



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ**  
**ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

**Φοιτητής**

Ζαφειράτος Ανδρέας

**Επιβλέπων Καθηγητής**

Σταυρουλάκης Γεώργιος

Χανιά 2017



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή πραγματοποιείται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση του πεδίου που αφορά τη συλλογή ενέργειας από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Στην πρώτη ενότητα, εισάγονται τα βασικά στοιχεία θεωρίας που διέπουν τη λειτουργία μιας πιεζοηλεκτρικής μικρογεννήτριας. Εκτός αυτής, παρουσιάζεται η θεωρία του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, καθώς και τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του πιεζοηλεκτρικού υλικού (ZnO) που χρησιμοποιήθηκε στις μικρογεννήτριες. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στα διάφορα φαινόμενα μάζευσης ενέργειας μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Δίνονται οι βασικές αρχές λειτουργίας τους και αναδεικνύεται η χρησιμότητά τους. Τέλος, δίνεται έμφαση στις πιεζοηλεκτρικές επιδράσεις υλικών και στις εφαρμογές που βρίσκουν αυτές σε διάφορους τομείς όπως οι μεταφορές, οι κατασκευές και τα σπορ.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	1
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΙΕΖΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ...	7
Τανυστές και ελαστικότητα υλικών .....	7
Ο τανυστής τάσης (stress tensor).....	7
Ο τανυστής παραμόρφωσης (strain tensor) .....	7
Ελαστικότητα .....	9
Ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου .....	12
Εκτροπή αιωρούμενης προβόλου .....	12
Φυσική συχνότητα ταλάντωσης αιωρούμενης προβόλου .....	14
Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο .....	21
Βασικές εξισώσεις .....	22
Κρυσταλλική δομή ZnO.....	24
Τεχνικές ανάπτυξης και εναπόθεσης ZnO.....	25
Πιεζοηλεκτρισμός σε νανοδομές.....	26
Μικροηλεκτρομηχανικοί (MEMS) πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας τύπου αιωρούμενης προβόλου.....	28
Σύνθετοι πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΑΣΤΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	36
Μικρής κλίμακας μάστευση ενέργειας από τον άνεμο .....	37
Μικρής κλίμακας μάστευση ενέργειας από τη βροχή.....	43
Ενέργεια από “έξυπνους δρόμους” .....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΛΑΔΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ .....	48
Πιεζοηλεκτρικές επιδράσεις υλικών .....	48
Μεταφορές .....	50
Αεροπλοΐα.....	50
Αυτοκινητοβιομηχανία .....	59
Ναυσιπλοΐα.....	61
Σιδηρόδρομος .....	62
Εμπόδια ως προς την εκμετάλλευση .....	62
Κατασκευές .....	63

Εποπτεία ποιότητας κατασκευών .....	64
Έλεγχος Δονήσεων .....	65
Περιβαλλοντολογικός έλεγχος .....	66
Οδηγοί και εμπόδια .....	67
Σπορ και αναψυχή .....	69
Οδηγοί της αγοράς.....	71
Εμπόδια για την εκμετάλλευση .....	71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	74

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

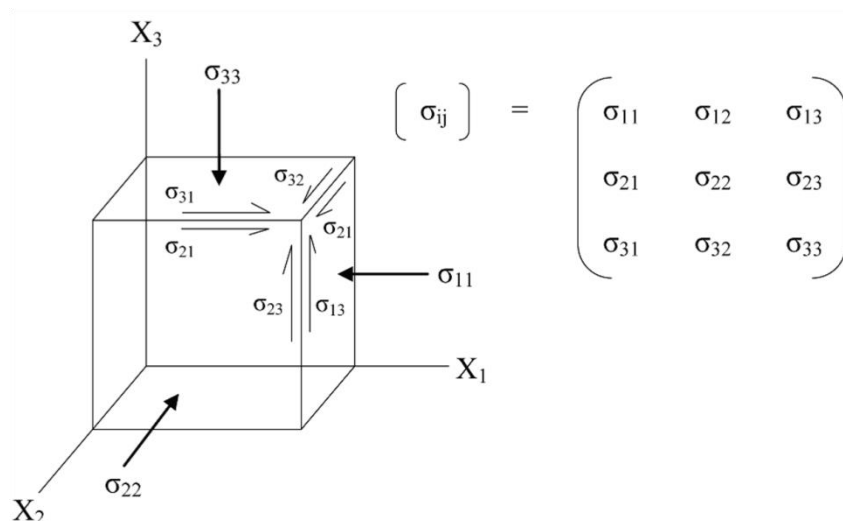
Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση των συντελεστών του τανυστή τάσης σε έναν κύβο	7
Εικόνα 2: Βοηθητικά σχήματα για την επεξήγηση του τανυστή παραμόρφωσης.....	8
Εικόνα 3: Εκτροπή προβόλου υπό την επίδραση φορτίου στην άκρη.....	12
Εικόνα 4- Σταθερές για την ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου .....	17
Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση διμορφικής προβόλου με και χωρίς μάζα αδράνειας .....	19
Εικόνα 6: Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε κρύσταλλο χαλαζία .....	21
Εικόνα 7: Οι τρεις κρυσταλλικές δομές του ZnO: (a) rocksalt (κυβική συμμετρία), (b) Zinc blende (κυβική συμμετρία) και (c) wurtzite (εξαγωνική συμμετρία).....	24
Εικόνα 8: Δομή wurtzite του ZnO και οι παράμετροι πλέγματος a,c .....	25
Εικόνα 9: Διάγραμμα που δείχνει τη σύζευξη μεταξύ του πιεζοηλεκτρισμού, της φωτονικής διέγερσης και των ημιαγωγών, καθώς και πιθανές εφαρμογές του κλάδου. ....	27
Εικόνα 10: Φωτογραφίες συλλέκτη ενέργειας από SEM: (a) μπροστά πλευρά, (b) πίσω πλευρά.....	29
Εικόνα 11: Σχέδιο συλλέκτη ενέργειας .....	29
Εικόνα 12: Κατασκευασμένες γεννήτριες .....	30
Εικόνα 13: 3D μοντέλο πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας - ZnO .....	31
Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση των 2 συσκευών και φωτογραφία μετά την κατασκευή τους.....	32
Εικόνα 15: α) Σχηματική απεικόνιση συλλέκτη ενέργειας, β) Κατασκευασμένη γεννήτρια.....	34
Εικόνα 16: Μικρογεννήτρια με 5 προβόλους και κοινή μάζα αδράνειας.....	35
Εικόνα 17- Πιεζοηλεκτρική Ανεμογεννήτρια .....	42
Εικόνα 18- Συσκευή ενέργειας βροχής.....	43
Εικόνα 19- Πλάκες πίεσεως.....	46
Εικόνα 20- Βαρυτικές δυνάμεις σε πλάκα πίεσεως .....	47
Εικόνα 21- Προσωπικά αεροσκάφη .....	54
Εικόνα 22- Σύλληψη ενός καλλιτέχνη.....	55
Εικόνα 23- Εύκαμπτη ταινία που περιέχει πιεζοηλεκτρικό υλικό .....	57
Εικόνα 24- Γέφυρα Jubilee στο Λονδίνο .....	66
Εικόνα 25- Οι οδηγοί της τεχνολογίας στον κλάδο των κατασκευών.....	68
Εικόνα 26- Ρακέτα του τέννις.....	70

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΙΕΖΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Τανυστές και ελαστικότητα υλικών

### Ο τανυστής τάσης (stress tensor)

Ο τανυστής είναι μία πολυδιάστατη παράταξη αριθμών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της φυσικής κατάσταση ή των ιδιοτήτων ενός υλικού. Η τάση ορίζεται ως δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Αν πάρουμε έναν κύβο ενός υλικού και το υποβάλουμε σε ένα τυχαίο φορτίο, μπορούμε να μετρήσουμε τις τάσεις που δημιουργούνται στις διάφορες κατευθύνσεις. Οι μετρήσεις αυτές εκφράζονται μέσω ενός τανυστή 2<sup>ας</sup> τάξης, τον τανυστή τάσης. (serc.carleton.edu)

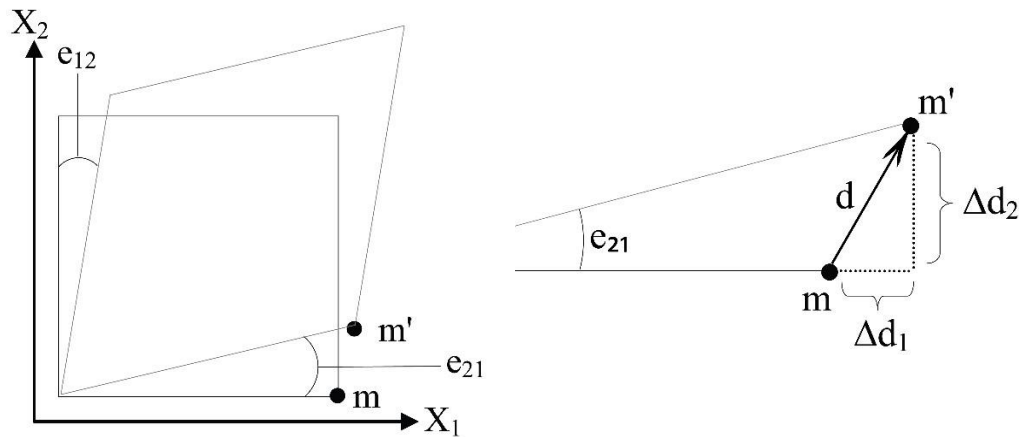


Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση των συντελεστών του τανυστή τάσης σε έναν κύβο

Μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες του τανυστή τάσης είναι ότι είναι συμμετρικός, δηλαδή  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$

### Ο τανυστής παραμόρφωσης (strain tensor)

Η παραμόρφωση ορίζεται ως η σχετική μετατόπιση της θέσης των σημείων που βρίσκονται μέσα σε ένα σώμα, το οποίο έχει υποβληθεί σε παραμόρφωση. Το κλασσικό παράδειγμα δύο διαστάσεων είναι αυτό ενός τετραγώνου το οποίο έχει παραμορφωθεί σε παραλληλόγραμμο.



Εικόνα 2: Βοηθητικά σχήματα για την επεξήγηση του τανυστή παραμόρφωσης

Ας εξετάσουμε την κίνηση ενός σημείου που βρίσκεται στη γωνία του τετραγώνου (m) και μετατοπίζεται στη θέση (m'). Για να έχει αποτέλεσμα η συγκεκριμένη ανάλυση θεωρούμε μόνο τις απειροελάχιστα μικρές παραμορφώσεις. Ονομάζουμε το αρχικό πλάτος της πλευράς του τετραγώνου  $X_1$ . Επίσης η συνιστώσα της μετατόπισης (d) του m στο m' στον  $X_1$  άξονα  $\Delta d_1$ , ενώ τη συνιστώσα του d στον  $X_2$  άξονα  $\Delta d_2$ . Ένας απλός τρόπος να μετρηθεί η παραμόρφωση είναι να συγκριθούν τα μεγέθη  $\Delta d_1 - X_1$ ,  $\Delta d_2 - X_1$ , κλπ. Αυτή η ποσότητα μπορεί να απεικονιστεί ως  $e_{11}$ . (serc.carleton.edu)

$$\lim_{\Delta X \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta d_1}{\Delta X_1} \right) = \left( \frac{\partial d_1}{\partial X_1} \right) = e_{11}$$

ή στη γενικότερη μορφή της

$$\lim_{\Delta X \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta d_i}{\Delta X_j} \right) = \left( \frac{\partial d_i}{\partial X_j} \right) = e_{ij}$$

Από τη στιγμή που η  $\Delta d_2$  είναι πολύ μικρή, ισχύει

$$\frac{\Delta d_2}{\Delta X_1} \approx \frac{\Delta d_2}{\Delta X_1 + \Delta d_1} = \tan \theta$$

Για πολύ μικρές γωνίες ισχύει ότι  $\tan \theta = \theta$  με αποτέλεσμα  $e_{21} = \theta$ . Αν τώρα αντί για παραμόρφωση του αρχικού τετραγώνου είχαμε περιστροφή γύρω από τον κύριο



άξονά του τότε οι τιμές  $e_{ij}$ , με  $i \neq j$ , θα ήταν πάλι μη μηδενικές. Γι' αυτό το λόγο, η παραμόρφωση χαρακτηρίζεται από τον τανυστή  $\varepsilon_{ij}$ , όπου έχει αφαιρεθεί η άκαμπτη περιστροφή του σώματος. Επομένως μπορούμε να γράψουμε:

$$\varepsilon_{ij} = e_{ij} - \tilde{\omega}_{ij}$$

Όπου  $\tilde{\omega}_{ij}$  είναι η περιστροφή του σώματος, χωρίς παραμόρφωση και  $e_{ij}$  ο τανυστής παραμόρφωσης.

$$\varepsilon_{ij} = 1/2(e_{ij} + e_{ji})$$

$$\tilde{\omega}_{ij} = 1/2(e_{ij} - e_{ji})$$

Για την περίπτωση των δύο διαστάσεων ισχύει:

$$\begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & \frac{1}{2}(e_{12} + e_{21}) \\ \frac{1}{2}(e_{21} + e_{12}) & e_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{2}(e_{12} - e_{21}) \\ \frac{1}{2}(e_{21} - e_{12}) & 0 \end{pmatrix}$$

(serc.carleton.edu)

## Ελαστικότητα

Σε αντίθεση με την τάση και την παραμόρφωση, η ελαστικότητα αποτελεί εγγενή ιδιότητα ενός υλικού. Η ελαστικότητα είναι η ιδιότητα της “αντιστρεπτής παραμόρφωσης”. Αν η παραμόρφωση ενός σώματος, που βρίσκεται υπό μηχανική τάση, δεν υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο που ονομάζεται όριο ελαστικότητας, το σώμα θα επιστρέψει στην αρχική του μορφή όταν αφαιρεθεί η τάση που του ασκείται. Αν η τιμή της τάσης ( $\sigma$ ) είναι μικρή, τότε η τιμή της παραμόρφωσης ( $\varepsilon$ ) είναι γραμμικώς ανάλογη της τάσης και μπορεί να γραφτεί ως:

$$\varepsilon = s\sigma \quad (2.1)$$

όπου  $s$  είναι η σταθερά ελαστικότητας. Για να συσχετιστούν δύο τανυστές 2<sup>ης</sup> τάξης, χρειάζεται ένας τανυστής 4<sup>ης</sup> τάξης.

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl}\sigma_{kl}$$

Για να υπολογιστεί ο  $\varepsilon_{ij}$  ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ξεκινούσαμε ως εξής:

$$\varepsilon_{11} = s_{1111}\sigma_{11} + s_{1112}\sigma_{12} + \dots + s_{1132}\sigma_{32} + s_{1133}\sigma_{33}$$

Για την περίπτωση του τρισδιάστατου αντικειμένου υπάρχουν 81 στοιχεία σε ένα τανυστή 4<sup>ης</sup> τάξης. Όμως και οι δύο οι τανυστές τάσης και παραμόρφωσης είναι συμμετρικοί με αποτέλεσμα ο καθένας να έχει μόνο 6 διαφορετικά στοιχεία. Χρειάζονται επομένως μόνο 6 εξισώσεις για να υπολογιστεί ο  $\varepsilon_{ij}$  από τον  $\sigma_{ij}$  και σε κάθε εξίσωση θα υπάρχουν 6 ανεξάρτητοι όροι. Άρα, δεν μπορεί να υπάρχουν παρά πάνω από 36 ανεξάρτητες τιμές στην  $s_{ijkl}$ . Αν το υλικό που πρόκειται να παραμορφωθεί είναι ισοτροπικό, δηλαδή το υλικό που συμπεριφέρεται το ίδιο προς όλες τις κατευθύνσεις, χρειάζονται μόνο 2 τιμές. Αυτές είναι το μέτρο του Young (Young's Modulus E) και το μέτρο διάτμησης (Shear Modulus G). Όλοι οι συντελεστές μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει αυτών ως εξής:

$$s_{11} = \frac{1}{E}$$

$$2(s_{11} - s_{12}) = \frac{1}{G}$$

ή εναλλακτικά

$$s_{12} = \frac{\nu}{E}$$

όπου  $\nu$  είναι ο λόγος Poisson

$$\nu = \left(\frac{E}{2G}\right) - 1 \quad (2.2)$$

Επομένως, για ένα ισοτροπικό υλικό ισχύει:

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{1}{E}\right)(\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3))$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{1}{E}\right)(\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3))$$

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{1}{E}\right)(\sigma_3 - \nu(\sigma_2 + \sigma_1))$$

$$\varepsilon_4 = \left(\frac{1}{G}\right)\sigma_4$$

$$\varepsilon_5 = \left(\frac{1}{G}\right)\sigma_5$$

$$\varepsilon_6 = \left(\frac{1}{G}\right)\sigma_6$$

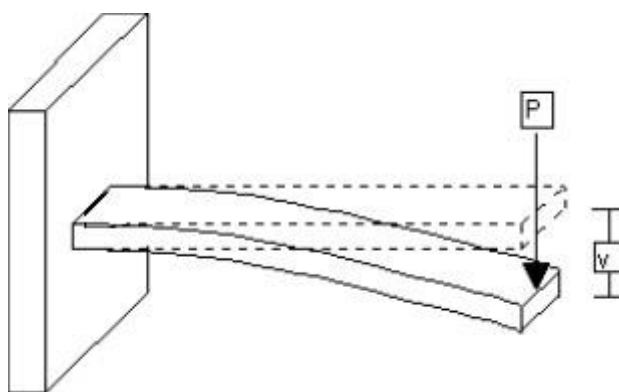
(serc.carleton.edu)

## Ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου

Μία οριζόντια πρόβολος υπό την επίδραση μιας κάθετης δύναμης θα παραμορφωθεί σε σχήμα καμπύλης. Όταν η δύναμη αφαιρεθεί, η πρόβολος θα τείνει να επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση. Όμως εξαιτίας της αδράνειας θα συνεχίσει να βρίσκεται σε κίνηση και η πρόβολος θα ταλαντώνεται στις φυσικές της συχνότητες. (Whitney, 1999, Νιάρχος, 2013)

## Εκτροπή αιωρούμενης προβόλου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αν το ελεύθερο άκρο μιας αιωρούμενης προβόλου υποβληθεί σε σημειακό φορτίο  $P$ , η πρόβολος θα εκτραπεί σε σχήμα καμπύλης. Όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μετατόπιση,  $y(x)$ .



Εικόνα 3: Εκτροπή προβόλου υπό την επίδραση φορτίου στην άκρη

Αν υποθέσουμε ότι η πρόβολος υφίσταται μικρές παραμορφώσεις, βρίσκεται στη γραμμική ελαστική περιοχή και έχει ομοιόμορφη διατομή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες εξισώσεις. (Νιάρχος, 2013)

Η καμπυλότητα της προβόλου,  $k$ , ισούται με τη δεύτερη παράγωγο της μετατόπισης.

$$k = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Η καμπυλότητα μπορεί επίσης να συσχετιστεί με τη ροπή κάμψης (bending moment),  $M$ , και τη καμπτική δυσκαμψία (flexural rigidity),  $EI$

$$k = \frac{M}{EI}$$

όπου με  $E$  συμβολίζεται το μέτρο ελαστικότητας της προβόλου και με  $I$  η ροπή αδράνειας. Η ροπή κάμψης μπορεί να συσχετιστεί με τη διατμητική δύναμη,  $V$ , και το πλευρικό φορτίο,  $q$ , πάνω στην πρόβολο. Επομένως ισχύει ότι

$$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} V = EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} q = -EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (2.3a, 2.3b, 2.3c)$$

Για το φορτίο της Εικόνας 2.3, το κατανεμημένο φορτίο, η διατμητική δύναμη και η ροπή κάμψης είναι αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} q(x) &= 0 \\ V(x) &= P \\ M(x) &= -PL \left(1 - \frac{x}{L}\right) \end{aligned}$$

Η λύση της (2.3a) είναι επομένως

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x} &= \int_{x=0}^x M(x) dx = -\frac{PL}{EI} \left(x - \frac{x^2}{2L}\right) \\ y(x) &= \int_{x=0}^x \frac{\partial v}{\partial x} dx = -\frac{PL}{EI} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6L}\right) \end{aligned}$$

Με τη μετατόπιση στο ελεύθερο άκρο της προβόλου να ισούται με:

$$y(L) = -\frac{PL^3}{3EI} \quad (2.4)$$

(Νιάρχος, 2013)

## Φυσική συχνότητα ταλάντωσης αιωρούμενης προβόλου

Αν υποθέσουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας, η αδράνεια και το πάχος είναι σταθερά κατά μήκος της προβόλου, η εξίσωση που περιγράφει τη ταλάντωση είναι

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} = -\rho \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

όπου  $\rho$  είναι η μάζα ανά μονάδα μήκους (ή γραμμική πυκνότητα μάζας) της προβόλου. Ο καλύτερος τρόπος για να λυθεί η εξίσωση (2.5) είναι με τη χρήση της μεθόδου χωριζομένων μεταβλητών. Ας υποθέσουμε ότι η μετατόπιση μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη, με το ένα να εξαρτάται από τη θέση και το άλλο από το χρόνο.

$$y(x, t) = X(x)T(t) \quad (2.6)$$

όπου η συνάρτηση  $X$  είναι ανεξάρτητη του χρόνου και η  $T$  ανεξάρτητη της θέσης. Η εξίσωση (2.5) παίρνει τη μορφή

$$EI \frac{\partial^4 (X(x)T(t))}{\partial x^4} = -\rho \frac{\partial^2 (X(x)T(t))}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Διαιρώντας την (2.7) με  $\rho X(x)T(t)$  παίρνουμε

$$\frac{EI}{\rho X(x)} \frac{\partial^4 X(x)}{\partial x^4} = -\frac{1}{T(t)} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Από τη στιγμή που το αριστερό μέλος της εξίσωσης (2.8) δεν αλλάζει με τη μεταβολή του  $t$ , το δεξί μέλος πρέπει να είναι σταθερό. Με ανάλογο τρόπο, καθώς το δεξί μέλος της (2.8) δεν αλλάζει με τη μεταβολή του  $x$ , το αριστερό μέλος πρέπει να είναι σταθερό. Επειδή και τα δύο μέλη είναι σταθερά, η εξίσωση (2.6) είναι έγκυρη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος χωριζομένων μεταβλητών. Ας συμβολίσουμε αυτή τη σταθερά ως  $\omega_n^2$ . Θα δείξουμε ότι το  $\omega_n^2$  είναι ένα πραγματικό μέγεθος και οι  $\omega_n$ , αποτελούν τις φυσικές συχνότητες της προβόλου. (Νιάρχος, 2013)

Η εξίσωση (2.8) μπορεί να γραφτεί ως δύο διαφορικές εξισώσεις

$$\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} - k_n^4 X = 0 \quad (2.9a)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \omega_n^2 T = 0 \quad (2.9b)$$

$$k_n^4 = \frac{\omega_n^2 \rho}{EI} \quad (2.9c)$$

Προκειμένου να λυθεί η (2.9a) απαιτούνται οι ακόλουθες οριακές συνθήκες της προβόλου.

