

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

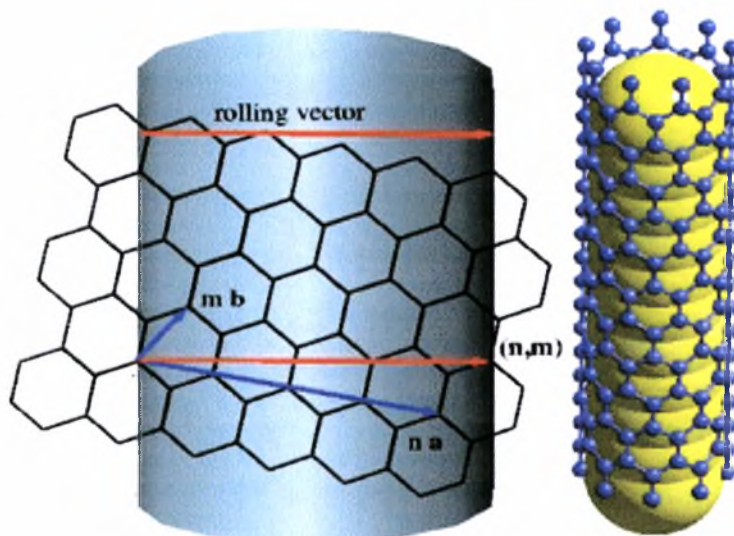
**Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών**

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**

**«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»**

**Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευση με τίτλο:**

**Διερεύνηση εφαρμογών νανοτεχνολογίας με έμφαση στην  
επιστήμη του Μηχανικού**



**Ιωάννης Α. Οικονομίδης**  
*Πολιτικός Μηχανικός - Ηλεκτρολόγος Μηχανικός*  
*Msc Ηλεκτρονικής - Ραδιοηλεκτρολογίας*

**Επιβλέπων:**  
**Θεόδωρος Καρακασίδης**  
**Επίκουρος Καθηγητής**

**ΒΟΛΟΣ 2010**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 8841/1  
Ημερ. Εισ.: 28-09-2010  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
620.5  
ΟΙΚ

## Θερμές Ευχαριστίες

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της παρούσας έρευνας απαίτησε τον συγκερασμό γνώσεων διαφόρων επιστημών, όπως της Φυσικής, της Χημείας, της Βιολογίας και της Χημικής Μηχανικής.

Στην προσπάθεια αυτή συνέβαλαν πολλοί άνθρωποι, για τους οποίους νιώθω την ανάγκη να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου και συγκεκριμένα να ευχαριστήσω:

- Τον επιβλέποντα κ. Καρακασίδη Θεόδωρο, Επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, για την ορθή καθοδήγηση, την πολύτιμη εμπειρία και την εποικοδομητική συνεργασία στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.
- Την σύζυγό μου Βέρα και τα παιδιά μου Αλέξανδρο, Μάριο, Νέστορα και Άλκηστη για την βοήθεια που μου πρόσφεραν στην σύνταξη της εργασίας.
- Και όλους όσους συμμετείχαν και βοήθησαν με τον τρόπο τους στις τυπικές διαδικασίες κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, θέλω να πιστεύω ότι η εργασία συνάδει με τους σκοπούς της Επιστήμης γενικότερα και ότι προσθέτει ένα μικρό αλλά σημαντικό λιθαράκι στο οικοδόμημα της γνώσης.

