Brown, M. E. (2001-12-31). *Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications*. Springer. ISBN 9781402004728.
- [20] <https://library.ndsu.edu/ir/bitstream/handle/10365/27251/Modeling%20and%20Optimal%20Control%20of%20Curvatures%20in%20IPMC%27s.pdf>
- [21] Y. Bar-Cohen, T. Xue, M. Shahinpoor, J. O. Simpson, and J. Smith, “Flexible, low mass robotic arm actuated by electroactive polymers and operated equivalently to human arm and hand,” in *Proceedings of ASCE Robotics* 98, pp. 15-21, April 1998.
- [22] Eamex, “Fish Robot,” EAP in action session, SPIE International Conference on Smart Materials and Structures, March 2003.
- [23] Xiao, Yu and Bhattacharya, Kaushik, “Modeling electromechanical properties of ionic polymers,” *Proceedings of the SPIE*, Vol. 4329, pp. 292-300, 2001.
- [24] R. Kanno, A. Kurata, M. Hattori, S. Tadokoro, T. Takamori, and K. Oguro, “Characteristics and modeling of ICPF actuator,” *Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, vol. 2, pp. 691–698, July 1994
- [25] S. Tadokoro, S. Yamagami, T. Takamori, and K. Oguro, “Modeling of Nafion-Pt composite actuators (ICPF) by ionic motion,” *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials*, vol. 3987, pp. 92–102, March 2000.
- [26] P. J. Costa Branco and J. A. Dente, “Derivation of a continuum model and its electric equivalent-circuit representation for ionic polymer–metal composite (IPMC) electromechanics,” *Smart Materials and Structures*, vol.15, no.2, pp.378, 2006.
- [27] <https://www.comsol.com/>