$y(0, t) = X(0) = 0$	μηδενική μετατόπιση
$\frac{\partial y(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial X(0)}{\partial x} = 0$	μηδενική κλίση
$\frac{\partial^2 y(L, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 X(L)}{\partial x^2} = 0$	μηδενική ροπή κάμψης
$\frac{\partial^3 y(L, t)}{\partial x^3} = \frac{\partial^3 X(L)}{\partial x^3} = 0$	μηδενική διατμητική δύναμη

Οι οριακές συνθήκες πηγάζουν από την κατάσταση που βρίσκονται τα άκρα της. Το σταθερό άκρο πρέπει να έχει μηδενική μετατόπιση και μηδενική κλίση από τη στιγμή που είναι στερεωμένο. Το ελεύθερο άκρο δεν μπορεί να έχει ροπή κάμψης ούτε διατμητική δύναμη. Η γενική λύση της εξίσωσης (2.9a) είναι ένας γραμμικός συνδυασμός τριγωνομετρικών εξισώσεων. (Νιάρχος, 2013)

$$X(x) = C_1[\cos(k_n x) + \cosh(k_n x)] + C_2[\cos(k_n x) - \cosh(k_n x)] \\ + C_3[\sin(k_n x) + \sinh(k_n x)] + C_4[\sin(k_n x) - \sinh(k_n x)] \quad (2.10)$$

Χρησιμοποιώντας την πρώτη οριακή συνθήκη, βρίσκουμε το  $C_1$

$$X(0) = 0 = 2C_1 \rightarrow C_1 = 0$$

Παραγωγίζοντας μια φορά την (2.10) και χρησιμοποιώντας τη δεύτερη οριακή συνθήκη, βρίσκουμε το  $C_3$ .

$$\begin{aligned}\frac{\partial X(x)}{\partial x} &= C_2[-\sin(k_n x) - \sinh(k_n x)] + C_3[\cos(k_n x) + \cosh(k_n x)] \\ &\quad + C_4[\cos(k_n x) - \cosh(k_n x)] \\ \frac{\partial X(0)}{\partial x} &= 0 = 2C_3 \rightarrow C_3 = 0\end{aligned}$$

Οι ανώτερες παράγωγοι της εξίσωσης (2.10) σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες παράγουν τις ακόλουθες εξισώσεις.

$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} = C_2[-\cos(k_n L) - \cosh(k_n L)] + C_4[-\sin(k_n L) - \sinh(k_n L)] = 0 \quad (2.11a)$$

$$\frac{\partial^3 X(x)}{\partial x^3} = C_2[\sin(k_n L) - \sinh(k_n L)] + C_4[-\cos(k_n L) - \cosh(k_n L)] = 0 \quad (2.11b)$$

Με συνδυασμό των εξισώσεων (2.11a) και (2.11b) έχουμε

$$C_4 = C_2 \frac{-\cos(k_n L) - \cosh(k_n L)}{\sin(k_n L) + \sinh(k_n L)} \quad (2.12)$$

Επομένως για την αιωρούμενη πρόβολο, η εξίσωση (2.10) περιορίζεται σε

$$\begin{aligned}X_n(x) &= C_2 \left\{ [\cos(k_n x) - \cosh(k_n x)] + \left[ \frac{-\cos(k_n L) - \cosh(k_n L)}{\sin(k_n L) - \sinh(k_n L)} \right] \right. \\ &\quad \left. \cdot [\sin(k_n x) - \sinh(k_n x)] \right\} \quad (2.13)\end{aligned}$$

Οι σταθερές  $C_n$  παίρνουν αυθαίρετες τιμές. Προκειμένου όμως η δυναμική λύση της μετατόπισης να ισούται με τη στατική λύση (για  $t=0$ ), πρέπει η σταθερά  $C_2$  να ισούται με  $1/2$ . Με αυτή την τιμή για τη σταθερά  $C_2$ ,  $X_n(0) = 0$  και  $X_n(L) = 1$ . Η αντικατάσταση της εξίσωσης (2.12) στην (2.11a) ή στην (2.11b), οδηγεί στην εξίσωση συχνότητας της αιωρούμενης προβόλου

$$\cos(k_n L) \cosh(k_n L) = -1 \quad (2.14)$$



Οι λύσεις της εξίσωσης (2.14) προκύπτουν με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Οι πρώτες 6 τιμές απεικονίζονται στον επόμενο Πίνακα (η τιμή για  $k_n=0$  αγνοείται αφού αντιστοιχεί στην κατάσταση ηρεμίας της προβόλου). (Νιάρχος, 2013)

n	$v_n = k_n L$
1	1.875104069
2	4.694091133
3	7.854757438
4	10.99554073
5	14.13716839
6	17.27875953

Εικόνα 4- Σταθερές για την ταλάντωση αιωρούμενης προβόλου

Η εξίσωση (2.9b) μπορεί να γραφτεί ως

$$\frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} + \left[ k_n^4 \frac{EI}{\rho} \right] T(t) = 0 \quad (2.15)$$

Η εξίσωση (2.8) ικανοποιείται από τη λύση

$$T(t) = D_1 \sin \left[ \left( k_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \right) t \right] + D_2 \cos \left[ \left( k_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \right) t \right] \quad (2.16)$$

Επομένως η φυσική συχνότητα ταλάντωσης δίνεται από τη σχέση

$$\omega_n = k_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (2.17)$$

Η συχνότητα φυσικής ταλάντωσης της αιωρούμενης προβόλου μπορεί να εκφραστεί και με βάση το μέτρο κάμψης ανά μονάδα πλάτους  $D_p = \frac{EI}{w}$ , χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.17), τον τύπο  $\omega = 2\pi f$  και τη σχέση  $v_n = k_n L$  ως εξής:

$$f_n = \frac{v_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{D_p}{m}} \quad (2.18)$$

Όπου  $f_n$  είναι η n-οστή συχνότητα συντονισμού,  $v_n$  η ιδιοτιμή που προκύπτει από τον παραπάνω Πίνακα,  $L$  το μήκος της προβόλου,  $m = p_p t_p + p_s t_s$  η μάζα ανά μονάδα επιφάνειας και  $w$  το πλάτος της προβόλου. Αν η πρόβλος αποτελείται από δύο διαφορετικά υλικά (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4) το μέτρο κάμψης της, εξαρτάται από τις τιμές των μέτρων του Young  $E_p$  και  $E_s$  και του πάχους του κάθε υλικού,  $t_p$  και  $t_s$  αντίστοιχα.

$$D_p = \frac{E_p^2 t_p^4 + E_s^2 t_s^4 + 2E_p E_s t_p t_s (2t_p^2 + 2t_s^2 + 3t_p t_s)}{12(E_p t_p + E_s t_s)} \quad (2.19)$$

Για να εξετάσουμε την αλλαγή στη συχνότητα συντονισμού εξαιτίας της προσθήκης μάζας αδράνειας στο ελεύθερο άκρο της προβόλου, η συχνότητα από τη σχέση (2.18) μπορεί να εκφραστεί εναλλακτικά σε όρους της ενεργού σταθεράς ελατηρίου (effective spring constant) και της ενεργού μάζας (effective mass) στο άκρο της προβόλου ως εξής:

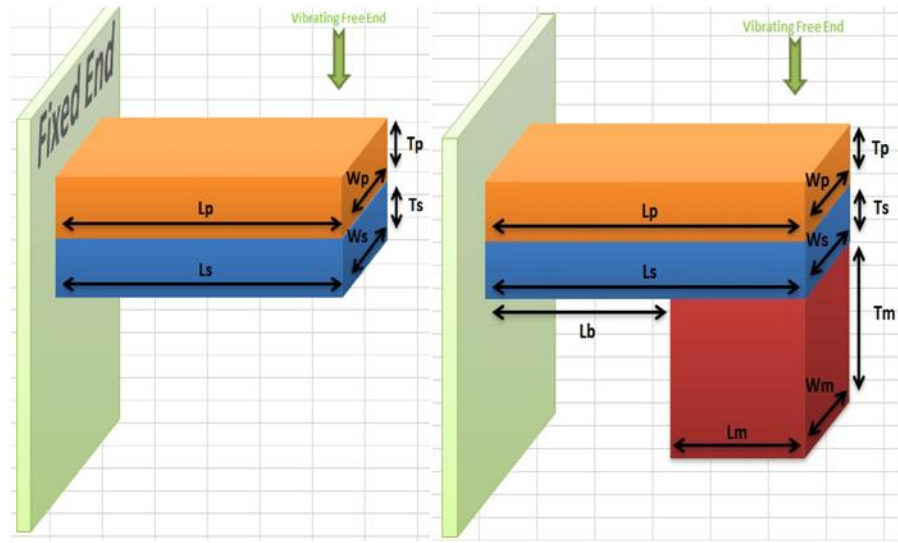
$$f'_n = \frac{v_n'^2}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_e + \Delta m}} \quad (2.20)$$

όπου

$$v_n'^2 = v_n^2 \sqrt{0.236/3}$$

$K$  η ενεργός σταθερά ελατηρίου,  $M_e$  η ενεργός μάζα στο ελεύθερο άκρο της προβόλου και  $\Delta m$  η μάζα αδράνειας. Η σχέση που περιγράφει την ενεργό σταθερά ελατηρίου,  $K$  είναι:

$$K = \frac{3D_p w}{L^3} \quad (2.21)$$



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση διμορφικής προβόλου με και χωρίς μάζα αδράνειας

Επειδή η αξονική ταχύτητα διαφέρει κατά μήκος της προβόλου, η ενεργός μάζα στο άκρο της προβόλου είναι:

$$M_e = \int_0^w dy \int_0^L m \left( \frac{v(x)}{v(L)} \right)^2 dx = 0.236mwL \quad (2.22)$$

όπου  $v(x)$  είναι η αξονική ταχύτητα σε απόσταση  $x$  από το σταθερό άκρο και  $v(L)$  η ταχύτητα στο ελεύθερο άκρο. Σημειώνεται ότι στη σχέση (2.22) έχει αμεληθεί η διαφορά της ταχύτητας κατά το πλάτος της προβόλου. (Νιάρχος, 2013)

Αν όμως η μάζα αδράνειας εκτείνεται σε μια περιοχή και όχι σε ένα σημείο στο άκρο της προβόλου, τότε μπορεί να θεωρηθεί ως μια συγκεντρωτική δύναμη σημείου που εφαρμόζεται στο κέντρο της μάζας. Είναι γνωστό ότι για μάζα αδράνειας με ομοιόμορφη πυκνότητα, παραλληλόγραμμη συμμετρία και θέση στο ελεύθερο άκρο της προβόλου, το κέντρο μάζας της βρίσκεται σε απόσταση  $l_m/2$  από αυτό. Επομένως, η ενεργός σταθερά ελατηρίου στο σημείο αυτό,  $K'$ , σχετίζεται με την  $K$  μέσω της παρακάτω σχέσης

$$K' = K \left( \frac{l_s}{l_s - l_m/2} \right)^3 \quad (2.23)$$

Και τελικά η συχνότητα συντονισμού μιας αιωρούμενης προβόλου με μάζα αδράνειας στο ελεύθερο άκρο της ισούται με

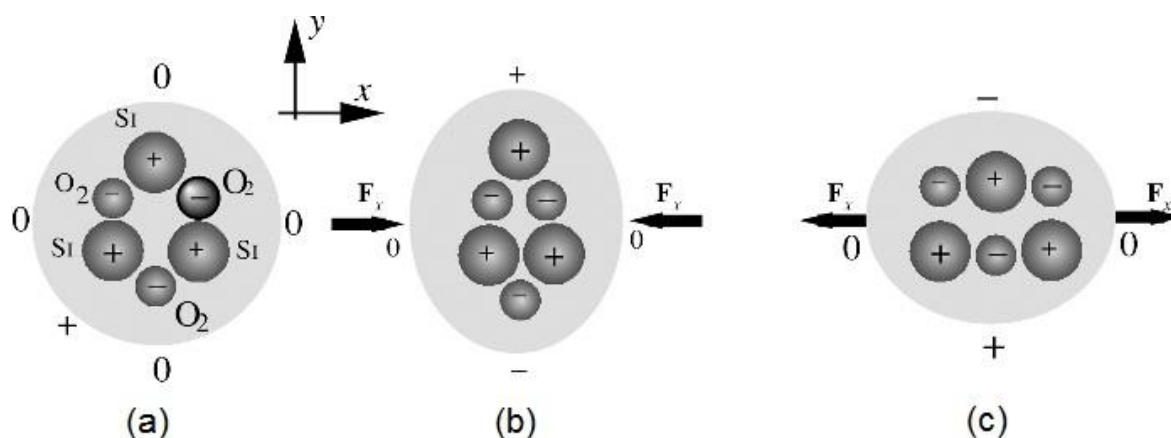
$$f'_n = \frac{v_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{0.236D_p w_s}{\left(l_s - \frac{l_m}{2}\right)^3 (0.236m w_s l_s + \Delta m)}} \quad (2.24)$$

(Νιάρχος, 2013)

## Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου από ένα κρυσταλλικό υλικό όταν υποβάλλεται σε πίεση ή τάση. Το φαινόμενο εμφανίζεται στους φυσικούς κρυστάλλους, όπως είναι ο χαλαζίας (quartz -  $\text{SiO}_2$ ), σε κεραμικά υλικά τα οποία έχουν πολωθεί με τεχνικό τρόπο και σε ορισμένα πολυμερή, όπως είναι το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (polyvinylidene fluoride - PVDF). Ανακαλύφθηκε το 1880 από τους Γάλλους φυσικούς Jacques και Pierre Curie, αλλά η χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές ήταν ελάχιστες μέχρι το 1917, όταν ο Γάλλος καθηγητής Paul Langevin χρησιμοποίησε πλάκες χαλαζία για την παραγωγή και την ανίχνευση ηχητικών κυμάτων στο νερό. Η δουλειά του καθηγητή οδήγησε στην εξέλιξη του σημερινού sonar. (Fraden, 2010)

Ένα απλό, αλλά ταυτόχρονα αρκετά επεξηγηματικό μοντέλο του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου προτάθηκε το 1927 από τον Alexander Meissner. Ο κρύσταλλος χαλαζία μοντελοποιείται υπό μορφή έλικας (Εικόνα.5), με ένα άτομο πυριτίου, Si και δύο άτομα οξυγόνου,  $\text{O}_2$ , τα οποία εναλλάσσονται στην έλικα. Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται μια τομή του άξονα z.



Εικόνα 6: Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε κρύσταλλο χαλαζία

Το κάθε κύτταρο του κρυστάλλου, αποτελείται από 3 άτομα Si, και 6 άτομα O. Τα άτομα του οξυγόνου εμφανίζονται σε ζευγάρια. Το κάθε άτομο Si κουβαλάει 4 θετικά φορτία και το κάθε ζεύγος ατόμων O, 4 αρνητικά φορτία (2 σε κάθε άτομο). Επομένως το κύτταρο του χαλαζία είναι ηλεκτρικά ουδέτερο αν δεν του ασκείται κάποια πίεση ή τάση. Όταν του ασκείται κατά μήκος του άξονα x μια εξωτερική

δύναμη,  $F_x$ , τότε το εξαγωνικό του πλέγμα παραμορφώνεται. Στην Εικόνα 2.5b παρουσιάζεται αυτή η παραμόρφωση, η οποία μετατοπίζει τα άτομα μέσα στον κρύσταλλο με τέτοιο τρόπο ώστε ένα θετικό φορτίο σχηματίζεται στην πλευρά του Si και ένα αρνητικό φορτίο στην πλευρά του ζεύγους  $O_2$ , με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ο κρύσταλλος ηλεκτρικό φορτίο κατά μήκος του άξονα  $y$ . Αν στον κρύσταλλο ασκηθεί μία εφελκυστική δύναμη προς την κατεύθυνση  $x$  (Εικόνα 2.5c), τότε εμφανίζεται στον άξονα  $y$  φορτίο αντίθετης πολικότητας. Επομένως, με αυτό το απλό μοντέλο απεικονίζεται πώς ορισμένα κρυσταλλικά υλικά μπορούν να αναπτύξουν ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνειά τους, σε αντίδραση της μηχανικής τους παραμόρφωσης. Τέλος τα πιεζοηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Δηλαδή, την παραμόρφωση του υλικού, όταν στα άκρα του εφαρμοστεί ηλεκτρική τάση.

### Βασικές εξισώσεις

Οι βασικές εξισώσεις ενός στατικού πιεζοηλεκτρικού υλικού απαρτίζονται από 4 σύνολα εξισώσεων: την εξίσωση μηχανικής ισορροπίας (2.25), την καταστατική εξίσωση (2.26), την εξίσωση γεωμετρικής συμβατότητας (2.27) και την εξίσωση Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο (2.,28). Η κατάσταση μηχανικής ισορροπίας όταν ασκείται δύναμη  $f_e^{(b)} = 0$  είναι

$$\nabla \cdot \sigma = f_e^{(b)} = 0 \quad (2.25a)$$

όπου  $\sigma$  είναι ο τανυστής τάσης, που συνδέεται με την παραμόρφωση  $\varepsilon$ . Το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  η ηλεκτρική μετατόπιση  $D$  χρησιμοποιούνται στις ακόλουθες εξισώσεις

$$\begin{aligned} \sigma_p &= c_{pq} \varepsilon_q - e_{kp} E_k \\ D_i &= e_{iq} \varepsilon_q + \kappa_{ik} E_k \end{aligned} \quad (2.25b)$$

όπου  $c_{pq}$  είναι η γραμμική ελαστική σταθερά,  $e_{kp}$  ο γραμμικός πιεζοηλεκτρικός συντελεστής και  $\kappa_{ik}$  η διηλεκτρική σταθερά.

Η εξίσωση συμβατότητας είναι ένας γεωμετρικός περιορισμός που πρέπει να ικανοποιείται από την παραμόρφωση  $\varepsilon_{ij}$  ως εξής

$$c_{pq} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(c_{11} - c_{12})}{2} \end{pmatrix} \quad (2.26a)$$

$$e_{kp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.26b)$$

$$\kappa_{ik} = \begin{pmatrix} \kappa_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_{33} \end{pmatrix} \quad (2.26c)$$

Η εξίσωση συμβατότητας είναι ένας γεωμετρικός περιορισμός που πρέπει να ικανοποιείται από παραμόρφωση  $\varepsilon_{ij}$  ως εξής

$$e_{ilm}e_{jpq} \frac{\partial^2 \varepsilon_{mp}}{\partial x_l \partial x_q} = 0 \quad (2.27)$$

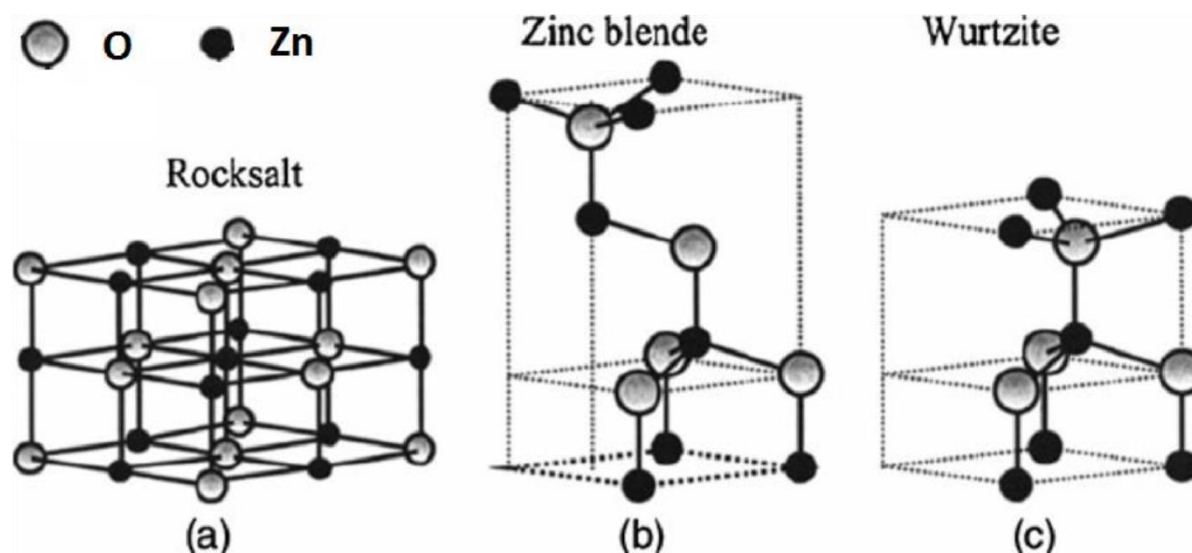
όπου οι  $e_{ilm}$  και  $e_{jpq}$  είναι οι αντισυμμετρικοί τανυστές Levi-Civita. Τέλος, πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση Gauss με δεδομένο ότι δεν υπάρχουν ελεύθερα φορτία  $p_e^{(b)}$

$$\nabla \cdot \vec{D} = p_e^{(b)} = 0 \quad (2.28)$$

(Fraden, 2010)

## Κρυσταλλική δομή ZnO

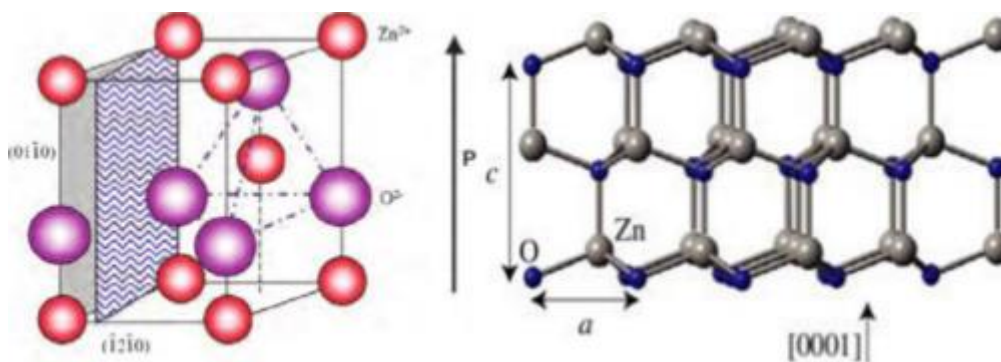
Το οξείδιο του ψευδαργύρου είναι μια δυαδική, ανόργανη χημική ένωση που ανήκει στην ΙΙVI κατηγορία ημιαγωγών<sup>4</sup>. Όπως οι περισσότερες ενώσεις αυτής της κατηγορίας, έτσι και το ZnO σχηματίζει κρυστάλλους της κυβικής δομής του σφαλερίτη (zinc blende) αλλά και της εξαγωνικής δομής του βουρτσίτη (wurtzite). Όπως είναι γνωστό, το ZnO έχει τρεις δυνατές κρυσταλλογραφικές δομές: wurtzite, zinc blende και ορυκτού άλατος (rocksalt), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6. (Wang, 2015)



Εικόνα 7: Οι τρεις κρυσταλλικές δομές του ZnO: (a) rocksalt (κυβική συμμετρία), (b) Zinc blende (κυβική συμμετρία) και (c) wurtzite (εξαγωνική συμμετρία).