## **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ**

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια ανίχνευσης των εφαρμογών της νανοτεχνολογίας με έμφαση στα έργα του Πολιτικού Μηχανικού, εξετάζονται δε οι υπάρχουσες εφαρμογές σε σχέση με τα υλικά που χρησιμοποιεί ο μηχανικός στις κατασκευές και οι επιπτώσεις που θα έχουν αυτά στον σχεδιασμό και την κατασκευή των έργων. Η δομή της εργασίας οργανώνεται σε επτά κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο, ορίζεται η νανοτεχνολογία και μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά της, ερευνάται επίσης η ιστορία, από τα βραβεία του Richard Feynman, μέσω Μηχανών της Δημιουργίας του Eric Drexler στη σύγχρονη έκρηξη της ανάπτυξης των υλικών νανοκλίμακας. Μέχρι σήμερα, η ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας έχει επικεντρωθεί στα καινοτόμα υλικά και στις ιδιότητες τους τις οποίες μπορούμε να προβλέψουμε με προσομοίωση σε υπολογιστή και με μοντελοποίηση. Με αυτό το πλαίσιο, θα μπορούσαμε να ερευνάμε καλύτερα τις νανοτεχνολογίες που ήδη υπάρχουν στη φύση, καθώς και τις τρέχουσες εφαρμογές τους. Εξετάζεται επίσης η σημερινή κατάσταση της νανοτεχνολογίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γνωρίζουμε τους ορισμούς και τις κλίμακες, εξετάζοντας τα βασικά επιστημονικά πεδία και θεωρίες όπως, η κβαντική μηχανική, τα είδη των χημικών δεσμών και η κρυσταλλική δομή των υλικών, που ισχύουν στην νανοτεχνολογία. Στο κεφάλαιο αυτό επίσης ορίζονται τα νανοϋλικά και τα είδη τους, εξετάζοντας τις μεθόδους παραγωγής τους. Η έμφασή δίδεται στην δημιουργία και στην ενοποίηση των διακριτών νανοϋλικών. Μελετάται επίσης η δημιουργία χύδην νανοϋλικών με τις τεχνικές εναπόθεσης και τις διεργασίες με ισχυρή πλαστική παραμόρφωση όπως η γωνιακή μεταποίηση ίσου καναλιού και η στρέψη με υψηλή πίεση. Κατόπιν περιγράφεται η σημασία που έχουν οι κλίμακες του μεγέθους των σωματιδίων στην δόμηση των νανοϋλικών και εξετάζονται οι διάφορες μορφές των νανοσωματιδίων και οι τρόποι δόμησης τους. Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι ένα από τα υλικά που έχουν μελετηθεί πιο πολύ και κατέχουν σημαντική θέση σε μεγάλη ποικιλία

εφαρμογών. Το κεφάλαιο αυτό τελειώνει με την εξέταση των ναυσοωλήνων όπου περιγράφονται οι μονοφλοιικοί και οι πολυφλοιικοί, δίνοντας τις σημαντικότερες τους ιδιότητες άλλα και τους μηχανισμούς με τους οποίους εμφανίζουν προβλήματα και τις επιπτώσεις αυτών των προβλημάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορες τρέχουσες εφαρμογές της ναυοτεχνολογίας και εξετάζεται πώς λειτουργούν, γιατί η ναυοτεχνολογία είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία τους, και ποια εικόνα προσφέρουν αυτές οι εφαρμογές στο μέλλον της ναυο-τεχνολογίας. Τα ναυοϊκικά πιέζουν τα όρια της φυσικής, τους νόμους για την επίτευξη καινοτόμων τεχνολογιών, χρησιμοποιώντας νέες μεθόδους για τη κατασκευή των ναυο-δομών, όπως η αυτο-συναρμολόγηση. Ερευνώνται οι εφαρμογές των ναυοϊκικών αρχίζοντας από τις επιπτώσεις που θα έχουν στις κατασκευές γενικά, και στην συνέχεια εξετάζονται οι επιπτώσεις της ναυοτεχνολογίας στις ιδιότητες του χάλυβα και τα νέα προϊόντα χάλυβα που παράγονται με την χρήση της ναυοτεχνολογίας. Το σκυρόδεμα είναι το επόμενο υλικό που εξετάζεται. Μελετάται η επίπτωση της χρήσης ναυοϊκικών στην παραγωγή του τσιμέντου και του σκυροδέματος, σε σχέση με την αντιδραστικότητα του τσιμέντου, την αντιμετώπιση των πυριτικών αλκαλικών αντιδράσεων και του διοξειδίου του άνθρακα. Διαπιστώνεται ότι τα ναυοϊκικά θα επιφέρουν μεγάλες αλλαγές στις ιδιότητες του σκυροδέματος στο μέλλον και επομένως στις κατασκευές. Κατόπιν βλέπουμε την χρήση ναυοϊκικών στη δημιουργία του γυαλιού και τα ωφέλη που προκαλεί στους τομείς της συντήρησης, της προστασίας από την ηλιακή ακτινοβολία κ.λ.π.. Το ξύλο, οι επικαλύψεις και η πυροπροστασία είναι τα θέματα με τα οποία κλείνουμε το κεφάλαιο αυτό εξετάζοντας τις εφαρμογές των ναυοϊκικών σε αυτές τις περιπτώσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζουμε τις μεθόδους σχεδιασμού και υπολογισμού στην ναυοκλίμακα. Αρχίζοντας από την μέθοδο σχεδιασμού υλικών πολλαπλών διαστάσεων, συνεχίζουμε με την πολλαπλή διακριτή ανάλυση υλικών. Γίνεται μια προσπάθεια για τον υπολογισμό της γενικευμένης πίεσης και των μέτρων παραμόρφωσης στην ναυοκλίμακα. Κατόπιν εξετάζονται τα υλικά N-διαστάσεων και η πολλαπλή ανάλυση των συστατικών νόμων καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ των κλιμάκων. Τέλος μελετάται η μοντελοποίηση πολλαπλών κλιμάκων των υλικών με έμφαση στην μοντελοποίηση του χάλυβα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, εξετάζουμε μερικές από τις πιο σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης των προϊόντων νανοτεχνολογίας. Στο ίδιο πνεύμα, ερευνώνται οι κανονισμοί και η νομοθεσία σε σχέση με την χρήση των νανοϋλικών προσδιορίζοντας την ανάγκη για διεθνή συνεργασία στον τομέα. Οι κίνδυνοι της νανοτεχνολογίας και οι περιβαλλοντικές πτυχές της είναι κάτι που ερευνάται ιδιαίτερα, με την συζήτηση να επικεντρώνεται στο εάν απαιτούνται αυστηρότεροι νόμοι και κανονισμοί.