Σε συνθήκες περιβάλλοντος, η σταθερή θερμοδυναμική φάση είναι αυτή του βουρτσίτη. Το ZnO με δομή σφαλερίτη είναι μετασταθές και μπορεί να σταθεροποιηθεί μόνο με ετερόεπιταξιακή (hetero-epitaxial) ανάπτυξη πάνω σε υποστρώματα με κυβική συμμετρία (π.χ. Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si). Μέσω υψηλών πιέσεων (10-15 GPa), η δομή βουρτσίτη μπορεί να μετατραπεί και να πάρει τη δομή του ορυκτού άλατος. Η δομή του άλατος αποτελεί και αυτή μετασταθή φάση, αλλά μπορεί να παραμείνει σε περιβάλλον ατμοσφαιρικής πίεσης. Υπό συμβατικές συνθήκες, το ZnO έχει τη δομή βουρτσίτη, η οποία χαρακτηρίζεται από εξαγωνική δομή με παραμέτρους  $a = 0.3296$  και  $c = 0.52065$  nm όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7. (Wang, 2015)





Εικόνα 8: Δομή wurtzite του ZnO και οι παράμετροι πλέγματος  $a, c$

Τα ανιόντα οξυγόνου ( $O^{2-}$ ) και τα κατιόντα ψευδαργύρου ( $Zn^{2+}$ ) σχηματίζουν μια τετραεδρική δομή η οποία δεν έχει κεντρική συμμετρία. Η δομή του ZnO μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύνολο εναλλασσόμενων επιπέδων κατά μήκος του άξονα  $c$ . Παρόλο που η μοναδιαία κυψελίδα (unit cell) του ZnO είναι ουδέτερη, η κατανομή των ανιόντων και των κατιόντων μπορεί να λάβει συγκεκριμένο σχηματισμό, όπως ορίζει η κρυσταλλογραφία, ώστε ορισμένες επιφάνειες μπορούν να τερματίζουν στο ένα ή στο άλλο είδος ιόντων, οδηγώντας σε θετικά ή αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες (πολικές επιφάνειες). Η πιο γνωστή πολική επιφάνεια είναι η επιφάνεια της βάσης. Τα αντίθετα φορτισμένα ιόντα παράγουν θετικά φορτισμένες Zn-(0001) και αρνητικά φορτισμένες O-(000 $\bar{1}$ ) πολικές επιφάνειες, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δίπολα και αυθόρμητη πόλωση κατά μήκος του άξονα  $c$ . Για να διατηρήσουν σταθερή δομή, οι πολικές επιφάνειες έχουν έδρες ή παρουσιάζουν τεράστιες επιφανειακές αναδομήσεις. Επίσης οι επιφάνειες αυτές περικλείονται από τις μη πολικές επιφάνειες (10 $\bar{1}0$ ) και (11 $\bar{2}0$ ). Εξαιτίας αυτής της πολικότητας και της έλλειψης κεντρικής συμμετρίας της δομής βουρτσίτη, καθίσταται δυνατή ή αξιοποίηση των πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων του ZnO στο πεδίο των ηλεκτρικών γεννητριών για αυτόνομα συστήματα. (Wang, 2015)

### Τεχνικές ανάπτυξης και εναπόθεσης ZnO

Πολλές τεχνικές παραγωγής, όπως η φυσική ή χημική αέρια εναπόθεση (Physical Vapor Deposition ή Chemical Vapor Deposition) και η εναπόθεση παλμικού laser (pulsed laser deposition), έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την απόκτηση υψηλής

ποιότητας νανοραβδίων ZnO. Όμως, οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν συχνά περίπλοκες διαδικασίες χρησιμοποιώντας εξεζητημένο και ακριβό εξοπλισμό. Από την άλλη μεριά, η ηλεκτροχημική εναπόθεση και οι υδροθερμικές μέθοδοι παραγωγής, αποδείχθηκαν ως εναλλακτικοί τρόποι για την παραγωγή μεγάλων και καλά προσανατολισμένων νανοραβδίων ZnO. Οι χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 100°C) και το χαμηλό κόστος αυτών των μεθόδων, τις καθιστά κατάλληλες για ολοκλήρωση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές σε πυρίτιο.

Η ανάπτυξη των νανοραβδίων ZnO είναι μια διαδικασία που ολοκληρώνεται σε δύο βήματα. Το πρώτο βήμα αποτελείται από την εναπόθεση στρώματος σπόρων (seed layer) στο καθαρισμένο υπόστρωμα ενώ το δεύτερο βήμα είναι η ανάπτυξη (growth) των νανοραβδίων ZnO πάνω στο στρώμα σπόρων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η υδροθερμική μέθοδος ανάπτυξης νανοραβδίων ZnO. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες χημικές ενώσεις για την υδροθερμική μέθοδο είναι οι  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  (Zinc nitrate hexahydrate) και η Hexamethylenetetramine (HMTA). Το  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  παρέχει τα ιόντα  $\text{Zn}^{2+}$  που απαιτούνται για την ανάπτυξη των νανοραβδίων ενώ τα μόρια του νερού που βρίσκονται στο διάλυμα παρέχουν τα ιόντα  $\text{O}^{2-}$ . Παρόλο που η ακριβής επίδραση της HMTA κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του νανοραβδίου ZnO δεν είναι ακόμα ξεκάθαρη, πιστεύεται ότι δρα ως ασθενής βάση και υδρολύεται με αργό ρυθμό μέσα στο διάλυμα, παράγοντας  $\text{OH}^-$ . Αν η HMTA διαλυόταν γρήγορα στο νερό, θα παρήγαγε μεγάλη ποσότητα  $\text{OH}^-$  σε σύντομο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα τα ιόντα  $\text{Zn}^{2+}$  θα μετατρέπονταν σε ίζημα πολύ γρήγορα εξαιτίας του υψηλού pH στο διάλυμα, το οποίο θα είχε σαν αποτέλεσμα τη μη ανάπτυξη προσανατολισμένων νανοραβδίων ZnO. (Wang, 2011)

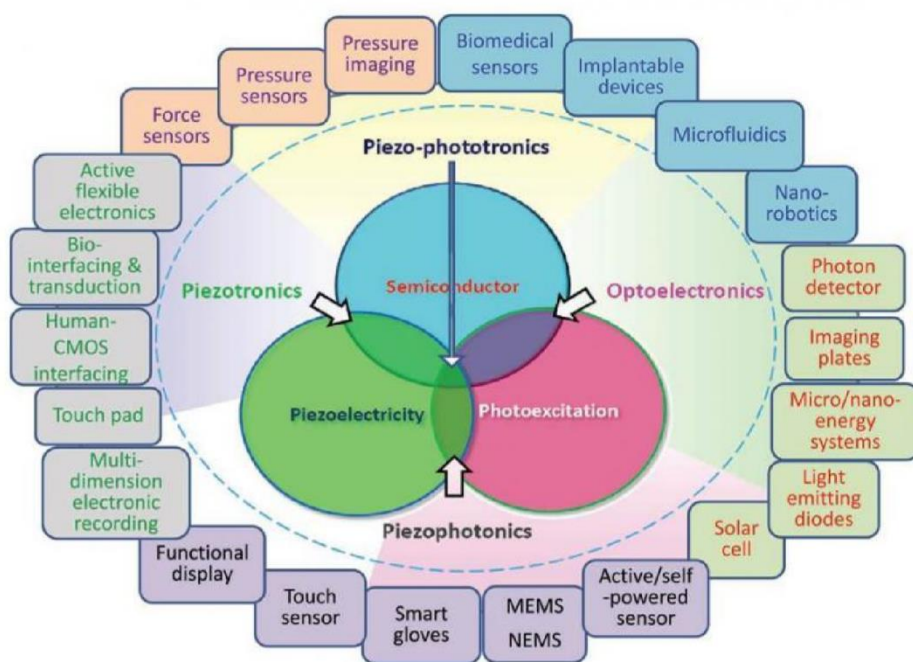
### **Πιεζοηλεκτρισμός σε νανοδομές**

Η μεγαλύτερη ανακάλυψη στις νανοδομές ZnO ήταν η ανάπτυξη νανοραβδίων πάνω σε υποστρώματα Si, και εύκαμπτων υλικών, τα οποία παρουσίαζαν πιεζοηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα τους, όταν βρισκόταν υπό μηχανική παραμόρφωση. Ο αρχικός χαρακτηρισμός των νανοραβδίων έγινε με την τεχνική AFM (atomic force

microscopy). Συγκεκριμένα η ακίδα του AFM παραμόρφωσε την άκρη του νανοραβδίου και μέσω ειδικού κυκλώματος καταγραφόταν η πτώση τάσης στα άκρα του. Η πτώση τάσης που μετρήθηκε για πρώτη φορά ήταν 0.6V, τιμή ικανή για να παρέχει ορθή τάση πόλωσης σε μια συνηθισμένη δίοδο.

Η πρώτη νανογεννήτρια που χρησιμοποίησε νανοραβδία ZnO ως πιεζοηλεκτρικό υλικό, κατασκευάστηκε το 2007 από τον Z.L.Wang. Το πλεονέκτημα των νανοραβδίων είναι ότι μπορούν να διεγερθούν από πολύ μικρές δονήσεις και η συχνότητα διέγερσης να είναι από ένα έως πολλές χιλιάδες Hz, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για την συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται ευρύτατα σε συστήματα ανίχνευσης, σε ενεργοποιητές και στην συλλογή ενέργειας. Τα συμβατικά πιεζοηλεκτρικά υλικά όπως το PZT και το PVDF είναι μονωτές με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η κατασκευή λειτουργικών ηλεκτρονικών ή οπτοηλεκτρονικών διατάξεων. Με τη χρήση όμως υλικών, όπως ZnO, GaN και CdS τα οποία παρουσιάζουν ταυτοχρόνως πιεζοηλεκτρικές και ημιαγωγικές ιδιότητες, κατέστη δυνατή η εφαρμογή του πιεζοηλεκτρισμού με οπτοηλεκτρονικές διαδικασίες διέγερσης, με αποτέλεσμα να επινοηθούν ορισμένα νέα πεδία. (Wang, 2011)



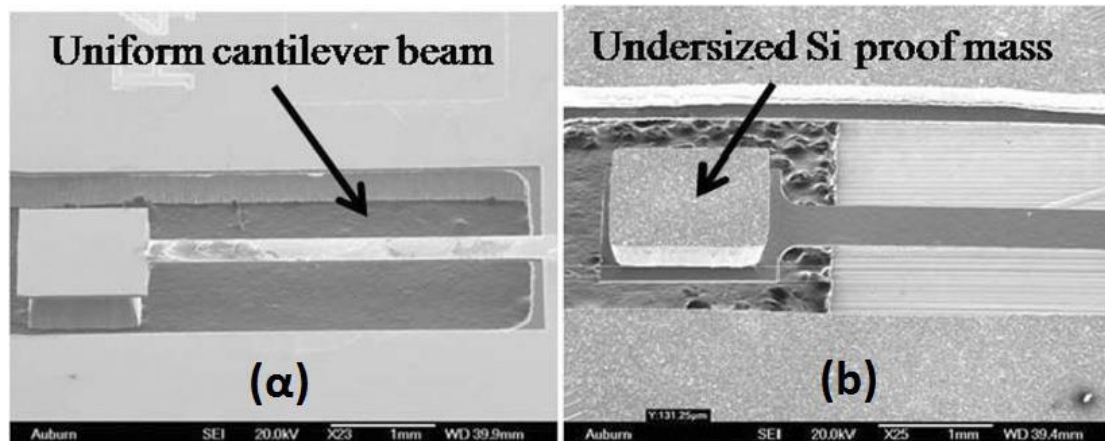
Εικόνα 9: Διάγραμμα που δείχνει τη σύζευξη μεταξύ του πιεζοηλεκτρισμού, της φωτονικής διέγερσης και των ημιαγωγών, καθώς και πιθανές εφαρμογές του κλάδου.

## Μικροηλεκτρομηχανικοί (MEMS) πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας τύπου αιωρούμενης προβόλου

Η κατασκευή των περισσότερων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και διατάξεων βασίζεται στην τεχνολογία Si. Σαν αποτέλεσμα, οι πιεζογεννήτριες πυριτίου θα μπορούσαν να διεισδύσουν στην αγορά για την αυτονόμηση των συσκευών αυτών χωρίς περαιτέρω τροποποιήσεις των διαδικασιών παραγωγής. Επίσης από τη στιγμή που και το ZnO είναι συμβατό με την τεχνολογία CMOS, θα μπορούσε μία πιεζογεννήτρια να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος μιας ψηφίδας (chip) μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία. Για τους προαναφερθείς λόγους επιλέχθηκε το Si ως υπόστρωμα των μικρογεννητριών που κατασκευάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

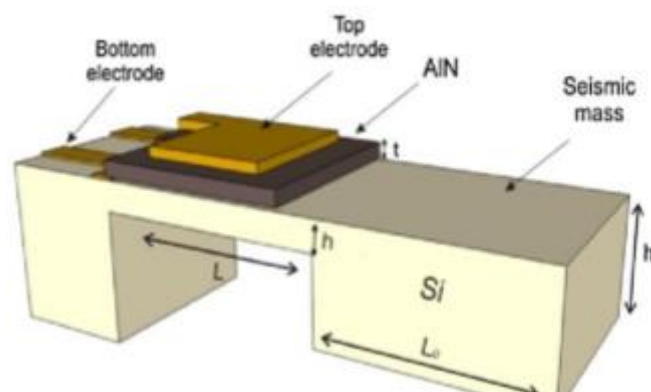
Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται γεννήτριες MEMS τύπου αιωρούμενης προβόλου καθώς και πιο σύνθετες δομές που έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από διάφορες ερευνητικές ομάδες.

Το 2008 σχεδίασαν ένα συλλέκτη ενέργειας τύπου αιωρούμενης προβόλου, με ενσωματωμένη μάζα αδράνειας από Si και πιεζοηλεκτρικό υλικό το PZT. Για την κατασκευή της γεννήτριας χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες διαδικασίες MEMS: υγρή οξείδωση, λιθογραφία και sputtering για τα ηλεκτρόδια. Η εναπόθεση του πιεζοηλεκτρικού υλικού έγινε με τη μέθοδο sol-gel και το πάχος έφτασε το 1μm. Η απελευθέρωση της μάζας αδράνειας έγινε από την πίσω πλευρά με την τεχνική RIE (reactive ion etching). Οι διαστάσεις της προβόλου ήταν 4800 x 400 x 36 μm<sup>3</sup> ενώ η μάζα αδράνειας 1360 x 940 x 456 μm<sup>3</sup>. Η πειραματική απόδοση στο βέλτιστο φορτίο (6kΩ) ήταν 160mV<sub>pk</sub> τάση εξόδου και 2.15μW ή 3272μW/cm<sup>3</sup> ισχύς εξόδου σε συχνότητα συντονισμού 461.15 Hz. (Shen, 2008)

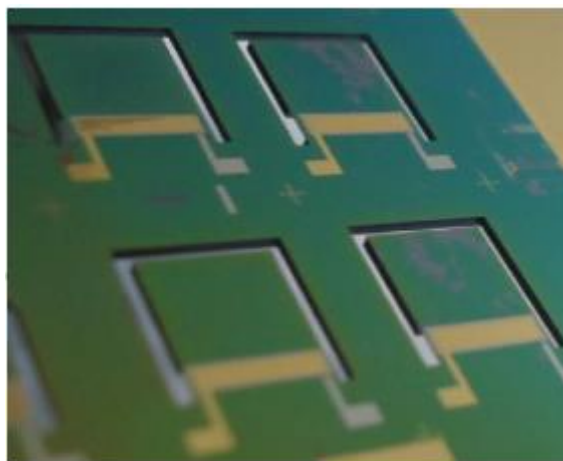


Εικόνα 10: Φωτογραφίες συλλέκτη ενέργειας από SEM: (a) μπροστά πλευρά, (b) πίσω πλευρά

Το 2014 σχεδίασαν και κατασκεύασαν δύο συλλέκτες ενέργειας χρησιμοποιώντας το νιτρίδιο του αλουμινίου (AlN) ως πιεζοηλεκτρικό υλικό για τη μετατροπή της ενέργειας από τυχαίες δονήσεις. Η κατασκευή τους έγινε χρησιμοποιώντας τεχνολογία MEMS σε 4'' δισκίο SOI, με το AlN να είναι τοποθετημένο ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια, πάνω σε μία πρόβολο πυριτίου που διαθέτει μάζα αδράνειας ( $5600 \times 5600 \mu\text{m}^2$ ) στη μία άκρη. Η διαφορά των δύο συσκευών ήταν στο πάχος του υμενίου πυριτίου. Συγκεκριμένα η συσκευή 1 είχε υμένιο Si  $20\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub> και  $350\mu\text{m}$  υπόστρωμα Si ενώ το η συσκευή 2 είχε υμένιο Si  $45\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub> και  $400\mu\text{m}$  υπόστρωμα. (Dow, 2014)



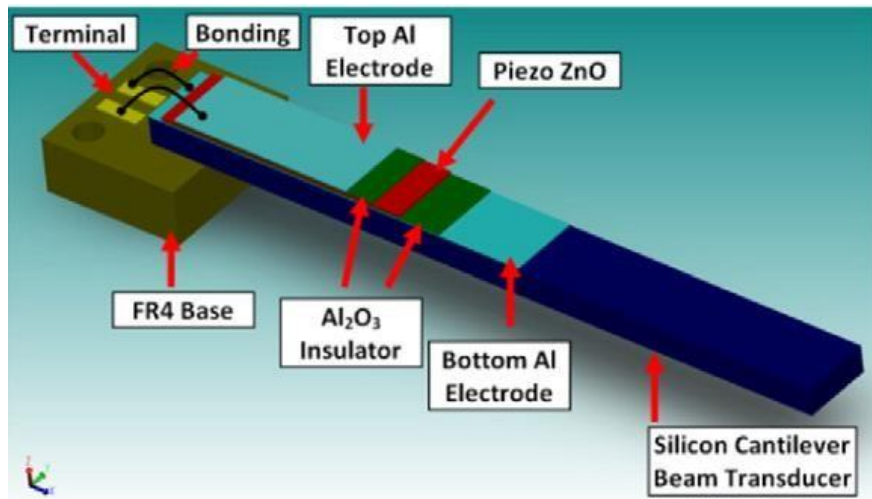
Εικόνα 11: Σχέδιο συλλέκτη ενέργειας



Εικόνα 12: Κατασκευασμένες γεννήτριες

Η μέγιστη ισχύς της συσκευής 1 ήταν  $10\mu\text{W}$  για διέγερση  $1\text{g}$  ενώ η ελάχιστη ισχύς ήταν  $1.7\mu\text{W}$  για  $0.2\text{g}$ . Η αντίσταση του φορτίου για μέγιστη ισχύ προσδιορίστηκε στο  $1\text{M}\Omega$ . Παρόλα αυτά, η συσκευή 1 δεν μπορούσε να αντέξει μεγαλύτερες επιταχύνσεις και έσπασε σε επιτάχυνση  $1.5\text{g}$ . Η μέγιστη ισχύς της συσκευής 2 όταν υποβλήθηκε σε επιτάχυνση  $2\text{g}$  ήταν  $34.78\mu\text{W}$  ενώ η αντίσταση φορτίου της, για μέγιστη ισχύ, προσδιορίστηκε στα  $495\text{k}\Omega$ . Οι ιδιοσυχνότητες των δύο συσκευών ήταν  $186\text{Hz}$  και  $572\text{Hz}$  για την πρώτη και τη δεύτερη αντίστοιχα. Από τις μετρήσεις προέκυψε ότι η παραγόμενη ισχύς ήταν ευθέως ανάλογη της επιτάχυνσης που δεχόταν η συσκευή, γεγονός που οφειλόταν στη μεγαλύτερη κάμψη της προβόλου.

Το 2015 ανέπτυξαν συλλέκτη ενέργειας που χρησιμοποιεί το  $\text{ZnO}$  σαν πιεζοηλεκτρικό υλικό. Η δομή του αποτελείται από ένα υμένιο  $\text{ZnO}$  ανάμεσα σε δύο στρώματα μονωτικού (οξείδιο του αργιλίου -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) και εξωτερικές επαφές αλουμινίου, τα οποία έχουν εναποτεθεί πάνω σε υπόστρωμα  $\text{Si}$ . Οι συνολικές διαστάσεις της προβόλου είναι  $32 \times 7 \times 0.5 \text{ mm}^3$ . (Prusaskova, 2015)



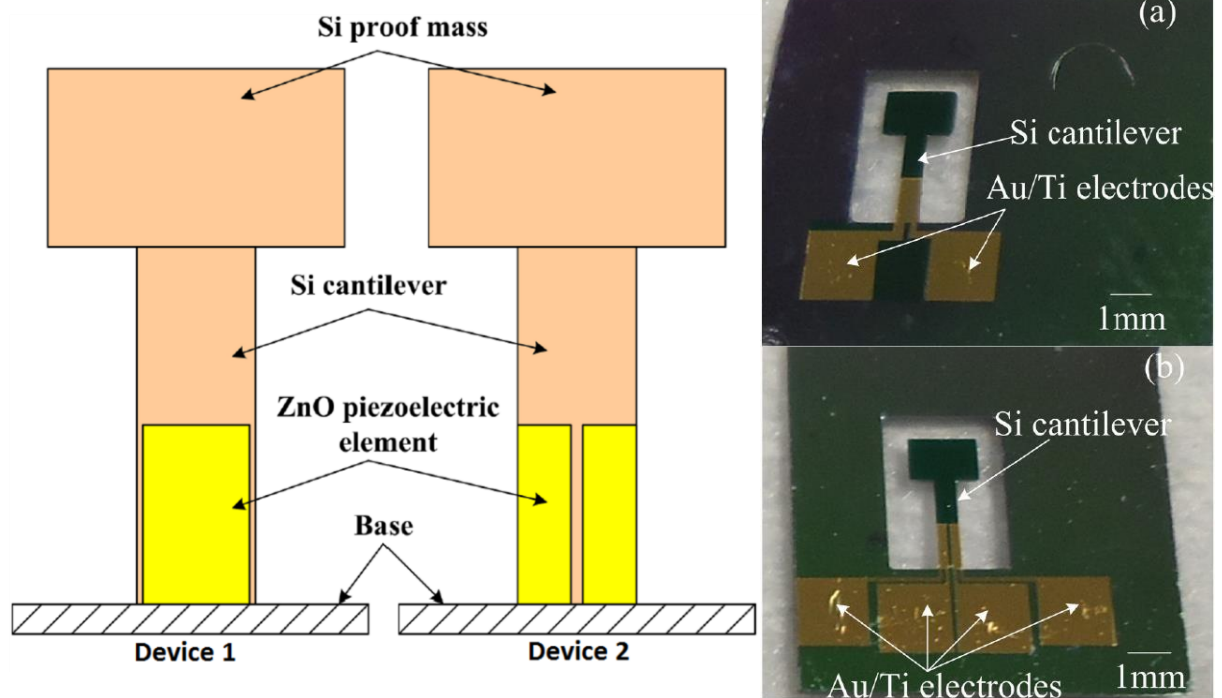
Εικόνα 13: 3D μοντέλο πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας - ZnO

Η συχνότητα συντονισμού προσδιορίστηκε στα 594.9Hz και η μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) μετρήθηκε στα 0.975V. Όπως ήταν αναμενόμενο, η τάση κλειστού κυκλώματος αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης φορτίου ενώ η μέγιστη τιμή της ισχύς εξόδου ήταν 20μW σε αντίσταση εξόδου 10kΩ.

Οι Wang και Du σχεδίασαν και κατασκεύασαν δύο πιεζοηλεκτρικές MEMS γεννήτριες που αποτελούνται από μία πρόβολο πυριτίου, μάζα αδράνειας πυριτίου και πιεζοηλεκτρικό υμένιο από ZnO. Οι διαστάσεις της προβόλου και της μάζας αδράνειας είναι ίδιες και στις δύο συσκευές, δηλαδή  $2000 \times 500 \mu\text{m}^2$  και  $1500 \times 1000 \mu\text{m}^2$  αντίστοιχα. Η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο συσκευών είναι στις διαστάσεις του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. (Wang, 2015)

Συγκεκριμένα, το υμένιο ZnO της συσκευής 1 έχει διαστάσεις  $1000 \times 480 \times 1.4 \mu\text{m}^3$  ενώ η συσκευή 2 έχει δύο υμένια ZnO, το ένα δίπλα στο άλλο, διαστάσεων  $1000 \times 240 \times 1.4 \mu\text{m}^3$ . Από τις διαστάσεις των 2 συσκευών παρατηρείται ότι η επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού υλικού είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις.





Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση των 2 συσκευών και φωτογραφία μετά την κατασκευή τους

Οι δύο συλλέκτες ενέργειας είχαν σχεδόν τις ίδιες συχνότητες συντονισμού με την συσκευή 1 να συντονίζεται στα 1300.1Hz ενώ η 2 στα 1313.4Hz. Η διαφορά στις συχνότητες συντονισμού μπορεί να προκλήθηκε από υπέρ-εγχάραξη (over etching) της προβόλου πυριτίου κατά τη διαδικασία DRIE. Όπως και στις προηγούμενες μικρογεννήτριες έτσι και εδώ υπήρχε αύξηση της τάσης εξόδου με την αύξηση της αντίστασης του φορτίου. Η μέγιστη τάση της συσκευής 2, με παραλληλία των δύο επιμέρους πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, ήταν 2.06V σε φορτίο 1 MΩ. Αντίστοιχα η μέγιστη τάση της συσκευής 1 για το ίδιο φορτίο ήταν 1.77V. Παρατηρήθηκε επίσης ότι για φορτίο από 0.1-1MΩ, η τάση εξόδου για παράλληλη σύνδεση είναι περίπου διπλάσια από αυτή του μονού πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, όπως ήταν αναμενόμενο.

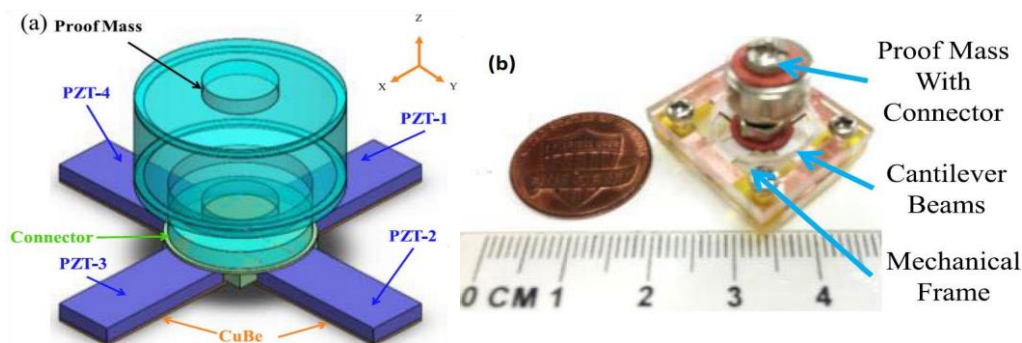
Τέλος χρησιμοποιώντας τον τύπο  $P_{load} = \frac{v_{pp}^2}{4R_{load}}$  υπολογίστηκε η ισχύς εξόδου της συσκευής 2 παίρνει τη μέγιστη τιμή της (1.25μW) για αντίσταση φορτίου 0.6MΩ και παράλληλη σύνδεση των δύο στοιχείων ενώ η συσκευή 1 είχε ισχύ εξόδου 0.98μW σε



φορτίο  $0.38\text{M}\Omega$ . Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι μετρήσεις έγιναν με επιτάχυνση  $10\text{m/s}^2$  (περίπου  $1\text{g}$ ).

## Σύνθετοι πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες ενέργειας

Το 2015, οι Hung, Chugng κλπ σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα συλλέκτη ενέργειας τριών αξόνων, χρησιμοποιώντας μια μηχανική-πιεζοηλεκτρική διάταξη. Η πρωτότυπη γεννήτρια χρησιμοποιεί το νόμο του Νεύτωνα για την αδράνεια και το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο προκειμένου να μετατρέψει τις δονήσεις του περιβάλλοντος, σε όλους τους άξονες, σε ηλεκτρική τάση. Η κατασκευή της γεννήτριας αποτελείται από 3 μέρη: Τις 4 προβόλους από PZT/BeCu με πάχη 1/0.25 mm, πάνω και κάτω ακρυλικές πλάκες καθώς και το σύνδεσμο με τη μάζα αδράνειας. Ο χαρακτηρισμός της γεννήτριας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός μηχανήματος δονήσεων (shaker). (Hung, 2015)

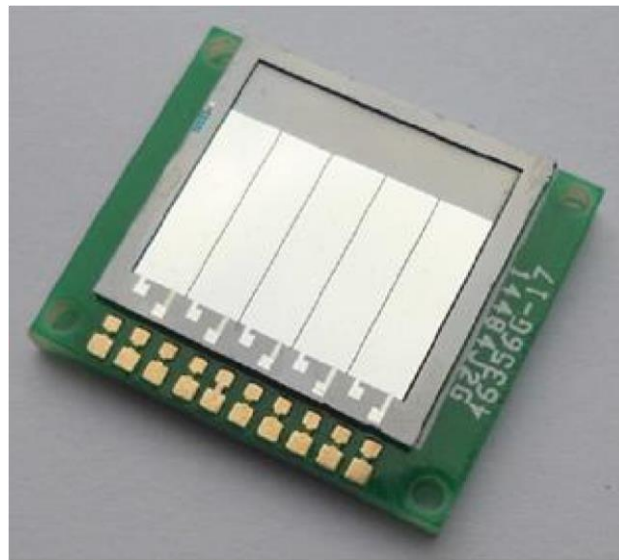


Εικόνα 15: α) Σχηματική απεικόνιση συλλέκτη ενέργειας, β) Κατασκευασμένη γεννήτρια

Οι συχνότητες συντονισμού που προέκυψαν από τις μετρήσεις ήταν 75 Hz με εξωτερική διέγερση στο x-y επίπεδο και 95Hz με εξωτερική διέγερση στο z επίπεδο. Με σύνδεση σε σειρά των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων PZT-1 και PZT-3 και διέγερση στον x άξονα 3.5g η μέγιστη τάση εξόδου ήταν 3.72V και η μέγιστη ισχύς εξόδου 1.11μW ή 3.81μW/cm<sup>3</sup>. Για την ίδια συνδεσμολογία αλλά διέγερση 3.8g στον z άξονα η μέγιστη τάση εξόδου ήταν 1.76V και η ισχύς 0.37μW ή 0.85μW/cm<sup>3</sup>.

Οι Zhao et al. σχεδίασαν και κατασκεύασαν μια μικρογεννήτρια που αποτελείται από 5 προβόλους συνδεδεμένες με κοινή μάζα αδράνειας. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποιήσανε ήταν το AlN σε υπόστρωμα πυριτίου. Για την κατασκευή της γεννήτριας χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι MEMS, όπως sputtering για το

πιεζοηλεκτρικό και DRIE για την εγχάραξη του πυριτίου. Η συχνότητα συντονισμού προσδιορίστηκε στα 230.8 Hz με την τάση ανοιχτοκύκλωσης της κάθε προβόλου για διέγερση 0.2g να είναι από 252 έως 334mV. Η διαφορά που παρατηρήθηκε στις τάσεις οφειλόταν στην ανομοιομορφία του πιεζοηλεκτρικού υλικού κατά μήκος της γεννήτριας. Η ισχύς της μεσαίας προβόλου, υπό το βέλτιστο φορτίο (350k $\Omega$ ), ήταν 0.053 και 0.653  $\mu$ W για διεγέρσεις 0.2g και 1g αντίστοιχα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με παράλληλη και σε σειρά σύνδεση των προβόλων. (Zhao, 2015)



Εικόνα 16: Μικρογεννήτρια με 5 προβόλους και κοινή μάζα αδράνειας

Για παράλληλη σύνδεση των 5 προβόλων η μικρογεννήτρια παρουσίασε τη μέγιστη ισχύ της που ήταν 3.249 $\mu$ W, ενώ για σύνδεση εν σειρά η ισχύς ήταν 0.902 $\mu$ W. Τέλος η γεννήτρια συνδέθηκε σε κύκλωμα ανόρθωσης τάσης, όπου παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στην παραγόμενη ισχύ του κυκλώματος ( $P_{\text{parallel}} = 0.342\mu$ W και  $P_{\text{series}} = 0.276\mu$ W αντίστοιχα).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΑΣΤΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ο πολλαπλασιασμός των ελαφρών, φορητών ηλεκτρονικών συσκευών έχει θέσει το θέμα της εξασφάλισης της αξιόπιστης, μακροπρόθεσμης τροφοδοσίας για τα συστήματα αυτά. Επί του παρόντος, αυτή η ανησυχία έχει ξεπεραστεί με τη χρήση ηλεκτρικών μπαταριών, η οποία δημιουργεί προβλήματα συντήρησης, καθώς και περιβαλλοντικά ζητήματα, λόγω της σύνθετης διαδικασίας ανακύκλωσής τους.

Ως εκ τούτου, η χρήση των προϊόντων μάστευσης ενέργειας που μετατρέπουν τις πηγές του περιβάλλοντος σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά τα τελευταία χρόνια, προκειμένου να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα των πρωτογενών συστοιχιών μπαταριών. Η έρευνα σχετικά με την ενεργειακή μάστευση έχει κυρίως επικεντρωθεί σε υψηλής πυκνότητας πηγές ενέργειας, όπως δονήσεις, ηλιακή ή θερμική. Τέτοιες πηγές, ωστόσο, δεν είναι πάντοτε διαθέσιμες, ή οι διαστάσεις του συστήματος μπορεί να περιορίσουν τη συνολική ισχύ εξόδου του συλλέκτη. Ως εκ τούτου, εναλλακτικές λύσεις πρέπει να βρεθούν όταν οι πηγές ενέργειας δεν είναι διαθέσιμες ή είναι ανεπαρκείς για ρεαλιστικές εφαρμογές.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι πηγές χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας, όπως ο άνεμος και η βροχή μπορεί να υποκαταστήσουν αποτελεσματικά την κλασική μάστευση ενέργειας. Επιπλέον, παρόλο που οι δυνατότητες μάστευσης σε ένα δεδομένο όγκο είναι περιορισμένες, αυτές οι τελευταίες πηγές είναι εν γένει διαθέσιμες σε μεγάλη έκταση. Ένας από τους περιορισμούς τέτοιων συστημάτων έγκειται στο γεγονός ότι θα πρέπει να λειτουργούν σχεδόν σε οποιοδήποτε περιβάλλον (δηλαδή, χαμηλή ταχύτητα του ανέμου ή πολύ ασθενής βροχή).

Σύμφωνα με αυτούς τους περιορισμούς, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι καλοί υποψήφιοι για τη μετατροπή της ενέργειας λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας και το υψηλό δυναμικό ολοκλήρωσης

## **Μικρής κλίμακας μάστευση ενέργειας από τον άνεμο**

Ο άνεμος είναι ένα υποπροϊόν της ηλιακής ενέργειας. Η επιφάνεια της γης θερμαίνεται και κρυώνει άνισα, δημιουργώντας ατμοσφαιρικές ζώνες πίεσης που κάνουν τη ροή του αέρα να κινείται από περιοχές υψηλής προς περιοχές χαμηλής πίεσης. Περίπου το 2% της ενέργειας του ήλιου που φτάνει στη γη μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια.

Το γεγονός ότι η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή ούτε πάντα ικανή να καλύψει την απαίτηση του φορτίου, αποτελεί μια πρόκληση για την χρήση της αιολικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί χωρίς επιπλέον εξοπλισμό, και οι ανεμογεννήτριες έχουν συγκεκριμένο παράθυρο ταχυτήτων ανέμου στο οποίο μπορούν να λειτουργήσουν. Η επιφάνεια που απαιτείται για την εγκατάσταση και σωστή λειτουργία ενός σταθμού Α/Γ είναι αρκετά μεγάλη. Οχλήσεις μπορούν να θεωρηθούν ο θόρυβος και η επίδραση στην αισθητική ή το οπτικό περιβάλλον της περιοχής.

Η επιφάνεια που απαιτείται για την εγκατάσταση και σωστή λειτουργία ενός σταθμού Α/Γ είναι αρκετά μεγάλη. Ενοχλήσεις μπορούν να θεωρηθούν ο θόρυβος και η επίδραση στην αισθητική ή το οπτικό περιβάλλον της περιοχής. Η ανεμογεννήτρια εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια του ανέμου για να παράγει ηλεκτρισμό. Στις μέρες μας ο πιο γνωστός τύπος ανεμοκινητήρα, που έχει εφαρμοσθεί ευρύτατα στην πράξη είναι ο δρομέας οριζοντίου άξονα. (Γληνού, 2005, Σοφινίδης, 2006)

Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε πύργο στήριξης ώστε να μεγιστοποιείται η παραγωγή τους λόγω της μη στρωτής ροής ανέμου κοντά στο έδαφος. Σε μερικές περιοχές κάθε 10 μέτρα ύψος, η ταχύτητα ανέμου μπορεί να αυξάνεται κατά 20% και η παραγωγή ενέργειας κατά 34%. Ο βαθμός απόδοσης των ανεμογεννητριών ονομάζεται και συντελεστής ισχύος και δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A}$$

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα. Στην πρώτη κατηγορία, ο δρομέας είναι τύπου έλικας και είναι συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους. Ο δρομέας της δεύτερης κατηγορίας παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους

Η συγκομιδή αιολικής ενέργειας υπήρξε μία από τις πιο μελετημένες μεθόδους για μεγάλης κλίμακας μάζευση ενέργειας. Η βασική ιδέα αυτής της προσέγγισης συνίσταται στη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια μέσω λεπίδων και εργαλείων. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι αποτελεσματικές για μικρής κλίμακας φορητές εφαρμογές, καθώς είναι λιγότερο ευαίσθητες στο misalignment και μπορούν να λειτουργήσουν σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου με επαρκή ροπή. (Γληνού, 2005, Σοφινίδης, 2006)

Γενικώς, η ισχύς ( $P_{wind}$ ) που μπορεί να συγκομισθεί από μια ανεμογεννήτρια μπορεί να προέρχεται από την κινητική ενέργεια  $E$  μιας μάζας  $m$  του αέρα:

$$E = \frac{1}{2}mv^2,$$

Αν θεωρήσουμε το εμβαδόν της επιφάνειας της ανεμογεννήτριας  $A$ , η μάζα αέρα που διέρχεται από αυτή, δίνεται από τον τύπο.

$$\dot{m} = \rho A v,$$

Τέλος, η ισχύς που αποδίδεται από τον αέρα που ρέει διαμέσου των πτερυγίων ισούται με:

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\rho A v^3$$

Ωστόσο, καθώς πολλοί μηχανισμοί μετατροπής παρεμβαίνουν στη ροή της ενέργειας, αυτή η ισχύς είναι το υψηλότερο όριο της πρακτικά διαθέσιμης τιμής. Οι βασικοί περιορισμοί προκύπτουν κατά το μηχανικό στάδιο (συμπεριλαμβανομένης της απόδοσης μετατροπής αιολικής-προς-μηχανική, η οποία θεωρητικά περιορίζεται στο 0,59 από το όριο Betz), καθώς και τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Για μια συνολική απόδοση μετατροπής 5%, ταχύτητα ανέμου  $3 \text{ ms}^{-1}$ , και μία επιφάνεια  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , η ισχύς που μπορεί να αναμένεται από μια μικρής κλίμακας ανεμογεννήτρια θα είναι περίπου της τάξης των 8 mW. (Γληνού, 2005, Σοφιανίδης, 2006)

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή της ανεμογεννήτριας αποτελείται από την μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική. Το κύριο συστατικό αυτού του σταδίου είναι ο σχεδιασμός της λεπίδας. Στην περίπτωση της μεσαίας έως μεγάλης κλίμακας ανεμογεννητριών, οι λεπίδες έχουν συνήθως ένα σχήμα πτέρυγας, αλλά μια τέτοια διαμόρφωση δεν είναι βέλτιστη σχετικά με τις φορητές ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Μεταξύ των διαφόρων σχημάτων του σχεδιασμού λεπίδας, τα δύο πιο ενδιαφέροντα για συσκευές μικρής κλίμακας παραμένουν η Darrieus (lift-based) και η Savonius (drag-based). Το τελευταίο, αν και διαθέτει μια χαμηλότερη απόδοση, προσφέρει περισσότερη ροπή, η οποία οδηγεί σε μία χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου εκκίνησης.

Μια άλλη κοινή μέθοδος για τον έλεγχο της αναλογίας μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου και της προκύπτουσας ροπής στηρίζεται στη χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Παρ'όλα αυτά, η χρήση των πρόσθετων εξαρτημάτων μπορεί να μειώσει σημαντικά την συνολική απόδοση της συσκευής.

Αφού η αιολική ενέργεια έχει μετατραπεί σε κυκλική μηχανική ενέργεια, το επόμενο βήμα συνίσταται στον μετασχηματισμό σε ηλεκτρική ενέργεια. Δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια συζητούνται κατωτέρω, αν και υπάρχουν επίσης και άλλες προσεγγίσεις (π.χ., ηλεκτροστατικές, ηλεκτρο ή magnetoelectric).

Ο κλασσικός τρόπος για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια αποτελείται από τη χρήση μαγνητικών κινητήρων. Αυτός ο μηχανισμός μετατροπής βασίζεται στην μετατροπή μέσω της χρήσης μαγνητικής ζεύξης.