Στο έκτο κεφάλαιο, διερευνώνται τα οικονομικά μεγέθη της νανοτεχνολογίας και παρουσιάζεται η εμπορευματοποίηση της νανοτεχνολογίας με τις προοπτικές του όγκου της αγοράς και των μετοχών. Μελετάται η κούρσα της δημόσιας και ιδιωτικής χρηματοδότησης της νανοτεχνολογίας. Παρουσιάζεται ή εικόνα της διάθεσης των επιχειρηματικών κεφαλαίων για την έρευνα στην υψηλή τεχνολογία. Γίνεται μια ανάλυση του οικονομικού αντίκτυπου στις θέσεις εργασίας και στις επιχειρήσεις της νανοτεχνολογίας. Παρουσιάζεται η κατάσταση της τεχνολογικής ανάπτυξης της νανοτεχνολογίας σε σχέση με τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας και τις επιστημονικές δημοσιεύσεις και αναφορές για την νανοτεχνολογία.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προοπτικές για το μέλλον της νανοτεχνολογίας και των εφαρμογών της.

### STUDY APPLICATIONS WITH EMPHASIS ON NANOTECHNOLOGIAS SCIENCE OF ENGINEERING

This paper presents an attempt to detect applications for nanotechnology with an emphasis on works of Civil Engineering, reviewed existing applications and in connection with the materials used in mechanical engineering and the impact they have on the design and construction projects. The thesis is organized into seven chapters.

The first chapter, is defined the nanotechnology and some of the basic characteristics, investigated also the story from the awards Richard Feynman, "Engines of Creation" by Eric Drexler in the modern explosion of development of nanoscale materials. Until now, the development of nanotechnology has focused on innovative materials and their properties which we can predict with computer simulation and modeling. In this context, we could better investigate nanotechnology that already exists in nature, and current applications. It also examines the current state of nanotechnology.

In the second chapter there are definitions and scales, considering the basic disciplines and theories such as quantum mechanics, types of chemical bonds and crystal structure of materials, applicable to nanotechnology. This chapter also sets the nanomaterials and their species, considering their production methods. Emphasis is given on the creation and consolidation of distinct nanomaterials. Further, studied the creation of nanomaterials with bulk deposition techniques and processes with a strong plastic deformation such as equal channel angular processing and high-pressure torsion. After describing the importance of the ranges of particle size on the construction of nanomaterials and examined various types of nanoparticles and methods of construction. Carbon nanotubes are one of the materials studied and more prominently in a wide variety of applications. This chapter ends with an examination of nanotubes describing as Single-walled nanotubes and *Multi-walled nanotubes* giving the other most important properties and mechanisms which have problems and the implications of these problems.