Στο πλαίσιο συσκευών μικρής κλίμακας συσκευές, οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες προσφέρουν την καλύτερη επιλογή. Οι ηλεκτροκινητήρες μπορεί να προσφέρουν AC ή DC τάσεις εξόδου, η τελευταία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την τροφοδότηση σε ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης. (Γληνού, 2005, Σοφινίδης, 2006)

Ωστόσο, η χρήση ενός μαγνητικού κινητήρα για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας που παράγεται από τον άνεμο σε ηλεκτρική ενέργεια πάσχει από αρκετά μειονεκτήματα. Πρώτον, οι ηλεκτρομαγνητικοί κινητήρες συνήθως απαιτούν μια μη αμελητέα ροπή εκκίνησης και κάποια RPM για να μεγιστοποιήσουν την αποτελεσματικότητά τους. Ως εκ τούτου, η χρήση ενός προσαρμοστικού κιβωτίου ταχυτήτων απαιτείται, το οποίο όχι μόνο αυξάνει το μέγεθος της συσκευής, αλλά επίσης μειώνει τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος. Επιπροσθέτως, μπορεί να αυξήσει την ελάχιστη απαιτούμενη ροπή για την εκκίνηση. Η τάση ανοικτού κυκλώματος της γεννήτριας με  $n$  ζεύγη μόνιμων μαγνητών και περιελίξεις σε μια ταχύτητα περιστροφής δίνεται ως:

$$V_{mag} = K \Phi n \Omega,$$

$$P_{mag} = \frac{1}{4r_{mag}} (K \Phi n \Omega)^2$$

$$\Gamma_{mag} = (K \Phi n)^2 \frac{\Omega}{2r_{mag}};$$

Για να αντισταθμιστεί η ελάχιστη ροπή και οι απώλειες που προκαλούνται από το σύστημα μετάδοσης, ο Priya πρότεινε τη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων για τη μετατροπή από τον άνεμο σε ηλεκτρική (μέσω μηχανικής) ενέργεια. Οι αρχές της παρούσας έννοιας αποτελούνται από μηχανικά πώματα που συνδέονται με το περιστρεφόμενο άξονα που επηρεάζει τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, ως εκ τούτου, την επαγωγή δονήσεων και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μία τέτοια συσκευή επιτρέπει τη συγκομιδή έως 7,5 mW με δέκα bimorphs και διαθέτει cut-in ταχύτητα του ανέμου (δηλαδή, ελάχιστη ταχύτητα του ανέμου για τη λειτουργία) της τάξης των

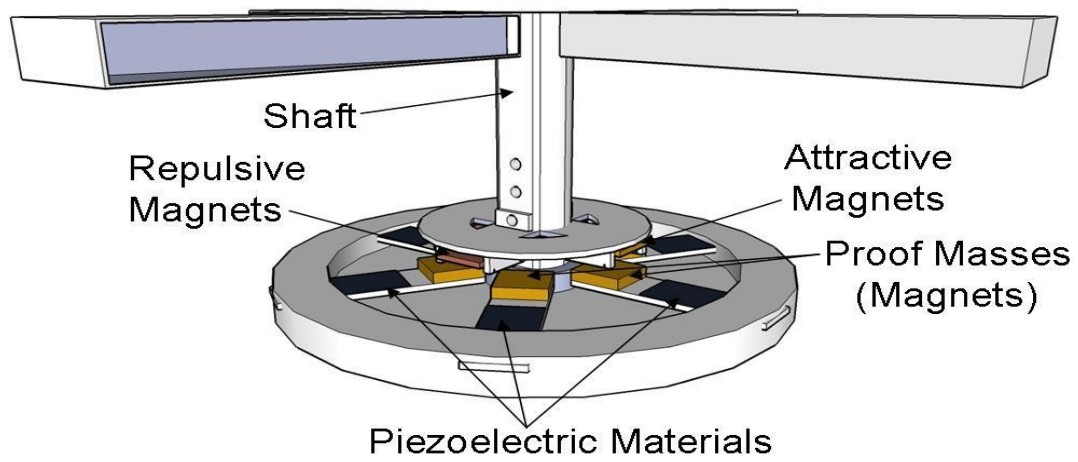


2.2 ms<sup>-1</sup>. Επιπλέον, το μέγεθος της ανεμογεννήτριας μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση ενός μηχανισμού που μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε μετάθεσης, για παράδειγμα, με τη χρήση ενός σχεδιασμού στροφαλοφόρου άξονα, αν και ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει έναν πρόσθετο μηχανισμό μετατροπής που μπορεί να μειώσει τη συνολική αποτελεσματικότητα της συσκευής. (Γληνού, 2005, Σοφιανίδης, 2006)

Ωστόσο, η χρήση μηχανικών στοπ ακόμα προκαλεί ορισμένα αποτελέσματα τριβής που πρέπει να ξεπεραστούν και μειώνει τη διάρκεια ζωής της συσκευής. Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα, προτείνεται ένα άλλο είδος της διέγερσης μέσω ανέπαφης σύζευξης μεταξύ του άξονα και των πιεζοηλεκτρικών bimorphs. Οι αρχές της ανέπαφης ανεμογεννήτριας βασίζονται σε μαγνήτες για να προκαλέσουν δονήσεις στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Ενώ οι μαγνήτες κατά το άκρο κάθε δίμορφου έχουν την ίδια πολικότητα, οι μαγνήτες επί της ατράκτου συνδέονται έτσι ώστε όταν ένας μαγνήτης εφαρμόζει μια ελκτική δύναμη, ο άλλος να εξασκεί μία απωστική δύναμη. Μια τέτοια προσέγγιση, ως εκ τούτου, επιτρέπει στις ροπές αντίστασης που δημιουργούνται από την μαγνητική σύζευξη να ακυρωθούν, ως εκ τούτου, μειώνοντας δραματικά την ταχύτητα εκκίνησης του ανέμου και την αύξηση των ικανοτήτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της συσκευής λόγω των υψηλότερων ταχυτήτων περιστροφής για μέτριους ανέμους. Ως εκ τούτου, μια τέτοια διαμόρφωση αποδίδει σε ταχύτητες εκκίνησης ανέμου από 1 ms<sup>-1</sup> και μέγιστη ισχύ εξόδου 3 mW ανά πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας 6 bimorphs θα οδηγούσε σε μια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 18 mW).

Η ανέπαφη πιεζοηλεκτρική ανεμογεννήτρια μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει μηχανισμό στροφαλοφόρου άξονα για συμπαγή διαμόρφωση. Υποθέτοντας συμπεριφορά σταθερής κατάστασης και ημιτονοειδείς ταλαντώσεις των bimorphs, η μέγιστη ισχύς ανά πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μπορεί να ληφθεί από την κλασική παραγωγή στη περίπτωση της ενέργειας κραδασμών, αποδίδοντας

$$P_{piezo} = \frac{n\Omega}{2\pi} \frac{\alpha^2}{C_0} u_M^2,$$

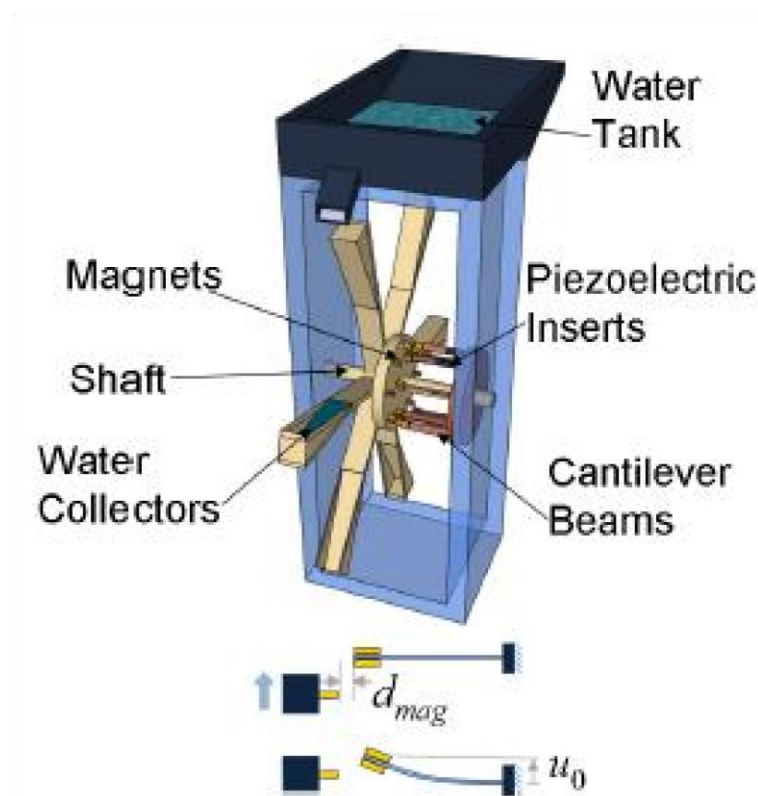


*Εικόνα 17- Πιεζοηλεκτρική Ανεμογεννήτρια*

(Γληνού, 2005, Σοφινίδης, 2006)

## Μικρής κλίμακας μάζευση ενέργειας από τη βροχή

Η άλλη πηγή χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας είναι η βροχή. Υπάρχουν λίγες έρευνες στη βιβλιογραφία σχετικά με τον τρόπο μετατροπής της ενέργειας της βροχής σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι Guigon et al. ανέλυσαν το μέγεθος της ενέργειας που θα μπορούσε να μαστευθεί από σταγόνες βροχής. Η χρήση ενός φίλμ PVDF (πολυβινυλιδενοφθοριδίου) περίπου 30 cm<sup>2</sup> που επηρεάστηκε από σταγόνες νερού της ελεγχόμενης μέγεθος, έδειξαν ότι ήταν δυνατή η συγκομιδή μέχρι 1 nJ από μια σταγόνα, που αντιστοιχεί σε 1 μW της στιγμιαίας ισχύος, και πρότειναν ότι μια τέτοια συσκευή θα μπορούσε να βελτιωθεί ώστε να επιτρέπει την ανάκτηση έως 25 μJ ενέργειας ανά σταγόνα.



Εικόνα 18- Συσκευή ενέργειας βροχής

(Harvesting Rain Fall, Bode)

Οι βασικές αρχές της συσκευής ενέργειας βροχής με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, είναι πολύ παρόμοια με εκείνες που συζητήθηκαν προηγουμένως, εκτός του ότι το rainmill

διαθέτει ασυνεχείς λειτουργίες (δηλαδή, παλμικές). Το προτεινόμενο σύστημα απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα και αποτελείται από έναν άξονα που είναι εξοπλισμένος με άκρα που συνδέονται με συλλέκτες νερού.

Ο άξονας διαθέτει επίσης μηχανικά στοπ ή μαγνήτες που αλληλεπιδρούν με πιεζοηλεκτρικά που συνδέονται με προβόλους στη βάση της συσκευής. Καθώς η βροχή γεμίζει τους συλλέκτες στο άκρο του βραχίονα, μια ροπή επάγεται, η οποία αντισταθμίζεται από τα στοπ σε επαφή με το πιεζοηλεκτρικό υλικό ή με τη μαγνητική σύζευξη στο ανέπαφο στοιχείο, κάμπτοντας τα πιεζοηλεκτρικά bimorphs.

Όταν η ροπή που εξασκείται από το νερό είναι επαρκής ώστε δεν υπάρχει πλέον επαφή μεταξύ των στοπ και των παραμορφωμένων πιεζοηλεκτρικών προβόλων, ή όταν η δύναμη που ασκείται από τους μαγνήτες εξουδετερώνεται, η άτρακτος περιστρέφεται, και τα bimorphs απελευθερώνονται. Ως εκ τούτου, ο πιεζοηλεκτρικός πρόβολος δονείται και παράγει ηλεκτρική ενέργεια έως το επόμενο πάμα να έρθει σε επαφή ή ο επόμενος μαγνήτης να ευθυγραμμιστεί με το δίμορφο. Μια δεξαμενή νερού επίσης προστέθηκε στη κορυφή του rainmill, η οποία αυξάνει την ενεργό επιφάνεια συγκομιδής νερού. Η προσθήκη αυτής της δεξαμενής νερού, επίσης, επιτρέπει στο rainmill να λειτουργεί κατά συνεχή τρόπο σε πιο ήπια βροχή.

Μια τέτοια προσέγγιση επιτρέπει παραγωγή ενέργειας της τάξης των  $10\text{-}100\text{ }\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$  (λαμβάνοντας υπόψη μόνο το ενεργό υλικό) σε συνεχή λειτουργία και  $1\text{ }\mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$  χρησιμοποιώντας PVDF ταινίες, οι οποίες είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συσκευή. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί επίσης να βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό αντικαθιστώντας το φιλμ PVDF με piezoelement, το οποίο χαρακτηρίζει ένας υψηλότερος συντελεστής σύζευξης.

Στην ιδιαίτερη περίπτωση του ανέπαφου rainmill, η χρήση μαγνητών αντίθετης πολικότητας επιτρέπει επίσης στην κρίσιμη μάζα να μειωθεί, καθώς η ροπή που προκαλείται από την μαγνητική σύζευξη ισοσταθμίζεται από τον άλλο μαγνήτη, το οποίο οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση της συσκευής. (Harvesting Rain Fall, Bode)

## Ενέργεια από “έξυπνους δρόμους”

Τα αδέρφια Pierre Curie και Jacques Curie όρισαν την έννοια του πιεζοηλεκτρικού φαινόμενου το 1880. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μετατρέπει τη μηχανική καταπόνηση σε τάση ή ηλεκτρικό ρεύμα και παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την κίνηση, το βάρος, τους κραδασμούς και τις αλλαγές θερμοκρασίας. (emereo.net)

Ένας πιεζοηλεκτρικός δίσκος δημιουργεί τάση όταν παραμορφώνεται. Θεωρώντας το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε λεπτή μεμβράνη από ζirkοτιτανικό μόλυβδο Pb (Zr, Ti) O<sub>3</sub> PZT, έχει αναπτυχθεί η συσκευή MEMS παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατά την πρόσφατη βελτίωση στην πιεζοηλεκτρική τεχνολογία, ο Aqsa Abbas (ενεργό μέλος της IEEE Computer Society ) διαφοροποίησε δύο τρόπους που ονομάζονται <sup>d31</sup> και <sup>d33</sup> στους μετατροπείς κραδασμών με στόχο τον εκ νέου σχεδιασμό για συντονισμό σε συγκεκριμένες συχνότητες από μια εξωτερική πηγή ενέργειας δόνησης, δημιουργώντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου χρησιμοποιώντας ηλεκτρομηχανική αποσβεσμένη μάζα.

Οι λεπτές ταινίες PZT έχουν προσελκύσει την προσοχή σε εφαρμογές όπως αισθητήρες δύναμης , επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, ενεργοποιητές, μεταβλητά οπτικά, αντλίες μικροηλεκτρονικής, σιδηροηλεκτρικές RAM, συστήματα απεικόνισης και έξυπνους δρόμους. Όταν οι πηγές ενέργειας είναι περιορισμένες, η μάζασηση ενέργειας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο περιβάλλον. Οι έξυπνοι δρόμοι έχουν τη δυνατότητα να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας . Η ενσωμάτωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού στο δρόμο μπορεί να μετατρέψει την πίεση που ασκείται από τα κινούμενα οχήματα σε ρεύμα.

Δεδομένου ότι η ενεργειακή ζήτηση και η έντονη κυκλοφορία οχημάτων στους δρόμους συσχετίζονται, προκύπτει η ιδέα μιας συσκευής που θα συλλέξει την ενέργεια από τα οχήματα που κινούνται στην επιφάνεια του δρόμου και θα τη μετατρέψει σε ηλεκτρική. Για αυτό, η ενσωμάτωση συσκευής από πιεζοηλεκτρικό υλικό κάτω από την επιφάνεια των δρόμων μπορεί να παρέχει τη μετατροπή της πίεσης που ασκείται από τα κινούμενα οχήματα σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η μέθοδος

χρησιμοποιεί μία συσκευή παραγωγής ηλεκτρικής που εγκαθίσταται κάτω από το οδόστρωμα. Η συσκευή παραγωγής ηλεκτρικής περιλαμβάνει μία πλάκα πίεσεως που καλύπτεται με ένα ή περισσότερα στρώματα προστασίας που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του δρόμου. (emereo.net)

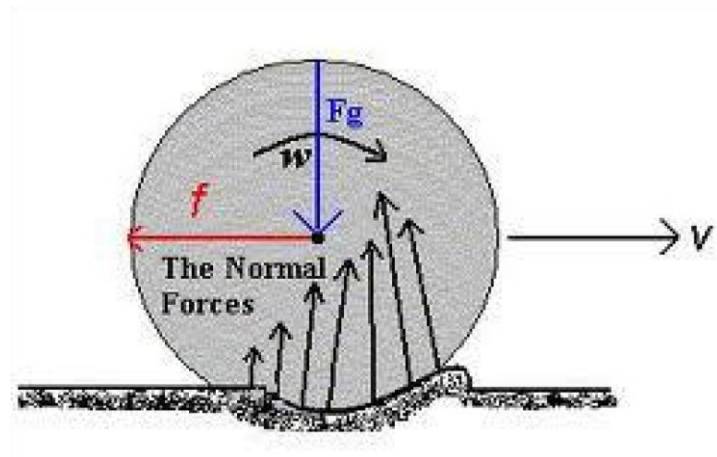
Σε αυτή τη διαδικασία, το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ενσωματωμένο κάτω από το δρόμο με την ηλεκτρική συσκευή παραγωγής. Για ένα δρόμο με ενσωματωμένες πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες, μέρος της ενέργειας που το όχημα εγχέει στην παραμόρφωση του δρόμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια (μέσω άμεσων συσκευών που λειτουργούν με το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) αντί να χάνεται ως θερμική ενέργεια (θερμότητα).



*Εικόνα 19- Πλάκες πίεσεως*

Αυτή η ηλεκτρική συσκευή παραγωγής περιλαμβάνει πλάκες πίεσεως που καλύπτονται με στρώμα προστασίας ή ασφαλτο όπως δείχνεται στο ακόλουθο σχήμα.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μετατρέπει τη μηχανική καταπόνηση σε ηλεκτρικό ρεύμα ή τάση και το σύστημα αναμένεται να κλιμακωθεί μέχρι και σε 400 κιλοβάτ για 1 χιλιόμετρο διπλής κατεύθυνσης. Η μηχανική δύναμη παρέχεται από τον τροχό του οχήματος του αυτοκινήτου, όπου οι βαρυτικές δυνάμεις (βάρος) είναι κάθετες προς την επιφάνεια του δρόμου και προκαλούν συμπίεση, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.



Εικόνα 20- Βαρυντικές δυνάμεις σε πλάκα πίεσεως

(emereo.net)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΛΑΔΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

### **Πιεζοηλεκτρικές επιδράσεις υλικών**

Σ' αυτήν την ενότητα θα γίνει εισαγωγή στον κόσμο της πιεζοηλεκτρικής επίδρασης που διαμορφώνει την υποκείμενη βάση για τα προϊόντα που ποικίλουν ανάμεσα σε μικρόφωνα και ηχεία, χιονοπέδιλα μειωμένης δόνησης, κουμπιά κουδουνιών, και σε έναν ατέλειωτο αριθμό από αισθητήρες και μικρούς ενεργοποιητές. Όλες αυτές οι συσκευές περιλαμβάνουν τη χρήση πιεζοηλεκτρικού υλικού στο οποίο μια εφαρμοσμένη μηχανική δύναμη παράγει μια παραμόρφωση που με τη σειρά της παράγει ηλεκτρική τάση, ή αντίστροφα, μια εφαρμοσμένη τάση που προκαλεί μια μηχανική παραμόρφωση στο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσει μια δύναμη. Αυτό το γενικό φαινόμενο ονομάζεται πιεζοηλεκτρική επίδραση.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρήθηκε από τους αδελφούς Pierre και Jacques Curie το 1880 όταν ήταν σε ηλικία 21 και 24 ετών αντίστοιχα. Παρατήρησαν ότι όταν εφαρμόζεται πίεση σε ένα πολωμένο κρύσταλλο, η μηχανική παραμόρφωση που επιφέρεται, είχε σαν αποτέλεσμα την ηλεκτρική φόρτιση. Το φαινόμενο βασίζεται σε μια αναστρέψιμη ενέργεια μετατροπής ανάμεσα στις ηλεκτρικές και μηχανικές μορφές που προκύπτουν φυσικά στα μόνιμα πολωμένα υλικά μέσα στα οποία κάποια μέρη των μορίων τους είναι θετικά φορτισμένα και άλλα μέρη είναι αρνητικά φορτισμένα. Πολλοί φυσικά βρήκαν ότι τα κρύσταλλα (π.χ. ο χαλαζίας) διακατέχονται από αυτήν την ιδιότητα, όπως πολλά από τα πρόσφατα αναπτυγμένα πολυμερή και κεραμικά. Αυτή η ιδιότητα περιέργως είναι παρεμφερής με εκείνη που έχει βρεθεί στους μαγνήτες όπου προκύπτει μόνιμη μαγνητική πόλωση, μόνο που εδώ έχουμε να κάνουμε με τις ηλεκτρικές φορτίσεις.

Στα πιεζοηλεκτρικά υλικά, κάθε κέλυφος ή μόριο είναι ένα δίπολο με θετικές και αρνητικές φορτίσεις σε κάθε άκρη. Υπάρχει ευθυγράμμιση των εσωτερικών ηλεκτρικών δίπολων. Αυτή η ευθυγράμμιση μπορεί να καταλήξει σε μια επιφάνεια φόρτισης, όμως αυτή η φόρτιση ουδετεροποιείται από τις παρούσες ελεύθερες φορτίσεις στην ατμόσφαιρα που τα περιβάλλει. Εφαρμόζεται μια δύναμη στο



πιεζοηλεκτρικό υλικό που προξενεί τις παραμορφώσεις, που με τη σειρά του μεταβάλλει την ουδετεροποιημένη κατάσταση της επιφάνειας με την αλλαγή του προσανατολισμού των δίπολων. Μπορεί να επιτευχθεί και η αντιστροφή. Η εφαρμογή της τάσης προκαλεί την ευθυγράμμιση των πολωμένων μορίων με το ηλεκτρικό πεδίο, που με τη σειρά του προκαλεί την ανάπτυξη της παραμόρφωσης. Η πιεζοηλεκτρική επίδραση έχει προ καιρού αξιοποιηθεί σε πολλές διαφορετικές συσκευές. Η, προφανώς, επιθυμητή ιδιότητα όπου η πίεση παράγει τάση χρησιμοποιείται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Στα κουδούνια της πόρτας, μια εφαρμοσμένη δύναμη παράγει τάση, που με τη σειρά της χρησιμοποιείται για να ελέγξει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλώντας το εκνευριστικό στ' αυτιά κουδούνισμα ή το ευχάριστο βουητό. Στον λαμπτήρα άνθρακα, που αναφέρθηκε παραπάνω, η εφαρμογή μιας δύναμης σε μια πιεζοηλεκτρική συσκευή προκαλεί μια ανάφλεξη σπινθήρα. Είναι λιγότερο προφανές σε πολλούς ανθρώπους, όμως χρησιμοποιούνται ευρέως, μια πλειάδα πιεζοηλεκτρικών συσκευών με χρήση μικρών ενεργοποιητών που ελέγχονται με ηλεκτρισμό και χρησιμοποιούνται σε έναν μεγάλο αριθμό μηχανικών και βιομηχανικών περιπτώσεων όπου μια μικρή τάση προκαλεί και κίνηση ενός μέρους το οποίο ελέγχει κάτι άλλο, όπως η βαλβίδα.

Η πιεζοηλεκτρική επίδραση είναι κυριολεκτικά στιγμιαία και οι πιεζοηλεκτρικές συσκευές μπορούν να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε μικρές πιέσεις ή τάσεις. Πολλά μικρόφωνα που βασίζονται σε πιεζοηλεκτρικά υλικά μετατρέπουν μια ακουστική πίεση σε τάση. Εναλλακτικά, στα πιεζοηλεκτρικά ηχεία, η εφαρμογή ηλεκτρικής φόρτισης προκαλεί τη μηχανική παραμόρφωση, που με τη σειρά της δημιουργεί ακουστική πίεση.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί σε χιονοπέδιλα προκειμένου να εξαλείψουν τις ανεπιθύμητες δονήσεις που προκύπτουν κάτω από ορισμένες συνθήκες. Εδώ, η πιεζοηλεκτρική επίδραση εξαφανίζει τις δονήσεις μέσω της διασκόρπισης της ηλεκτρικής ενέργειας που αναπτύσσεται κατά μήκος μιας διακλάδωσης. Άλλες περιπτώσεις σε πολλά προϊόντα, που εμπεριέχουν δονητικές κινήσεις, μπορούν επιλεκτικά να εξαλειφθούν χρησιμοποιώντας παρεμφερείς τεχνολογίες.