The third section presents several current applications of nanotechnology and examines how and why nanotechnology is vital to their operation and what picture is provided by these applications in future nano-technology. Nanomaterials are pushing the limits of physics, laws to achieve innovative technologies using new methods for construction of nano-structures such as the self-assembly. Investigates the applications of nanomaterials ranging from the impact will be in construction in general and then examines the impact of nanotechnology on the properties of steel and the new steel products that have been produced using nanotechnology. Concrete is the next material that is tested. Studied the effect of the use of nanomaterials in the production of cement and concrete, compared with the reactivity of cement to address alkali silica reaction and carbon dioxide. Found that nanomaterials will lead to major changes in the properties of concrete in future and therefore in construction. Then we see the use of nanomaterials in the creation of the glass and the benefits resulting in the maintenance, protection from solar radiation, etc.. Wood, coatings and fire protection are issues that close this chapter by examining the applications of nanomaterials in such cases.

The fourth chapter examines the methods of design and computation at the nanoscale. Starting from the design method of multiple physical dimensions, we continue with the multiple discriminant analysis of materials. An attempt is made to calculate the generalized stress and strain measures at the nanoscale. After examining the material n-dimensional and multi-component analysis of laws and the interaction between scales. Finally we study the multi-scale modeling of materials with emphasis on modeling of the steel.

The fifth chapter deals with some of the most significant environmental impacts of nanotechnology products. Similarly, researched the regulations and legislation on the use of nanomaterials identifying the need for international cooperation. The risks of nanotechnology and environmental aspects it's something that has being investigated in particular the discussion focused on whether any more stringent laws and regulations.

The sixth chapter explores the fundamentals of nanotechnology and shows the commercialization of nanotechnology on the prospects for market volume and stock. Studied the race of public and private funding for nanotechnology. The picture of availability of risk capital for research in high technology. Is an



analysis of economic impact on jobs and business of nanotechnology. Shows the state of technological development of nanotechnology in relation to patents and scientific publications and reports on nanotechnology.

Finally in the seventh chapter, the prospects for the future of nanotechnology and its applications.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Πρόλογος .....	6
1.2 Τι είναι нанοτεχνολογία .....	6
1.3 Η Ιστορία της Νανοτεχνολογίας .....	8
1.4 Η σημερινή κατάσταση της Νανοτεχνολογίας .....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ.....	17
2.1 Ορισμοί και Κλίμακες .....	17
2.2 Βασικά επιστημονικά πεδία – θεωρίες .....	18
2.2.1 Κβαντική μηχανική.....	19
2.2.2 Χημικοί δεσμοί .....	21
2.2.3 Κρυσταλλική δομή.....	23
2.3 Τι είναι νανοϋλικά .....	25
2.4 Μέθοδοι παραγωγής των νανοϋλικών .....	27
2.4.1 Δημιουργία διακριτών νανοϋλικών <i>discrete nanomaterials dn</i> .....	29
2.4.1.1 Ενοποίηση των Υλικών <i>dn</i> .....	30
2.4.2 Δημιουργία χύδην νανοϋλικών .....	34
2.4.2.1 Τεχνικές Εναπόθεση .....	34
2.4.2.2 Διεργασίες με ισχυρή πλαστική παραμόρφωση.....	36
2.4.2.3 Γωνιακή μεταποίηση ίσου καναλιού .....	37
2.4.2.4 Στρέψη με υψηλή πίεση.....	38
2.5 Κλίμακα - Κυρίαρχος μηχανισμός στα νανοϋλικά .....	40
2.6 Νανοσωλήνες.....	50
2.6.1 Μονοφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα, <i>single-walled nanotubes, (SWCNTs)</i> .....	56
2.6.2 Πολυφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα, <i>Multi-walled nanotubes (MWCNTs)</i> .....	58
2.6.3 Ατέλειες στη δομή των νανοσωλήνων άνθρακα .....	59
2.6.4 Ιδιότητες νανοσωλήνων άνθρακα .....	60

2.6.5 Μηχανικές ιδιότητες .....	60
2.7 Νανοΐνες.....	61

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΑΝΟΥΪΚΩΝ ..... 64

3.1 Εφαρμογές της νανοτεχνολογίας και των νανοϋλικών στις κατασκευές .....	64
3.2 Νανοτεχνολογία και χάλυβας.....	65
3.3 Νανοτεχνολογία και σκυρόδεμα.....	70
3.3.1 Ορισμός του νανοσκυροδέματος .....	71
3.3.1 Σκυρόδεμα νανοκλίμακας .....	78
3.3.2 Η αντιδραστικότητα του τσιμέντου στην νανοκλίμακα .....	79
3.3.3 Η αντιμετώπιση των πυριτικών αλκαλικών αντιδράσεων, <i>Alkali Silicate Reaction, ASR</i> στη νανοκλίμακα.....	79
3.3.4 Το νανοσκυρόδεμα και το διοξείδιο του άνθρακα .....	80
3.3.5 Συμπεράσματα .....	82
3.4 Νανοτεχνολογία και γυαλί .....	83
3.5 Νανοτεχνολογία και Ξύλο .....	86
3.6 Νανοτεχνολογία και Επικαλύψεις.....	89
3.7 Νανοτεχνολογία και Πυροπροστασίας.....	93

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ..... 96

4.1 Μέθοδοι Σχεδιασμού Υλικών Πολλαπλών διαστάσεων .....	96
4.2 Πολλαπλή συνεχής διακριτή ανάλυση των υλικών.....	102
4.3 Γενικευμένη Πίεση και Μέτρα Παραμόρφωσης.....	105
4.4 N-διαστάσεων υλικό .....	110
4.5 Πολλαπλής ανάλυση των συστατικών νόμων.....	111
4.5 Η αλληλεπίδραση μεταξύ των κλιμάκων .....	112
4.7 Μοντελοποίηση πολλαπλών κλιμάκων Υλικών.....	113
4.8 Πολλαπλών κλιμάκων συστατική Μοντελοποίηση του Χάλυβα .	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ NANOTEΧΝΟΛΟΓΙΑΣ .....	119
5.1 Εισαγωγή.....	119
5.2 Νομοθεσία στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	119
5.3 Γεφύρωση του χάσματος των γνώσεων .....	121
5.4 Διεθνής συνεργασία .....	122
5.5 Οι κίνδυνοι της νανοτεχνολογίας .....	123
5.6 Περιβαλλοντικές πτυχές της νανοτεχνολογίας .....	124
5.7 Συμπεράσματα .....	128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΗΣ NANOTEΧΝΟΛΟΓΙΑΣ .....	130
6.1 Εισαγωγή.....	130
6.2 Εμπορευματοποίηση της νανοτεχνολογίας: οι προοπτικές του όγκου της αγοράς και των μετοχών.....	132
6.3 Η παγκόσμια κούρσα της δημόσιας και ιδιωτικής χρηματοδότησης της νανοτεχνολογίας .....	139
6.4 Επιχειρηματικά κεφάλαια για την έρευνα στην υψηλής τεχνολογίας.....	142
6.5 Ανάλυση του οικονομικού αντίκτυπου στις θέσεις εργασίας και στις επιχειρήσεις της νανοτεχνολογίας .....	144
6.6 Η τεχνολογική ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας: αιτήσεις για διπλώματα ευρεσιτεχνίας.....	152
6.7 Η επιστημονική βάση της νανοτεχνολογίας: επιστημονικές δημοσιεύσεις και αναφορές .....	161
6.8 Συμπεράσματα .....	165
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ NANOTEΧΝΟΛΟΓΙΑΣ .....	169
Βιβλιογραφία - Αρθρογραφία - Διαδίκτυο .....	174