## Μεταφορές

Στις μεταφορές, η μεγαλύτερη προσπάθεια στην Έρευνα και Ανάπτυξη των έξυπνων υλικών είναι στον κλάδο της στρατιωτικής αεροπορίας, ακολουθεί η αυτοκινητοβιομηχανία και η ναυτιλία. Στον κλάδο των σιδηρόδρομων φαίνεται να υπάρχει μικρή εφαρμογή, ίσως λόγω του συντηρητισμού και την έλλειψη επενδύσεων.

Οι απαιτήσεις για έξυπνα υλικά στον κλάδο των μεταφορών μπορούν να γενικευτούν. Για παράδειγμα, υπάρχει ανάγκη για υλικά με καλύτερες λειτουργικές ιδιότητες όπως τον πιεζοηλεκτρισμό ή την επίδρασης της μνήμης του μεγέθους. Η συναρμολόγηση των έξυπνων υλικών για να καταστήσουν την δομή «έξυπνη» ή ευφυή είναι επίσης σημαντική και αυτό, συγκεκριμένα, ήταν το εμπόδιο για την εξερεύνηση σ' αυτόν το κλάδο. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

## Αεροπλοΐα

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, σημαντικά προγράμματα έχουν χρηματοδοτηθεί από φορείς όπως τα Εργαστήρια Έρευνας της Αεροπορίας, τα Εργαστήρια Έρευνας του Στρατού, το Εργαστήριο Έρευνας του Ναυτικού, το Εργαστήριο Αεριωθητήρα και τη NASA, καθώς επίσης τις μεγάλες αεροδιαστημικές εταιρίες. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των χρηματοδοτήσεων έχει κατευθυνθεί σε πανεπιστήμια των Η.Π.Α., τα οποία παράγουν έναν αριθμό πετυχημένων SMEs(έξυπνων υλικών). Πιο συγκεκριμένα, οι Η.Π.Α. έχουν επικεντρωθεί στην προσπάθεια για έρευνα των ενεργών έξυπνων υλικών σ' αυτόν τον κλάδο και κατά συνέπεια είναι ο ηγέτης παγκοσμίως.

Στην Ευρώπη, υπάρχουν μικρότερες πρωτοβουλίες που αφορούν προγράμματα χρηματοδοτούμενα από την Ευρωπαϊκή Ένωση, προγράμματα αμύνης χρηματοδοτούμενα από την Ένωση Δυτικής Ευρώπης και της αεροδιαστημικές εταιρίες, ιδιαίτερα εκείνες που τώρα κατασκευάζουν Ευρωπαϊκά Συστήματα Αεροδιαστήματος και Άμυνας. (EADS – European Aerospace Defence Systems). (Μέγα, 2006)

Άλλες εταιρίες όπως η MBDA και η Dassault καθώς επίσης και άλλοι οργανισμοί όπως το Γερμανικό Κέντρο Έρευνας Αεροδιαστήματος, (DLR), το Ολλανδικό

αντίστοιχο (NLR) και άλλα ερευνητικά ιδρύματα και εταιρίες έχουν επίσης αναμειχθεί και στις παθητικές εφαρμογές (που έχουν να κάνουν μόνο με την αίσθηση) όπως ο δομικός έλεγχος της υγείας αλλά και σε ενεργές εφαρμογές.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, η δραστηριότητα είναι σε μικρότερο βαθμό, με τις προσπάθειες να επικεντρώνονται σε παθητικές εφαρμογές όπως την υγεία και τη χρήση συστημάτων ελέγχου (HUMS) για τον έλεγχο των μηχανών και ανίχνευση των ζημιών. Στα ελικόπτερα, τα διαγνωστικά της δόνησης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των κιβωτίων ταχυτήτων για ζημιές και υπάρχει ανάγκη για επέκταση στην ανίχνευση ζημιών στα πτερύγια. Διερευνώνται επίσης οι εφαρμογές στο περίγραμμα των ενεργών πτερυγίων και στα συστήματα ελέγχου της ενεργής δόνησης, όμως η δύναμη και οι μετατοπίσεις που απαιτούνται είναι πρόβλημα στα παρόντα υλικά, και έχει σαν αποτέλεσμα τις απαιτήσεις υψηλής δυναμικότητας πυκνότητας για τέτοιες εφαρμογές. Η χρήση των έξυπνων υλικών όπως τα πιεζοηλεκτρικά ινώδη συνθετικά μπορούν να βοηθήσουν στην έρευνα, όμως η ανάπτυξη αυτού του τύπου του υλικού είναι στα πρώιμα στάδια και συνεπώς η εφαρμογή του είναι ακόμη μακριά. (Μέγα, 2006)

Αεροπλάνα που θα ελέγχουν την καταπόνησή τους σε όλη τη διάρκεια της πτήσης και θα έχουν έτοιμη την αναφορά τους στον υπολογιστή σε συνδυασμό με υλικά που θα αυτοεπισκευάζονται προετοιμάζει η τεχνολογία για τον επόμενο αιώνα. Και θα πετύχει εκείνο που ως σήμερα δεν έχει γίνει πραγματικότητα: να μειωθεί ή και να αποτραπεί η επικίνδυνη καταπόνηση.

Μέχρι σήμερα, όσο και αν εξελίχθηκε η τεχνολογία στην κατασκευή και επιθεώρηση των αεροσκαφών, ποτέ δεν έπαψαν να γίνονται ατυχήματα, συχνά μάλιστα με πολλά θύματα. Όπως εμφανίζεται η γήρανση σε κάθε ζωντανό οργανισμό έτσι και σε σύνθετες κατασκευές η κόπωση των υλικών συχνά έχει ολέθρια αποτελέσματα. Οι προσπάθειες της επιστήμης συγκεντρώνονται στις οπτικές ίνες που, διατρέχοντας ουσιαστικά ένα μεγάλο μέρος τους αεροπλάνου, θα προσθέσουν υψηλής τεχνολογίας νευρικό σύστημα στα έως χθες «άψυχα» αεροπλάνα. Οι οπτικοί αισθητήρες θα βλέπουν για αεροδυναμικές δυνάμεις, θα προσδιορίζουν ζημιές που οφείλονται σε χτυπήματα θα μπορούν ακόμη και να ψάχνουν για αλλαγές στα υλικά λόγω διάβρωσης. Δικαιολογημένα λοιπόν η κόπωση των υλικών στα αεροπλάνα απασχολεί

πολύ σοβαρά σχεδιαστές, μηχανικούς και το ειδικό προσωπικό εδάφους στα αεροδρόμια. (Μέγα, 2006)

Ωστόσο η επιθεώρηση για μικροσκοπικές ρωγμές στο υλικό είναι μια πολύ επίπονη διαδικασία. Σε κάθε προσγείωση γίνονται έλεγχοι με γυμνό μάτι ώστε να εντοπισθούν τα περισσότερα εμφανή σημεία. Επιπλέον σε τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται και εκτεταμένη επιθεώρηση με ειδικά τεχνικά μέσα, όπως άλλωστε προβλέπεται από τους κανονισμούς. Είναι εκείνη η περίπτωση που οι τεχνικοί στην κυριολεξία γδύνουν το αεροπλάνο απ' όλο τον πρόσθετο εξοπλισμό. Είναι αυτό ακριβώς το σημείο που χρησιμοποιούνται τα καλύτερα τεχνικά μέσα, όπως οι συσκευές υπέρηχων. Όμως μια τόσο αναλυτική επιθεώρηση απαιτεί αρκετό χρόνο για να ολοκληρωθεί ώστε οι τεχνικοί να σχηματίσουν μια πλήρη εικόνα.

Υπολογίζεται πάντως ότι αν όντως τα συστήματα αυτά αποδειχθούν και στην πράξη αποτελεσματικά τότε το κόστος συντήρησης θα μειωθεί στο μισό. Ενδεικτικό είναι ότι οι αεροπορικές εταιρείες δαπανούν περί τα 30 δισ. δολάρια για τη συντήρηση κάθε χρόνο. Τα παραδείγματα, όπως παρουσιάζονται από την προοπτική των πραγμάτων σήμερα, είναι πάρα πολλά. Έξυπνες πτέρυγες και χώροι αποσκευών που θα προειδοποιούν για ρωγμές στο υλικό κατασκευής. Ίσως τα συστήματα να προβαίνουν ακόμη και σε επισκευές, όπου και όταν θα είναι εφικτό. Πίσω από κάθε έλεγχο, αλλά και κάθε σχετική ενέργεια θα είναι ένα ισχυρός υπολογιστής κατάλληλα προγραμματισμένος. Με αλλά λόγια, η αεροπλοΐα, με την εξαιρετικά γρήγορη και εξειδικευμένη εξέλιξη της τεχνολογίας, εισέρχεται σε μια άλλη εποχή. Όλες οι διαδικασίες για τον έλεγχο και την επισκευή των αεροπλάνων θα βρίσκονται κάτω από την κοινή ομπρέλα της αυτοεπιτήρησης. Και όπως εύκολα μπορεί να καταλάβει κανείς όλα θα αλλάξουν σε ένα τόσο ευαίσθητο χώρο. Από τον εντοπισμό και την καταγραφή κάθε μεμονωμένου προβλήματος μέχρι τον τρόπο επισκευής, το κόστος και το χρόνο για την ολοκλήρωσή της. Το σημαντικό όμως είναι ότι έτσι τα σκάφη θα γίνουν ασφαλέστερα.

Αυτοθεραπευόμενα υλικά ανέπτυξαν ερευνητές, που έχουν δημιουργήσει το πρώτο υλικό που επισκευάζεται αυτόματα, και που προσφέρει έναν δυναμικό τρόπο για την στεγανοποίηση τριχοειδών ρωγμών που αναπτύσσονται σε σύνθετα υλικά, και που χρησιμοποιούνται σε πολλά είδη, από τις ρακέτες αντισφαίρισης έως στα αεροσκάφη.

Το μυστικό των επιστημόνων: μικροσκοπικές κάψες κόλλας που προστίθενται στο σύνθετο υλικό. (Μέγα, 2006)

Ο Scott White, ένας καθηγητής της Αεροναυτικής Εφαρμοσμένης Μηχανικής στο Πανεπιστήμιο του Ιλλινόις Urbana-Champaign, που καθοδηγεί τη μελέτη ισχυρίζεται ότι αυτά τα έξυπνα αυτοθεραπευόμενα υλικά έχουν έναν τεράστιο αριθμό εφαρμογών. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ίνες γυαλιού, άνθρακα ή άλλων ουσιών με ανάμιξη μιας ρητίνης. Το fiberglass είναι ένας τύπος σύνθετου υλικού. Η ζημία στα σύνθετα υλικά αρχίζει συχνά ως μικροσκοπικές ρωγμές. Δεδομένου ότι όταν αυξάνονται, αποδυναμώνουν το υλικό έως ότου σπάσει. Για να θεραπεύσουν αυτόματα τις μικροσκοπικές ρωγμές, οι ερευνητές του Ιλλινόις ψέκασαν κάψουλες στο πάχος μιας ανθρώπινης τρίχας, μέσω ενός πειραματικού fiberglass παρόμοιας σύνθεσης. Όταν μια ρωγμή εμφανίστηκε, οι κάψουλες στην πορεία τους σπάζοντας άνοιξαν, ρίχνοντας το περιεχόμενό τους και έτσι σφράγισαν τις ρωγμές. Η ένωση διατήρησε το 75 τοις εκατό της αρχικής της δύναμης αφότου είχαν θεραπευτεί οι ρωγμές για 48 ώρες, ανέφεραν οι ερευνητές. Εντούτοις το υλικό δεν είναι ακόμα έτοιμο για την εμπορική παραγωγή. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 200 βαθμούς σταματά να δουλεύει και ο χρόνος της θεραπείας είναι πάρα πολύ μεγάλος για πολλές εφαρμογές. Το ευφυές αυτό υλικό περιέχει 100 έως 200 κάψουλες ανά κυβική ίντσα. Ενώ όλες οι κάψουλες θα σπάσουν τελικά, τα αντικείμενα που γίνονται με το έξυπνο αυτό υλικό θα μπορούσαν να διαρκέσουν αρκετές φορές πιο πολύ από εκείνα που είναι φτιαγμένα από τα τρέχοντα σύνθετα υλικά. Τα υλικά όπως είναι το συνθετικό αυτοθεραπευόμενο υλικό, είναι μέρος του τομέα των έξυπνων υλικών που βρίσκεται ακόμη σε νηπιακό στάδιο.

Αντικείμενα όπως διαστημικά σκάφη, τεχνητές συνδέσεις και υποστηρίξεις γεφυρών, που είναι δύσκολο ή αδύνατο να τα φτάσουμε, είναι πρωταρχικά υποψήφια για τα αυτοθεραπευόμενα υλικά. Τα "προσωπικά αεροσκάφη" που αντικαθιστούν το αγαπημένο αυτοκίνητο στα γκαράζ των ανθρώπων μπορούν ακόμα να βρίσκονται στη σφαίρα των κινούμενων σχεδίων επιστημονικής φαντασίας, αλλά οι ερευνητές στο ερευνητικό κέντρο Langley της NASA (LaRC) αναπτύσσουν τις εξωτικές τεχνολογίες που θα μπορούσαν να φέρουν ένα προσωπικό "αέροαυτοκίνητο" πιο κοντά στην πραγματικότητα. Και τα αέρα-αυτοκίνητα είναι ακριβώς η αρχή. (Μέγα, 2006)



*Εικόνα 21- Προσωπικά αεροσκάφη*

Αυτοθεραπευόμενα φτερά που λυγίζουν και αντιδρούν όπως οι οργανισμοί διαβίωσης, ευπροσάρμοστα βομβαρδιστικά αεροπλάνα που συμπεριφέρονται και ως ευκίνητα αεριωθούμενα μαχητικά, και σμήνη μικροσκοπικών τηλεκατευθυνόμενων αεροσκαφών, είναι όμοια ακριβώς με μερικά από αυτά που συναντάμε στην επιστημονική φαντασία, που αυτές οι τεχνολογίες της επόμενης παραγωγής θα μπορούσαν να καταστήσουν εφικτές σε μερικές δεκαετίες μπροστά.

Στον πυρήνα αυτού του επικείμενου κβαντικού πηδήματος στην αεροδιαστημική τεχνολογία είναι τα "έξυπνα υλικά" -- ουσίες με παράξενες ιδιότητες, όπως η δυνατότητα να λυγίσουν με μια εντολή, "να αισθανθεί" την πίεση, και να μετασχηματισθεί από υγρό σε στερεό όταν τοποθετείται σε ένα μαγνητικό πεδίο.

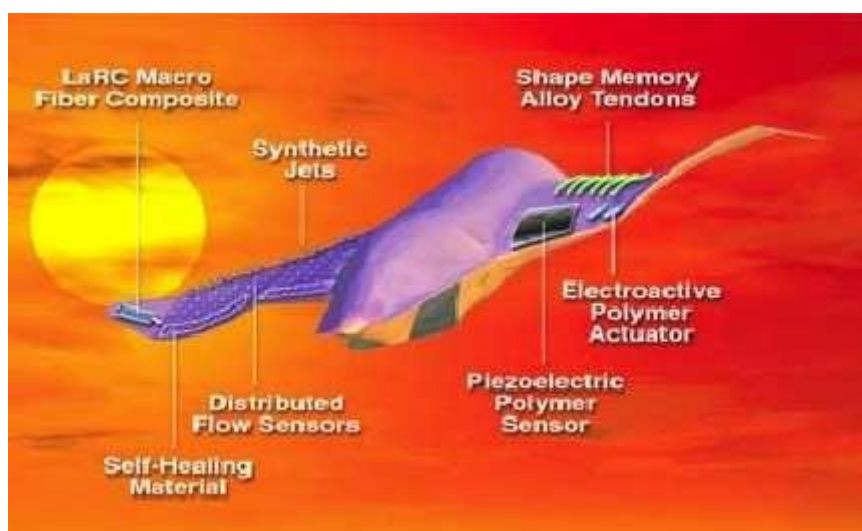
"Αυτή είναι τεχνολογία που οι περισσότεροι άνθρωποι δεν γνωρίζουν ακόμη πως υπάρχει," είπε η Anna McGowan, διευθύντρια προγράμματος για το έργο Morphing στο LaRC, το οποίο αναπτύσσει αυτές τις νέες τεχνολογίες. Ο στόχος του προγράμματος Morphing είναι να προβλεφθεί πως θα μοιάζει το αεροδιαστημικό design με τέμνοντα άκρα σε 20 έτη από τώρα και θα αρχίσει την ανάπτυξη των τεχνολογιών για να το κάνει πραγματικότητα.

Παραδείγματος χάριν, ένα προσωπικό αέρα-αυτοκίνητο πρέπει να είναι συμπαγές, όμως ικανό να πετάξει και με πολύ χαμηλές και με πολύ υψηλές ταχύτητες. "Ξέρουμε ότι για να πάρετε ένα όχημα μάρκας "Jetsons", πρόκειται πιθανώς να χρειαστείτε ένα φτερό που μπορεί να υποβληθεί σε μια ριζική διαμόρφωση," είπε η McGowan. "Το είδος φτερού που εσείς χρειάζεται σε πολύ χαμηλές ταχύτητες και το

είδος του φτερού που χρειάζεστε για τις υψηλές ταχύτητες είναι απολύτως διαφορετικά". Μερικά αεροπλάνα μπορούν σήμερα ήδη να επανακατευθύνουν τα φτερά τους, όπως τα F- 14 Tomcat του ναυτικού και το B-1 υπερηχητικό βομβαρδιστικό αεροπλάνο. Αυτά όμως τα αεροπλάνα χρησιμοποιούν άκαμπτα φτερά που τοποθετούνται στους μεγάλους, βαριούς άξονες, στο σώμα του αεροπλάνου. (Μέγα, 2006)

Αντίθετα, οι επιστήμονες του προγράμματος Morphing προβλέπουν ένα φτερό που θα ξεδιπλώνει με κάποια εντολή χρησιμοποιώντας κράματα μετάλλων "μνήμησχημάτων" ή άλλα νέα "έξυπνα" υλικά. Το υλικό του ίδιου του φτερού θα λύγιζε για να δημιουργήσει τη νέα μορφή.

Τα κράματα με μνήμη της μορφής έχουν την ασυνήθιστη ιδιότητα της αλλαγής πίσω στη αρχική μορφή τους με μεγάλη δύναμη όταν εφαρμόζεται ένα ορισμένο ποσό θερμότητας. Οποιαδήποτε μορφή μπορεί "να εκπαιδευθεί" στο κράμα ως αρχική μορφή της.



Εικόνα 22- Σύλληψη ενός καλλιτέχνη

Η σύλληψη ενός καλλιτέχνη που επεξηγεί μερικά από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που μπορούν να καθορίσουν τα αεροσκάφη λυγισμένων-ακρών σε 20 έτη από τώρα. Εκτός από τα αυτολυνγίζόμενα φτερά, αυτή η απόδοση παρουσιάζει πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες που παρέχουν σε πραγματικό χρόνο στοιχεία πίεσης, επιτρέποντας στο αεροπλάνο "να αισθανθεί" την κίνηση των φτερών του όπως τα πουλιά. Τα συνθετικά

αεριοθούμενα αεροπλάνα επιτρέπουν στο αεροπλάνο να αλλάξει καταλεπτώς τη ροή του αέρα πάνω από τα φτερά, που παρέχουν λεπτό αεροδυναμικό έλεγχο όπως κάνουν τα φτερά. Μεταξύ των εξωτικών "έξυπνων" υλικών που αναπτύσσονται από το πρόγραμμα Morphing, τα κράματα με μνήμη της μορφής είναι σχετικά συνηθισμένα.

Φανταστείτε μια σφαίρα που ρίχθηκε μέσω ενός φύλλου του υλικού, μόνο που να έχει το υλικό την ιδιότητα "να θεραπευτεί" αμέσως, και να γίνει όπως πριν από τη ρίψη της σφαίρας! Θυμηθείτε, αυτό δεν είναι επιστημονική φαντασία. Τα αυτοθεραπευόμενα υλικά υπάρχουν πραγματικά, και οι επιστήμονες του LaRC εργάζονται για να διευκρινίσουν τα μυστικά τους.

"Ότι κάναμε στη NASA- Langley ήταν βασικά να τεμαχίσουμε εκείνο το υλικό για να απαντήσει στην ερώτηση, "πώς το κάνει αυτό;" είπε η McGowan. "Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε πραγματικά να φτάσουμε κάτω στην υπολογιστική διαμόρφωση αυτών των υλικών σε μοριακό επίπεδο." "Μόλις καταλάβουμε τη συμπεριφορά του υλικού σε εκείνο το επίπεδο, κατόπιν μπορούμε να δημιουργήσουμε 'έξυπνα' υλικά σχεδιάζοντας τα", πρόσθεσε. (Μέγα, 2006)

Το LaRC αναπτύσσει επίσης τις προσαρμοσμένες παραλλαγές των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Αυτές οι ουσίες συνδέουν την ηλεκτρική τάση με την κίνηση. Εάν εσείς συστρέψετε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό παράγεται μια τάση. Αντιθέτως, εάν εφαρμόζετε μια τάση, το υλικό συστρέφεται.

Οι επιστήμονες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τέτοιες ιδιότητες να σχεδιάσουν τα πιεζοηλεκτρικά υλικά που λειτουργούν ως αισθητήρες πίεσης ή ως "ενεργοποιητές" -- συσκευές που δημιουργούν τις μικρές κινήσεις στις μηχανές, όπως την κίνηση των χτυπημάτων των φτερών.





*Εικόνα 23- Εύκαμπτη ταινία που περιέχει πιεζοηλεκτρικό υλικό*

Αυτή η λεπτή, εύκαμπτη ταινία περιέχει ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό που αποκρίνεται στην κάμψη, με την παραγωγή μιας τάσης που ανίχνευσε από τα ηλεκτρόδια που φαίνονται στο κατώτατο σημείο αριστερά της εικόνας. Συνδυασμένα με τη μικροηλεκτρονική, αυτά τα υλικά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μια ριζική πρόοδο στα σχέδια αεροπλάνων. "Όταν βλέπουμε 20 χρόνια μετά, στο μέλλον, βλέπουμε τα αεροπλάνα πως έχουν κατορθώσει να κάνουν αυτοαξιολόγηση και επισκευή σε real-time," είπε ο McGowan.