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

---

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

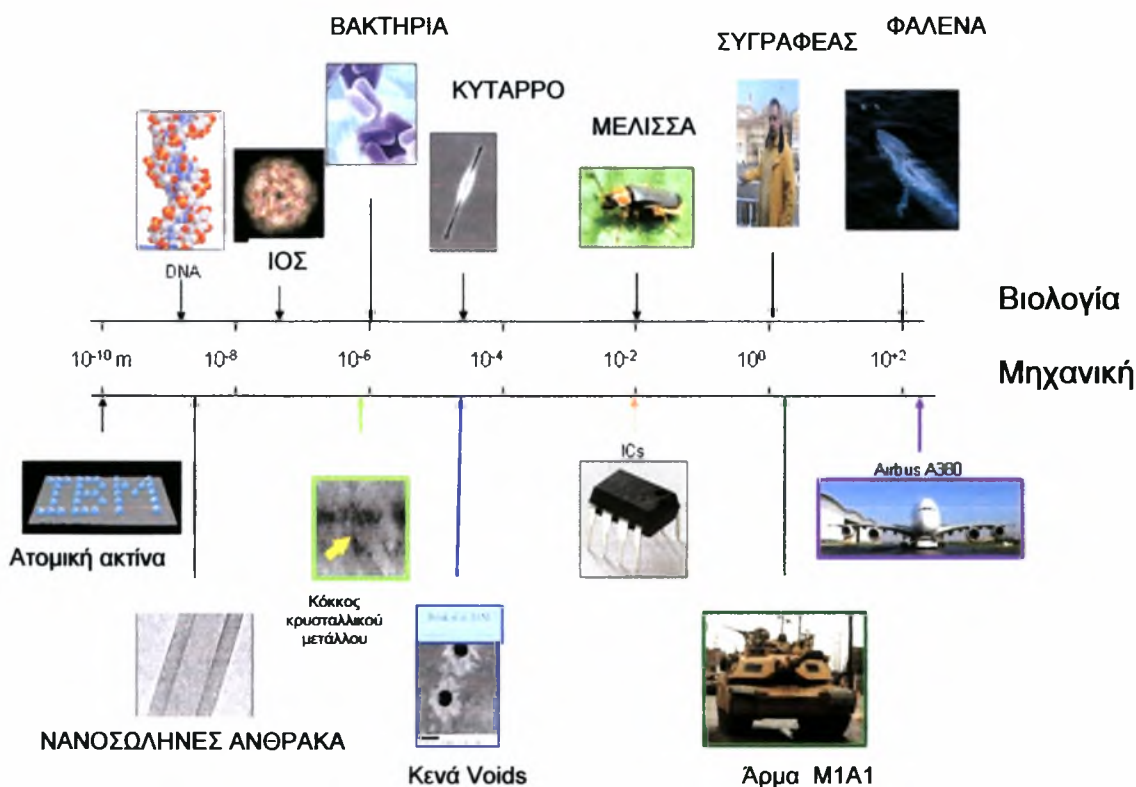
#### 1.1 Πρόλογος

Η νανοτεχνολογία είναι ένα νέο και αναπτυσσόμενο πεδίο που σχετίζεται σχεδόν με κάθε κλάδο των θετικών επιστημών και της επιστήμης του μηχανικού. Με την ταχεία πρόοδο σε τομείς όπως η μοριακή ηλεκτρονική, η σύνθεση βιομοριακών κινητήρων, η αυτο-συναρμολόγηση με βάση το DNA, και ο χειρισμός μεμονωμένων ατόμων μέσω ενός μικροσκοπίου σήραγγας, η νανοτεχνολογία έχει καταστεί το κέντρο του ενδιαφέροντος ενός αυξανόμενου αριθμού επιστημόνων και μηχανικών, γεγονός που αυξάνει το ενδιαφέρον αλλά και την φαντασία του κοινού. Το πεδίο αυτό ορίζεται κυρίως από μια μονάδα του μήκους, το νανόμετρο στο οποίο βρίσκεται ο τελικός έλεγχος για τη μορφή και τη λειτουργία των υλικών. Πράγματι, δεδομένου ότι τα είδη των ατόμων και οι θεμελιώδεις ιδιότητές τους περιορίζονται από τους νόμους της κβαντικής φυσικής, η μικρότερη κλίμακα μεγέθους στην οποία έχουμε την ελευθερία να εξασκήσουμε την δημιουργικότητα μας είναι ο συνδυασμός των διαφορετικών αριθμών και ειδών των ατόμων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή νέων μορφών της ύλης. Αυτό είναι το πεδίο έρευνας της νανοτεχνολογίας: η οικοδόμηση των υλικών και συσκευών για τον έλεγχο μέχρι το επίπεδο των μεμονωμένων ατόμων και μορίων. Αυτές οι ικανότητες της νανοτεχνολογίας έχουν αποτελέσματα στις ιδιότητες και την απόδοση των υλικών πολύ ανώτερες από αυτές των συμβατικών τεχνολογιών και, σε ορισμένες περιπτώσεις, επιτρέπουν την πρόσβαση σε εντελώς νέα φαινόμενα που είναι διαθέσιμα μόνο σε αυτήν την κλίμακα.

#### 1.2 Τι είναι νανοτεχνολογία

Η Νανοτεχνολογία ορίζεται ως η επιστήμη βάσει της οποίας μπορούν να κατασκευαστούν διατάξεις και συστήματα με έλεγχο της ύλης στη νανοκλίμακα, δηλαδή σε κλίμακα μορίων και μοριακών δομών, με στόχο τη δημιουργία μεγαλύτερων δομών με νέα μοριακή οργάνωση που εμφανίζουν καινοτόμες φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες, (Wood, 2002), Ο ορισμός της

Νανοτεχνολογίας είναι βασισμένος στο πρόθεμα "νανο", το οποίο σε πιο τεχνικούς όρους "νανο" σημαίνει  $10^{-9}$ . Για να έχουμε μια αίσθηση του όρου, ένας ιός είναι περίπου 100 νανόμετρα σε μέγεθος. Ο όρος νανοτεχνολογία δεν αφορά απλά τη μελέτη πολύ μικρών πραγμάτων, αλλά την πρακτική εφαρμογή της γνώσης αυτής.



**Σχήμα 1.1** Σύγκριση των διαφόρων κλιμάκων μήκους στην βιολογία και την μηχανική σε σχέση με την νανοτεχνολογία.

Είναι χρήσιμο να αναπτύξουμε μια φυσική ιδέα της κλίμακας μήκους, μέσω του σχήματος 1.1 το οποίο παρουσιάζει το φάσμα κλιμάκων μήκους κοινού ενδιαφέροντος στη μηχανική και βιολογία, (Ramesh, 2009). Η απεικόνιση αυτή έχει συμπεριληφθεί διότι επιτρέπει σε κάποιον να αναπτύξει μια ανθρώπινη αίσθηση της κλίμακας. Αρχίζει από τις μικρές κλίμακες, τα χαρακτηριστικά που συνδέονται με τις ατομικές ακτίνες είναι της τάξης του  $1\text{\AA}$  (ένα Angstrom), ( $10^{-10}$  m) σε μέγεθος. Η απόσταση στο ατομικό πλέγμα στους περισσότερους κρυστάλλους είναι της τάξης των  $3\text{\AA}$ . Η διάμετρος των νανოსωλήνων άνθρακα είναι περίπου 2 nm ή  $20\text{\AA}$ , και αυτό συσχετίζεται καλά με τη διάμετρο της

διπλής έλικας του DNA, (η οποία δείχνει, παρεμπιπτόντως, ότι οι νανοσωλήνες είναι μια καλή προσέγγιση για την σύγκριση με το DNA). Τα βακτήρια (ζωντανοί οργανισμοί) είναι επίσης περίπου 1μm σε μέγεθος, είναι μια υπενθύμιση της αξιοσημείωτης πολυπλοκότητας της φύσης. Ο συγγραφέας αντιστοιχεί στην κλίμακα περίπου το 1,75 ενώ ένα άρμα μάχης M1A1 είναι περίπου τριάντα φορές μεγαλύτερο. Ένα από τα μεγαλύτερα ζώα που είναι οι μπλε φάλαινες, είναι περίπου 100m, συγκρίσιμες σε μέγεθος με ορισμένα αεροσκάφη.

### 1.3 Η Ιστορία της Νανοτεχνολογίας

Η νανοτεχνολογία δεν έχει μόνο παρόν στη φύση, αλλά έχει επίσης χρησιμοποιηθεί εν αγνοία στην ανθρώπινη τεχνολογία για αιώνες, (Allhoff et al, 2010). Για παράδειγμα σωματίδια νανοκλίμακας αιθάλης, κυρίως αιθάλη υψηλής τεχνολογίας, έχουν χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό πρόσθετης ύλης σε ελαστικά για σχεδόν 100 χρόνια. Νανοϋλικά έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης ασυναίσθητα από τεχνίτες για αιώνες. Όταν ο χρυσός μειωθεί σημαντικά σε μέγεθος, δεν διατηρεί πλέον την οικεία κίτρινη-μεταλλική εμφάνιση του, αλλά μπορεί να πάρει μια σειρά από χρώματα. Το κόκκινο χρώμα που χρησιμοποιείται για τα κινέζικα αγγεία ήδη από τη δυναστεία των Μινγκ είναι το αποτέλεσμα της κινεζικής τεχνικής λείανσης του χρυσού σε σωματίδια της τάξης μεγέθους μέχρι να των 25 nm. Επίσης, οι τεχνίτες του μεσαίωνα στην Ευρώπη, ανακάλυψαν ότι με την ανάμειξη χλωριούχου χρυσού σε λιωμένο γυαλί θα μπορούσαν να δημιουργήσουν ένα πλούσιο ρουμπινί με διάφορες αποχρώσεις. Με τη μεταβολή του ποσοστού του χρυσού που τίθεται στο μείγμα, παράγονται διαφορετικά χρώματα. Αν και η αιτία ήταν άγνωστη την εποχή εκείνη, τα μικροσκοπικά σφαιρίδια χρυσού είχαν συντονισθεί για να απορροφούν και αντανακλούν το φως του ήλιου σε ελαφρώς διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με το μέγεθος τους. Νανοϋλικά έχουν χρησιμοποιηθεί εν αγνοία τους για την κατασκευή βιτρό με την λείανση χρυσού και αργύρου σε νανοσωματίδια με μικρά μεγέθη. Τόσο τα νανοσωματίδια χρυσού όσο και του αργύρου αλλάζουν το χρώμα τους σημαντικά ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα τους. Στα 25 nm σε διάμετρο και σφαιρικός, ο χρυσός είναι κόκκινος, σε 50 nm και σφαιρικός, είναι πράσινος, και στα 100 nm και σχετικά σφαιρικός, είναι πορτοκαλί. Το ασήμι είναι μπλε στα 40 nm, όταν είναι σφαιρικό, κίτρινο