"Για να καταστήσετε όμως αυτήν την τεχνολογία πιθανή, θα πρέπει να κατανέμετε αυτούς τους ενεργοποιητές και αισθητήρες σ' όλο τα φτερά. Αυτό λειτουργεί παρόμοια με το πώς το ανθρώπινο σώμα λειτουργεί. Έχουμε τους μυς και τα νεύρα σε όλο το σώμα μας -- έτσι γνωρίζουμε το τι συμβαίνει στο σώμα μας και εμείς μπορεί να αποκριθούμε σε αυτό με διάφορους τρόπους." Η ομοιότητα με τη βιολογία δεν τελειώνει εκεί. Μια λεωφόρος του ερευνητικού project Morphing πρόκειται να εξετάσει πώς η φύση κάνει τα πράγματα να δουλεύουν καλά. Οι επιστήμονες ελπίζουν ότι μπορούν να πάρουν μαθήματα από αυτήν την κηδεμονία για να βελτιώσουν έτσι τα σχέδιά τους. (Μέγα, 2006)

"Τα πουλιά είναι τόσο πολύ πίο ευκίνητα από τα αεροπλάνα που έχουμε σήμερα. Τα πουλιά μπορούν να αιωρηθούν, μπορούν να πετάξουν προς τα πίσω και λοξά. Και τα έντομα αναποδογυρίζονται, κάνουν looping, όλα τα είδη των πραγμάτων." Anna McGowan, διευθύντρια προγράμματος στο ερευνητικό κέντρο Langley της NASA.

Η αποκαλούμενη "βιομιμητική", αυτή η πρακτική της εκμάθησης από τη φύση έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη -- μεταξύ άλλων -- ενός αντιγράφου του κόκκαλου.

Το κόκκαλο είναι πολύ ελαφρύ λόγω του πορώδους εσωτερικού του, αλλά είναι επίσης πολύ ισχυρό. Οι επιστήμονες του LaRC μπορούν να φτιάξουν δομές παρόμοιες με το κόκκαλο με την έγχυση πολυμερών μικροσφαιρών στα σύνθετα κελύφη της επιθυμητής μορφής, θερμαίνοντας ύστερα τις σφαίρες για να τα κάνουν να λιώσουν μαζί, σαν μικροσκοπικές φυσαλίδες σαπουνιών.

"Εάν μπορείτε να έχετε τη δύναμη και την ελαφρότητα αυτών των δομών όμοιων με τα κόκκαλα, για τις οποίες μιλώ, κατόπιν να προσθέσετε τους αισθητήρες όμοιους με τα νεύρα καθώς και αυτούς τους εύκαμπτους ενεργοποιητές, τότε πρόκειται να φτιάξετε, μια εξαιρετικά ελαφριά, πολύ ισχυρή, αυτο-αισθανόμενη, αυτοδραστηριούμενη δομή. " Συγκρίνετε εκείνο το όραμα με τα άκαμπτα, ναρκωμένα, βαριά αεροπλάνα του σήμερα, και θα πάρετε μια αίσθηση της δραματικής διαφοράς μεταξύ των "έξυπνων" υλικών που θα μπορούσαν να κάνουν στο αεροδιαστημικό design. (Μέγα, 2006)

Όπως με όλη την βασική επιστήμη, οι εφαρμογές αυτών των "έξυπνων" υλικών θα επεκταθούν και στις τεχνολογίες έξω από την αεροδιαστημική βιομηχανία. "Συνεργαζόμαστε πολύ στενά με δύο διαφορετικές ομάδες εμπορευματοποίησης, που χρηματοδοτούνται από τη NASA," είπε η McGowan, "και η προοπτική για αυτήν την τεχνολογία ανέρχεται σε παραγγελίες εκατομμυρίων εφαρμογών"

Εκτός όμως από το κολοσσιαίο ζήτημα της ασφάλειας, τα έξυπνα υλικά θα έχουν και άλλες περισσότερο ήπιες εφαρμογές. Ένα παράδειγμα είναι ότι τα υλικά αυτά κατά την διάρκεια της πτήσης θα δονούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνουν το θόρυβο που εισέρχεται στο χώρο των επιβατών. Σε μια ασφαλώς πιο προχωρημένη κατάσταση τα έξυπνα υλικά, σε συνεργασία και με άλλα συστήματα του αεροπλάνου, θα αλλάζουν σχετικά τη μορφή της πτέρυγας ακόμη και εν πτήσει ανάλογα με τις ανάγκες, την κλίση του ενώ στρέφεται, την αλλαγή ύψους πτήσης. Προβλέπεται μάλιστα στο μέλλον, αφού έτσι θα αλλάζει η αεροδυναμική συμπεριφορά, όταν εξελιχθούν σε μεγάλο βαθμό τα συστήματα αυτά να αντικαταστήσουν ακόμη και τα συστήματα κατεύθυνσης, όπως το πηδάλιο, τα πτερύγια ανόδου και καθόδου. Οι Αμερικανοί πάντως έφτιαξαν ένα τέτοιο σύστημα σε πειραματικό αεροπλάνο που για πρώτη φορά πέταξε το περασμένο έτος.

## Αυτοκινητοβιομηχανία

Είναι διδακτικό να εξεταστεί η επιτυχημένη χρήση των μικρο-ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων (MEMS – micro-electrical-mechanical systems) σαν αισθητήρες στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Για παράδειγμα, οι συσκευές MEMS χρησιμοποιούνται, για την ανάπτυξη των αερόσακων και του συστήματος που ξεκλειδώνει τα φρένα του αυτοκινήτου (ABS). Υπάρχουν σημάδια ότι αυτή η αγορά έχει αρχίσει να μεγαλώνει.

Μερικά «αληθινά» έξυπνα υλικά – ηλεκτροχρωμικά υλικά – χρησιμοποιούνται στον αυτόματο φωτισμό και τον έλεγχο της θερμότητας στην αυτοκινητοβιομηχανία (π.χ. οι καθρέφτες που θαμπώνουν και τα πίσω παράθυρα). Μια λιγότερο ώριμη εφαρμογή είναι η χρήση ενεργοποιητών σαν υποκατάστατα μικρών κινητήρων, όπου τα πλεονεκτήματα είναι το μειωμένο βάρος και οι λιγότερες βλάβες λόγω της μειωμένης πολυπλοκότητας. Επίσης η χρήση των έξυπνων υλικών για τη μείωση του θορύβου και της δόνησης είναι λιγότερο ώριμη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την βελτιωμένη άνεση και τα οφέλη ως προς την ασφάλεια, ειδικά για τους επαγγελματίες οδηγούς.

Επί του παρόντος γίνεται μια προσπάθεια στην αυτοκινητοβιομηχανία προς το φρενάρισμα και την οδήγηση «με σύρμα». Έχει υιοθετηθεί μια υβριδική και εξελικτική προσέγγιση, με τους ηλεκτρικούς κινητήρες να αντικαθιστούν τα μηχανικά μέσα των κινούμενων υδραυλικών. Ο απώτερος σκοπός είναι η πλήρης αντικατάσταση των υδραυλικών με συστήματα που είναι όλα ηλεκτρικά. Η χρήση των έξυπνων υλικών μπορεί να βοηθήσει σ' αυτόν τον σκοπό, όπου για παράδειγμα, θα απαιτηθεί έλεγχος της κατάστασης στο τακάκι του δισκόφρενου προκειμένου να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα των φρένων. Αυτό θα χρειαστεί μέτρηση της θερμοκρασίας, του πάχους του τακακίου και της δύναμης των φρένων. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

Έχουν αναπτυχθεί συστήματα ενεργής διαθεσιμότητας για την βελτίωση του ελέγχου του αυτοκινήτου και την άνεση του οδηγού. Η δυσκαμψία και η απόσβεση μπορούν να ελεγχθούν χρησιμοποιώντας συστήματα που περιλαμβάνουν ηλεκτρομαγνητορεολογικά υγρά, όμως έχουν προβλήματα με τη διάρκεια ζωής, με τη συναρμολόγηση των σωματιδίων, την υπερβολική κατανάλωση ενέργειας και το

κόστος. Οι περαιτέρω εξελίξεις σ' αυτά τα υλικά, και ίσως τα συστήματα που περιλαμβάνουν πιεζοηλεκτρικά υλικά θα μπορούσαν να ωφελήσουν τον κλάδο.

Μια περαιτέρω εφαρμογή των έξυπνων υλικών στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι η χρήση των πολυμερών που έχουν μνήμη σχήματος σ' αυτό που αποκαλείται «ατζαμής οδηγός», όταν οι παραμορφώσεις λόγω των μικρών συγκρούσεων μπορούν να εξαλειφθούν με την αντιμετώπιση του μαρσαρίσματος. (Η επίδραση της μνήμης σχήματος επιτρέπει στο αρχικό σχήμα της δομής να επανέλθει). Το κόστος βεβαίως και πάλι θα επηρεάσει την πιθανή ευρεία χρήση αυτής της τεχνολογίας.

Οι επιστήμονες της General Motors στο Κέντρο Έρευνας & Εξέλιξης της GM στο Warren, Michigan, έχουν προχωρήσει σε τεχνολογικές εξελίξεις με 'έξυπνα' υλικά, που θα είναι έτοιμα για μαζική παραγωγή σε οχήματα από το 2010 και μετά. «Τα έξυπνα υλικά θα αλλάζουν την εμφάνιση και αίσθηση των αυτοκινήτων και επαγγελματικών οχημάτων μας» δήλωσε ο Larry Burns, Αντιπρόεδρος Έρευνας & Εξέλιξης και Στρατηγικού Σχεδιασμού της GM. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

Με αυτά τα νέα υλικά, η λειτουργικότητα μπορεί να προγραμματιστεί 'εσωτερικά', επιτρέποντας σχεδιαστικές καινοτομίες, βελτιωμένη απόδοση και νέα, αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά που θα κάνουν τα αυτοκίνητά μας πιο συναρπαστικά σε εμφάνιση και λειτουργία σε σχέση με του παρελθόντος.

Αυτοί οι ενεργοποιητές και οι αισθητήρες μπορούν να παρέχουν σημαντικά οφέλη όταν χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση συμβατικών ηλεκτρικών και υδραυλικών συσκευών, μειώνοντας τη μάζα του οχήματος, το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του εξαρτήματος, και βελτιώνοντας την ευελιξία σχεδίασης, τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

## **Παραδείγματα**

Κάποιες ενδεικτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν ενεργές επιφάνειες οχημάτων, όπως σπόιλερ και εισαγωγές αέρα που προσαρμόζονται για τη διαχείριση της ροής αέρα, τη

βελτιωμένη αεροδυναμική και τις επιδόσεις καθώς και μηχανισμούς ανοίγματος καπό, θυρών και ντουλαπιών για πιο άνετη πρόσβαση.

Σύμφωνα με τον Alan Taub, εκτελεστικό διευθυντή Έρευνας & Εξέλιξης της GM, τα έξυπνα υλικά βασίζονται σε καινοτομίες προηγούμενων υλικών που η GM έχει λανσάρει τα τελευταία χρόνια. «Αυτά τα νέα έξυπνα υλικά αποτελούν τμήμα μίας μεγάλης λίστας ειδικών υλικών που ήδη χρησιμοποιούμε» δήλωσε ο Alan Taub.

«Κάποια παραδείγματα περιλαμβάνουν πρωτότυπες μεθόδους διαμόρφωσης αλουμινίου που επιτυγχάνουν βελτιωμένα πάνελ αμαξώματος και ελαφριά, πολυμερή νανο-συνθετικά που προσφέρουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες με χαμηλότερο κόστος, και μαγνητορεολογικά υγρά (MRF) για βελτιωμένα συστήματα πλαισίου (π.χ. αμορτισέρ)». (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

Τα εγγενή χαρακτηριστικά των κραμάτων SMA και των πολυμερών θα μπορούν να φέρουν επανάσταση στον τομέα των προηγμένων υλικών αυτοκινήτων, και τελικά να οδηγήσουν σε υποσυστήματα οχημάτων που θα αυτο-επισκευάζονται σε περίπτωση ζημιάς ή θα σχεδιάζονται με δυνατότητα να αλλάζουν χρώμα ή εμφάνιση.

Οι εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία τείνουν να απαιτούν υψηλό όγκο και υψηλή απόδοση, την ικανότητα να λειτουργούν σε ένα εχθρικό περιβάλλον και χαμηλό κόστος. Τα έξυπνα υλικά είναι πιθανό να επιτύχουν σ' αυτόν τον κλάδο αν μπορούν να αποδώσουν περισσότερες από μια λειτουργίες ή αν μπορούν να ενταχθούν με τέτοιο τρόπο που μειώνει τα κόστη συναρμολόγησης και παραγωγής.

## **Ναυσιπλοΐα**

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός προγραμμάτων που περιλαμβάνει την εφαρμογή των έξυπνων υλικών στον κλάδο του ναυτικού. Τα περισσότερα από αυτά έχουν σχέση με την άμυνα και είναι μετρίου μεγέθους. Περιλαμβάνουν την μέτρηση της τάνυσης σε ένα σύνθετο πηδάλιο, χρησιμοποιώντας ενσωματωμένες Bragg οπτικές ίνες σε μορφή πλέγματος (FOBG), μέτρηση της τάνυσης σε μεγάλη ίνα άνθρακα σύνθετου καταρτιού ενός γιωτ (χρησιμοποιώντας έναν παρόμοιο τύπο αισθητήρα), και τη μείωση της δόνησης σε πλοίο και αποβάθρες υποβρύχιου εξοπλισμού. Τα έξυπνα

υλικά όμως δεν χρησιμοποιούνται ακόμα ευρέως σ' αυτόν τον κλάδο. Μια πιθανή μελλοντική εφαρμογή είναι η αυτό-επιδιόρθωση των κατεστραμμένων κατασκευών κυρίων υποβρυχίως. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

### **Σιδηρόδρομος**

Ένας αριθμός εφαρμογών ελέγχου της κατάστασης έχουν αναπτυχθεί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σιδηροδρομικό υλικό (π.χ. έλεγχος στα τακάκια των φρένων, έλεγχος της κεραίας ρευματοληψίας της ηλεκτράμαξας, καθορισμός της ποιότητας της διαδρομής, μέτρηση της κατατομής της ρόδας, έλεγχος της μηχανής πάνω στη γραμμή). Ο έλεγχος της κατασκευής είναι ένα άλλο πεδίο, π.χ. ο εντοπισμός των συγκρούσεων σε γέφυρες με αυτοκίνητα μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας υπέρυθρες ακτίνες και τα όργανα που μετρούν την επιτάχυνση.

Αυτές οι εφαρμογές επί του παρόντος τείνουν να χρησιμοποιούνται σε συμβατικούς αισθητήρες, παρόλο που μπορεί να υπάρχει προοπτική για βελτίωση αυτών των τεχνικών με τη χρήση των έξυπνων υλικών. Ο έλεγχος της κατάστασης της τροχιάς (και της ράγας) είναι ένα προφανές παράδειγμα όπου τα έξυπνα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης έχει διεξαχθεί έρευνα για την ενεργή απόσβεση της κεραίας ρευματοληψίας της ηλεκτράμαξας και την αντικάστασή της με πιεζοηλεκτρικά υλικά. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

### **Εμπόδια ως προς την εκμετάλλευση**

Μια χρήσιμη σύγκριση, ξανά, είναι η χρήση των MEMS στην αυτοκινητοβιομηχανία. Εδώ, η διαθεσιμότητα των φτηνών συσκευών που είναι σε μεγάλο βαθμό επεξεργασμένες (όμως όχι σε τόσο μεγάλο βαθμό όσο η βιομηχανία των ημι-αγωγών) έχουν δημιουργήσει μια πετυχημένη βιομηχανία με πολλές αναγνωρίσιμες εφαρμογές. Αν η εκμετάλλευση αυτών των έξυπνων προϊόντων πρόκειται να ακολουθήσει αυτήν την επιτυχία, θα πρέπει να ξεπεραστεί ένας αριθμός εμποδίων:

- Καλύτερες ιδιότητες των υλικών
- Συμβατότητα του συστήματος (διαθέσιμα υλικά σε κατάλληλη μορφή για εφαρμογή).
- Διαθεσιμότητα και κόστος

- Καλύτερη γνώση και δεκτικότητα για τα έξυπνα υλικά στους παραδοσιακούς μηχανολογικούς κλάδους.
- Θα πρέπει να επιτευχθεί εκμετάλλευση από άλλους κλάδους.

(Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

## Κατασκευές

Το 2001 η αναφορά του Foresight «Κατασκευάζοντας το μέλλον», έχει σαν πρώτη στη σειρά των μεγάλων συστάσεων, την προώθηση των «έξυπνων» κτισμάτων και κατασκευών. Αυτό περιλαμβάνει την επιτάχυνση της εισαγωγής νέων τεχνολογιών, προηγμένων υλικών και «έξυπνων» προϊόντων σαν μέσο για τη δημιουργία νέων επιχειρηματικών ευκαιριών, βελτίωσης του περιβάλλοντος που ζούμε/εργασιακού περιβάλλοντος, και δυνατότητας πληροφόρησης για τη βελτίωση της ποιότητας της κατασκευής. Η αναφορά, συγκεκριμένα, αναγνωρίζει σαν παραδείγματα τη χρήση των ενσωματωμένων αισθητήρων για τον ελάχιστο έλεγχο της απόδοσης του κτισίου, τη χρήση των έξυπνων τεχνολογιών για ιδιαίτερα γνωρίσματα, συλλογή στοιχείων και διαχείριση, και διακοσμητική μπογιά που αλλάζει χρώμα ηλεκτρονικά και προειδοποιεί για τα σημεία έντασης.

Κάτω από την «δυνατότητα βιωσιμότητας», η αναφορά αναγνωρίζει περαιτέρω τη χρήση των ενσωματωμένων τσιπς για την επικοινωνία των ομάδων επιδιόρθωσης ή συντήρησης πριν από την κατάρρευση και τη χρήση του έξυπνου τσιμέντου που αισθάνεται τη δόνηση στις γέφυρες και κατασκευές όταν συμβαίνει. Όλες οι προαναφερόμενες χρήσεις εμπίπτουν στον ορισμό των έξυπνων υλικών. Γίνονται επίσης συνδέσεις με τη βιομηχανική και την νανοτεχνολογία. Η αναφορά καταλήγει στο ότι υπάρχει ανάγκη για συντονισμένη προσπάθεια προκειμένου η επίδραση της γοργής τεχνολογίας να μεταφερθεί από την έρευνα στην πρακτική εφαρμογή.

Στον κλάδο των κατασκευών, οι εφαρμογές της έξυπνης τεχνολογίας χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: εποπτεία της ποιότητας της κατασκευής (συμπεριλαμβανομένου του εντοπισμού ζημιών), έλεγχος της δόνησης και έλεγχος του περιβάλλοντος του χρήστη (οπτικό, θερμικό, ηλεκτρο-μαγνητικό, ακουστικό κ.λ.π.). Υπάρχει επίσης διαχωρισμός μεταξύ των εφαρμογών που σχετίζονται πρωταρχικά με κατασκευές που

φέρουν μεγάλο φορτίο και εκείνες που έχουν σχέση με τον εσωτερικό και εξωτερικό σχεδιασμό του κτίσματος και της λειτουργίας. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

### **Εποπτεία ποιότητας κατασκευών**

Η εποπτεία της κατασκευαστικής υγείας είναι η πιο ώριμη προσέγγιση των έξυπνων υλικών και των συστημάτων τεχνολογίας σ' αυτόν τον κλάδο. Ο κλάδος των κατασκευών είναι στα πρόθυρα της πρακτικής πραγματοποίησης αυτών των τεχνολογιών, εστιάζοντας στην εποπτεία των φορτίων και των εντοπισμό των ζημιών στις αρχικές και τις επισκευασμένες κατασκευές.

Οι σύνοδοι του SPEI Έξυπνες Κατασκευές και Υλικά του 2002 και το NDE για την Εποπτεία Υγείας και Διαγνωστικών του 2002 ανέδειξαν ένα αριθμό έξυπνων συστημάτων μέσα στον κλάδο των κατασκευών. Αυτά διακατέχονται από εφαρμογές εποπτείας της ποιότητας χρησιμοποιώντας συστήματα που βασίζονται σε οπτική ίνα στη Γερμανία, Ιταλία, Γαλλία και Βόρεια Αμερική μαζί με ένα στην Κορέα που χρησιμοποιεί ακουστική μετάδοση. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, τα συστήματα οπτικών ινών μπήκαν σε εφαρμογή το 2001 (σαν μέρος του DETR's "Συνέταιροι στο σχέδιο της καινοτομίας» για τον έλεγχο της ποιότητας των πολυμερών σύνθετων επενδύσεων που χρησιμοποιούνται για να δυναμώσουν τις κατασκευές για την ανύψωση της καμάρας του Μετρό στο Λονδίνο.

Μια πολλή μεγάλη Ευρωπαϊκή Συνεργασία για ένα έργο τριετούς διάρκειας έλαβε χώρα στο Ηνωμένο Βασίλειο υπό την αιγίδα του Συνεταιρισμού INTERSet Faraday, και εξέτασε την ακεραιότητα της εποπτείας σε δύσκολο περιβάλλον. Περιέλαβε την ένταξη ενός συστήματος αισθήτηρα που βασίζεται σε οπτική ίνα σε μια γέφυρα κατασκευασμένη με σύνθετα πολυμερή στο West Mill του Oxfordshire.

Το μεγαλύτερο επίπεδο δραστηριότητας που έχει αναφερθεί είναι στην Βόρεια Αμερική όπου, ξανά, η εποπτεία των γεφυρών αποτελεί το κεντρικό θέμα. Τα σχέδια στις Η.Π.Α. περιλαμβάνουν τη χρήση συστημάτων πλέγματος με οπτικές ίνες για τον έλεγχο της κίνησης και την εποπτεία των σύνθετων επισκευών. Η πιο συντονισμένη δραστηριότητα είναι μάλλον αυτή στον Καναδά υπό την αιγίδα της συνεργασίας της ερευνητικής ομάδας για τον Έξυπνο εντοπισμό στις Νεωτεριστικές Κατασκευές



(ISIS). Το ISIS έχοντας περιγραφεί σαν «το δίκτυο των κέντρων με διάκριση» συνδέει 72 ερευνητές στον Καναδά με ομάδες δημοσίων και ιδιωτικών συμφερόντων που έχουν ενδιαφέρον για νεωτεριστικές λύσεις στην κατασκευή και επισκευή των γεφυρών, των φραγμάτων και των κτισμάτων. Το ISIS επίσης διαμορφώνει το επίκεντρο δραστηριότητας για την εποπτεία των έξυπνων γεφυρών και των δομών. Όπως και άλλους κλάδους, η εστίαση της τεχνολογίας είναι κυρίων στις πολυμερείς σύνθετες δομές και τους οπτικούς αισθητήρες. Άλλες δραστηριότητες που έχουν αναφερθεί πρόσφατα περιλαμβάνουν τη χρήση των ενσωματωμένων και τοποθετημένων στην επιφάνεια αισθητήρων MEMS για την εποπτεία του τσιμέντου και των μεταλλικών κατασκευών. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

### Έλεγχος Δονήσεων

Ο έλεγχος δονήσεων είναι η μέγιστη πρακτική εκδήλωση των ενεργών συστημάτων ελέγχου στην κατασκευή, πρωταρχικά για την μετρίαση των δονήσεων που προκαλούνται από τον αέρα και το σεισμό. Το ενδιαφέρον για τη δόνηση που προκαλείται από τον αέρα μεγαλώνει σε παγκόσμιο επίπεδο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει εκδηλωθεί από τους σχεδιαστές γέφυρας και άλλων κατασκευών για τη χρήση λεπτοκαμωμένων καλωδιακών κατασκευών, που είναι διάσημες για την αισθητική τους. Ένα πρόσφατο έργο του Ευρωπαϊκού Πλαισίου 5, για παράδειγμα, έχει εξετάσει τον ενεργό έλεγχο των καλωδιακών κατασκευών χρησιμοποιώντας και συμβατικούς υδραυλικούς ενεργοποιητές και νεωτεριστικούς μαγνητοσυστολικούς. Μια άλλη μαγνητική λύση, που βασίζεται στα μαγνητορεολογικά υγρά έχει επίσης εφαρμοστεί για την μείωση της έντασης της καλωδιακής γέφυρας στην Κίνα και στη μείωση των επιδράσεων του σεισμού στην Ιαπωνία.

Το πρόσφατο πρόβλημα της κατασκευαστικής ανισορροπίας στη γέφυρα Millenium (“Wobbly”) κατά μήκος του ποταμού Τάμεση επιλύθηκε με τον επαναεξοπλισμό ενός παθητικού συστήματος μείωσης της έντασης. Οι μηχανικοί σχεδίου εξέτασαν ένα ενεργό έξυπνο σύστημα όμως, παρόλο που αυτό θα παρείχε ένα αποτελεσματικό και συντονισμένο σύστημα, απέρριψαν την ιδέα κυρίως λόγω του κόστους.



*Εικόνα 24- Γέφυρα Jubilee στο Λονδίνο*

Η δυνατότητα χρήσης ενός έξυπνου υλικού περισσότερο για την άμεση κατασκευαστική ενίσχυση παρά για τον έλεγχο της δόνησης έχει ήδη περιγραφεί. Αυτό συνιστά τη χρήση κραμάτων με μνήμη σχήματος για υπεράκτιες κατασκευαστικές εφαρμογές μεγάλου βαθμού, συμπεριλαμβανομένης της ενίσχυσης, της σύσφιξης και της ανύψωσης.

Μια θεωρία που εξετάζει τη μετρίαση των επιδράσεων της κατασκευαστικής ζημιάς (π.χ. από έναν σεισμό) χωρίς την ανάγκη για ένα σύστημα εποπτείας, είναι η κατασκευή που γίνεται από το ίδιο το κατασκεύασμα. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

### **Περιβαλλοντολογικός έλεγχος**

Ο περιβαλλοντολογικός έλεγχος είναι ένας κλάδος λιγότερο αναπτυγμένος για την εφαρμογή των έξυπνων τεχνολογιών. Οι εφαρμογές έχουν να κάνουν πρωταρχικά με τον εσωτερικό και εξωτερικό σχεδιασμό του κτίσματος, με έμφαση στον περιβαντολλογικό έλεγχο και τα συστήματα της πληροφόρησης. Υπάρχουν επίσης δυνατοί δεσμοί στην έννοια του «έξυπνου κτισίματος ή του σπιτιού» και της φροντίδας της υγείας, συμπεριλαμβανομένης της φροντίδας για του πιο ηλικιωμένους, την πρόληψη του εγκλήματος και την αποτελεσματικότητα της ενέργειας. Εν τέλει, τα έξυπνα υλικά και η σχετιζόμενη τεχνολογία που μπορούσε να

ενσωματωθεί στους χώρους που ανταποκρίνονται στον χρήστη μέσω της φωνής, της κίνησης ή των προσωπικών επικετών. Η κατανόηση της τεχνολογίας των έξυπνων υλικών θα είναι αμοιβαία εξαρτώμενη από το βαθμό στον οποίο εγκαθίσταται η τρέχουσα ώθηση προς την ενιαία τεχνολογία πληροφόρησης σ' αυτόν τον κλάδο.

Οι συγκεκριμένες εφαρμογές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σαν «θετικά ωφέλιμες», «χρήσιμες» ή απλά «καλές να υπάρχουν». Για παράδειγμα, η χρήση της έξυπνης τεχνολογίας για την παροχή ελέγχου στον ενεργό θόρυβο θα ήταν ωφέλιμη στο περιβάλλον του σπιτιού, του γραφείου και των κοινόχρηστων χώρων. Το ίδιο πράγμα αληθεύει και στον θερμικό έλεγχο, συμπεριλαμβανομένων των κλιματιστικών (θέρμανσης και ψύξης) και στον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας. Στον θερμικό έλεγχο, οι δυνητικές εφαρμογές των έξυπνων υλικών περιλαμβάνουν τις βαλβίδες, τους διακόπτες και άλλους μηχανικούς ενεργοποιητές που βασίζονται για παράδειγμα, τα ηλεκτροενεργοποιητικά υλικά ή στα κράματα με μνήμη σχήματος. Επιπλέον εξελίξεις με τη χρήση έξυπνων υλικών όπως τα φωτο ή θερμοχρωμικά θα μπορούσαν να προσφέρουν προστιθέμενη αξία. Αυτά τα υλικά επίσης προσφέρουν την ικανότητα για τον έλεγχο του φωτός και του χρώματος, που οδηγεί σε θετικά οφέλη και σε ό,τι αφορά την αποτελεσματικότητα της ενέργειας και σε πεδία που έχουν σχέση περισσότερο με τη μόδα και τον έλεγχο της διάθεσης. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

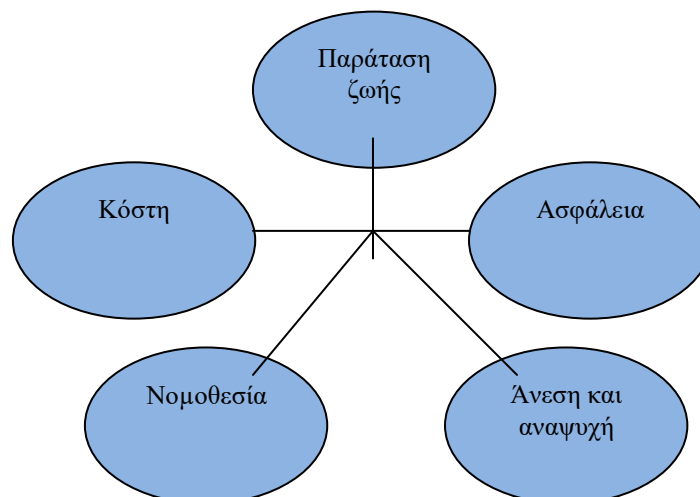
## **Οδηγοί και εμπόδια**

Η κορωνίδα των μεταδοτών είναι η ασφάλεια, και σε ό,τι αφορά την ενσωμάτωση των συστημάτων ελέγχου του κατασκευαστικού «καλώς έχειν» και στη χρήση των ενεργών συστημάτων ελέγχου για τη μετρίαση των ζημιών. Το κόστος μπορεί να εξεταστεί και σαν μέγιστος οδηγός και σαν εμπόδιο για την εισαγωγή της τεχνολογίας στον κλάδο, που, ιστορικά, έχει την κουλτούρα του χαμηλού κόστους αναφορικά με την προσφορά των υλικών για το κτίσιμο.

Κάθε έξυπνη τεχνολογία χρειάζεται να είναι προσιτή οικονομικά, είτε με το να είναι από μόνη της χαμηλού κόστους είτε με το να προσφέρει προστιθέμενη αξία μέσω της βελτιωμένης απόδοσης, συμπεριλαμβανομένης της αυξημένης ασφάλειας ή της μειωμένης μέσω του κόστους ζωής. Το Καναδικό δίκτυο ISIS, για παράδειγμα,

προβλέπει έναν συνδυασμό σχεδίου ζωής και μειωμένης συντήρησης για την έξυπνη γέφυρα. Ένα σημαντικό ζήτημα εδώ, όμως, είναι το ποιος θα πληρώσει γι'αυτά τα οφέλη, δεδομένου ότι η ιδιοκτησία μιας πολιτικής κατασκευής ή το κτίσμα μπορεί να αλλάζει κατά τη διάρκεια της ζωής του. Ένας περαιτέρω οδηγός, ο οποίος θα υποστηρίξει την εισαγωγή μιας πιο υψηλής τεχνολογίας λειτουργικότητα, είναι οι κατασκευαστικές τεχνικές με αυξημένα πρότυπα συναρτησιακής κατασκευής. Αυτές οι τεχνικές θα επέτρεπαν τα λειτουργικά στοιχεία να ενσωματωθούν σε μια βιομηχανία, περισσότερο από ένα περιβάλλον μη-ελέγξιμης κατασκευής.

Η μόδα και η άνεση του χρήστη είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες και πλαίσιο και των μεγάλων κατασκευών και των σπιτιών και γραφείων. Στις γέφυρες, για παράδειγμα, η τάση για πιο μακριά λεπτοκαμωμένα καλωδιακά σχέδια οδηγεί και στην ανάγκη για κατασκευαστική εποπτεία και στη χρήση συστημάτων ελέγχου για ενεργή και παθητική δόνηση. Στο σπίτι ή στο γραφείο, οι κατασκευές που διεγείρουν το ενδιαφέρον των ενοίκων (μέσω της μεταβολής χρώματος, για παράδειγμα) μπορούν να είναι ωφέλιμες. Εδώ, ειδικά, θα ήταν αναγκαία η συνεργασία με τους συμβούλους της αρχιτεκτονικής και της μηχανολογίας. Το να γνωρίζουν αυτοί καλύτερα τις τεχνικές δυνατότητες και των δυνητικών ωφελειών θα εξάλειφε ένα επιπλέον τρέχον εμπόδιο για την αντίληψη των έξυπνων τεχνολογιών.



Εικόνα 25- Οι οδηγοί της τεχνολογίας στον κλάδο των κατασκευών.

Οι οδηγοί της τεχνολογίας στον κλάδο των κατασκευών.

## Σπορ και αναψυχή

Ο κλάδος των σπορ και της αναψυχής έχει ανέκαθεν αγκαλιάσει νέα δομικά υλικά όπως τα κράματα αλουμινίου, τα κράματα τιτανίου, τα προηγμένα πολυμερή, τις συνθέσεις γυαλιού και άνθρακα. Πολύ σπάνια θα αναπτυχθούν νέα δομικά υλικά για τη βιομηχανία των σπορ και συχνά προέρχονται από υλικά που εξελίχθηκαν για στρατιωτικές εφαρμογές ή εφαρμογές για τις μεταφορές. Ένα παρόμοιο πρότυπο αναδύεται στον τομέα των έξυπνων υλικών, όπου οι έξυπνες τεχνολογίες που έχουν εξελιχθεί σε άλλους κλάδους (στρατό, αεροδιάστημα, κ.λ.π.) ενσωματώνονται στον εξοπλισμό για τα σπορ και την αναψυχή.

Ο κλάδος των σπορ και της αναψυχής γίνεται ολοένα και πιο σημαντικός στην κοινωνία μας. Ακμάζουν τα πτυχία και μεταπτυχιακά στην επιστήμη των σπορ και της άσκησης, που επικεντρώνεται στην ανθρώπινη απόδοση και τα πτυχία στη μηχανολογία των σπορ ή της τεχνολογίας, που επικεντρώνεται στο σχεδιασμό του εξοπλισμού αυξάνονται ομοίως. Πρόσφατα έχει δημιουργηθεί ο Σύνδεσμος της Διεθνούς Μηχανολογίας των Σπορ (ISEA) και ο αριθμός των διεθνών συνεδρίων και των εκδόσεων που δημοσιεύουν την έρευνα που βασίζεται στη μηχανολογία των σπορ αυξάνεται.

Ένα καλό παράδειγμα της χρήσης των έξυπνων υλικών στα σπορ είναι η ρακέτα του τέννις που κατασκευάστηκε από τον Head. Οι μοντέρνες ρακέτες έχουν σχεδιασθεί να είναι δύσκαμπτες προκειμένου να μεγεθύνεται η ενέργεια που επιστρέφει στο μπαλάκι, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα η ρακέτα να μεταδίδει μεγάλο σοκ και δόνηση στο χέρι του παίκτη. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)



*Εικόνα 26- Ρακέτα του τέννις*

Ρακέτα του τέννις που περιλαμβάνει πιεζοηλεκτρικές συνδεδεμένες με ηλεκτρόδια που μεταφέρουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε ένα μικροτσιπ (Cromer 2001).

Σε μια προσπάθεια να μειωθεί η δόνηση, οι πιεζοηλεκτρικές ίνες ενσωματώνονται γύρω από το λαιμό της ρακέτας. Ο σκελετός παρεκκλίνει ελάχιστα όταν χτυπάει η μπάλα, λυγίζοντας τις πιεζοηλεκτρικές ίνες και δημιουργώντας ένα φορτίο που συγκεντρώνεται μέσω του υποδεδειγμένου ηλεκτροδίου που περιβάλλει τις ίνες. Το φορτίο και το εναλλασσόμενο ρεύμα που σχετίζεται μ' αυτό μεταφέρεται σε ένα ενσωματωμένο μικροτσιπ που περιλαμβάνει επαγωγείς, πυκνωτές και αντιστάτες που επιστρέφουν το εναλλασσόμενο ρεύμα πίσω στις ίνες που είναι εκτός της φάσης προκειμένου να μειωθεί η δόνηση μέσω της καταστροφικής παρεμβολής. Οι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι η μείωση της δόνησης είναι της τάξεως του 50% σε σύγκριση με τις συμβατικές ρακέτες, παρόλο που δεν υπάρχει κάποια δημοσιευμένη απόδειξη γι' αυτόν τον ισχυρισμό.

Παρόμοια τεχνολογία χρησιμοποιείται επίσης στα K2 σκι με τη βοήθεια του ACX (Ενεργός έλεγχος ειδικών). Αυτό είναι ένα παράδειγμα του πώς ένας κατασκευαστής σπορ (K2) συνεργάζεται με έναν ειδικό έξυπνων υλικών (ACX) για να αναπτύξουν ένα νέο προϊόν. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν ενσωματωθεί στα σκι για το χιόνι, στα ρόπαλα του μπείζμπολ, στις σανίδες για σκι και του θαλάσσιου σκι που παθητικά μειώνουν τη δόνηση με τη μετατροπή των δονήσεων σε ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο εξανεμίζεται μέσω του αντιστάτη. Ένα αληθινά έξυπνο σύστημα έχει κατασκευαστεί για τη μείωση της δόνησης των σκελετών του ποδηλάτου που χρησιμοποιούν ένα

τεράστιο μαγνητο-αντιστατικό αισθητήρα για τον εντοπισμό της δόνησης και των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών για τη βελτίωση της απόσβεσης.

Άλλα παραδείγματα περιλαμβάνουν τη χρήση των κραμάτων που έχουν μνήμη σχήματος για τις όψεις στα μπαστούνια του γκολφ λόγω το υπερελαστικών και υψηλής απόσβεσης ιδιοτήτων, τη χρήση έξυπνων υφασμάτων όπως τα θερμοχρωμικά υφάσματα, αγωγίμων και φωτονικών τεχνολογιών και δομές υφασμάτων που προσαρμόζονται. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

### **Οδηγοί της αγοράς**

Οι κύριοι οδηγοί για την εισαγωγή των έξυπνων υλικών και της έξυπνης τεχνολογίας είναι να:

- Να βελτιώσουν την απόδοση του υφιστάμενου εξοπλισμού των σπορ (για παράδειγμα μέσω της μειωμένης δόνησης), η προσθήκη αξίας στο προϊόν και η αύξηση της ανταγωνιστικότητας με άλλους κατασκευαστές.
- Να αυξηθεί η λειτουργικότητα του υφιστάμενου προϊόντος, όπως η χρήση του αγωγίμου υφάσματος ή του υφάσματος που αλλάζει χρώμα.
- Να αναπτυχθούν νέα προϊόντα, όπως ο ενόργανος εξοπλισμός ή οι συσκευές προπόνησης
- Να χρησιμοποιηθούν τα έξυπνα υλικά σαν εργαλείο marketing για την αύξηση του καταναλωτικού ενδιαφέροντος.

(Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)

### **Εμπόδια για την εκμετάλλευση**

Πολλά από τα έξυπνα υλικά που αναλύθηκαν είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, όπως τα κράματα που έχουν μνήμη σχήματος, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, οι πιεζοηλεκτρικές ίνες, τα μαγνητο και ηλεκτρο-ρεολογικά υγρά, οι ίνες που αλλάζουν χρώμα ή οι αγωγίμες ίνες. Εκτός των υλικών, οι τεχνολογίες όπως η ενεργή και παθητική απόσβεση της δόνησης έχουν αναλυθεί σε μεγάλο βαθμό σε άλλους κλάδους όπως οι μεταφορές και το αεροδιάστημα. Ενώ τα υλικά και οι τεχνολογίες είναι διαθέσιμες, το κύριο εμπόδιο είναι η έλλειψη επίγνωσης και κατανόησης των ιδιοτήτων και των εφαρμογών των έξυπνων υλικών από αυτούς που εργάζονται στη βιομηχανία των

σπορ (τους χρήστες εξοπλισμού, τους σχεδιαστές του εξοπλισμού και τους επιστήμονες των σπορ. Υπάρχει επίσης έλλειψη δημοσιευμένης εργασίας για τα έξυπνα υλικά στην επιστήμη των σπορ και στο πεδίο της μηχανολογίας. (Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century)



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή έλαβε χώρα μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση των τρόπων συλλογής ενέργειας από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Παρουσιάστηκαν τα βασικά στοιχεία θεωρίας που διέπουν τη λειτουργία μιας πιεζοηλεκτρικής μικρογεννήτριας τύπου αιωρούμενης προβόλου. Επίσης, έγινε εκτενής περιγραφή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, καθώς και αναφορά του έργου άλλων ερευνητών πάνω στις πιεζογεννήτριες τύπου MEMS.

Στη συνέχεια, δόθηκε έμφαση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τη μάζευση ενέργειας από τις σταγόνες της βροχής. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τροφοδοτήσουν επαρκώς μικρές συσκευές, δεδομένου ότι δεν απαιτείται συνεχής λειτουργία. Σε περίπτωση που απαιτηθεί συνεχής λειτουργία θα πρέπει να εγκατασταθεί και διάταξη αποθήκευσης (μπαταρία, υπερπυκνωτής) ώστε να αποθηκεύει την περίσσεια ενέργειας και να τροφοδοτεί το σύστημα τις ώρες που οι πηγές (ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος) απουσιάζουν. Κάτι τέτοιο αυξάνει το μέγεθος και το κόστος μιας συσκευής. Από την άλλη, Η ενέργεια από την πτώση των σταγόνων βροχής μπορεί να αξιοποιηθεί με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών, αλλά πάλι εξαρτάται από την βροχόπτωση και δεν μπορεί να θεωρηθεί αδιάλειπτη.

Τέλος, όσον αφορά τις πιεζοηλεκτρικές επιδράσεις υλικών, υπάρχει ήδη ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε αυτό τον κλάδο. Θα μπορούσαν όμως να ενδυναμωθούν αρκετά πεδία έρευνας όπως οι πιεζοηλεκτρικές σύνθετες ίνες, κάποια υλικά υψηλής απόδοσης κρυσταλλικών πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητικών υλικών καθώς και πολυμερή υλικά με μνήμη σχήματος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Wang Y. L. “Piezoelectric ZnO Nanostructure for Energy Harvesting”, 2015  
<http://serc.carleton.edu/>
- S. Whitney, “Vibrations of Cantilever Beams: Deflection, Frequency, and Research uses”, April 1999
- Γ. Νιάρχος, “Σχεδιασμός και κατασκευή μικρογεννήτριας για τη συλλογή ενέργειας από μηχανικές δονήσεις”, 2013
- J. Fraden, “Handbook of Modern Sensors, Physics, Designs and Applications”, 2010
- Wang Z. L., “Nanogenerators for Self-powered Devices and Systems”, 2011
- Wang Z. L., “Piezotronics and piezo-phototronics: fundamentals and applications”, 2014
- D. Shen, J. Park, J. Ajitsaria, S. Choe, H. Wickle III and D. Kim, “The design, fabrication and evaluation of a MEMS PZT cantilever with an integrated Si proof mass for vibration energy harvesting”, 2008
- A. Dow, A. Bittner, U. Schmid and N. Kherani, “Design, fabrication and testing of a piezoelectric energy microgenerator”, 2014
- L. Prusaskova, P. Novak, P. Kulha, J. Ocenasek, J. Savkova, L. Pastorek, P. Sutta, “Modeling and fabrication of single cantilever piezoelectric microgenerator with optimized ZnO active layer”, 2015
- P. Wang, H. Du, “ZnO thin film piezoelectric MEMS vibration energy harvesters with two piezoelectric elements for higher output performance”, 2015
- C. Hung, T. Chung, P. Yeh, C. Chen, C. Wang and S. Lin, “A miniature Mechanical-Piezoelectric-Configured Three-Axis Vibrational Energy Harvester”, 2015
- X. Zhao, Z. Shang, G. Luo, L. Deng, “A vibration energy harvester using AlN piezoelectric cantilever array”, 2015
- Κ. Ζάμπιας, Θ. Μέγα, Ευφυή υλικά και αεροπορικές κατασκευές, 2006
- Smart Materials for 21<sup>st</sup> Century by Foresight Materials Taskforce

Wikipedia.org

emereo.net

Aksel Bode, Harvesting Rain Fall, Washington.edu

Γ. Γληνού, Δ. Παπαχρήστου, Α. Παπαδόπουλος, “Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, αναδρομή, παρούσα κατάσταση και προοπτικές“, 2005

Λ. Σοφινίδης, Εφαρμογές ΑΠΕ, 2006