στα 100 nm και σφαιρικό, και κόκκινο στα 100 nm όταν είναι πρισματικό. Αν και αυτές είναι οι πρώτες χρήσεις της нанοτεχνολογίας για να βελτιώσει ή να αλλάξει την ιδιότητα ενός υλικού αυτές οι χρήσεις θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως τυχαία нанοτεχνολογία. Για να χαρακτηριστεί όμως ως нанοτεχνολογία, θα έπρεπε να είναι σκόπιμη. Η κύρια διαφορά μεταξύ της σύγχρονης ώθησης για την τεχνολογία και τα προηγούμενα ιστορικά παραδείγματα της χρήσης των νανοσωματιδίων είναι ότι η σύγχρονη χρήση είναι εκ προθέσεως και με την κατανόηση των υποκείμενων μηχανισμών που παράγουν οι νέες ιδιότητες.

Έχουν γραφεί πολλά για τα νανοϋλικά, διότι βρίσκονται στο επίκεντρο του κόσμου της νανοκλίμακας, κατά συνέπεια, στην ανάπτυξη της нанοτεχνολογίας. Ωστόσο, η нанοτεχνολογία αντλεί στοιχεία από ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών κλάδων. Επειδή απαιτεί ευρεία γνώση των χημικών αλληλεπιδράσεων σε μοριακό επίπεδο, η χημεία είναι πολύ σημαντική για τη нанοτεχνολογία. Επίσης στην νανοκλίμακα, οι νόμοι της φύσης των μεγάλων σωματιδίων, συζεύγονται με τους νόμους των πολύ μικρών σωματιδίων, (κβαντομηχανική) και η σύζευξη αυτή είναι πολύ σημαντική για την κατανόηση της нанοτεχνολογίας. Επειδή το υλικό είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία μιας συσκευής και της δομής της, η επιστήμη και η μηχανική των υλικών παίζει μεγάλο ρόλο στην ανάπτυξη της нанοτεχνολογίας. Συγκεκριμένες εφαρμογές απαιτούν γνώσεις από άλλα πεδία, ιατρικές εφαρμογές, όπως η παραγωγή των διαφόρων φαρμάκων που απαιτεί γνώσεις της βιοϊατρικής. Ακόμη περισσότερες γνώσεις ιατρικής απαιτούνται για τις συσκευές νανοκλίμακας που πρέπει να περάσουν μέσα από τη κυκλοφορία του αίματος. Το θέμα είναι ότι αυτό το ευρύ φάσμα επιστημονικών κλάδων φέρνει ενδιαφέρουσες ευκαιρίες και προκλήσεις για τους ερευνητές. Υπάρχουν ευκαιρίες για σχεδόν κάθε επιστήμονα που θα συμμετέχει στην ανάπτυξη της επιστήμης της нанοτεχνολογίας. Μία αληθινή επαναστατική συνέπεια της ανάπτυξης της нанοτεχνολογίας είναι ότι οι επιστήμονες όλων των διαφορετικών κλάδων επιστημών εργάζονται από κοινού σε μια μεγάλη ποικιλία σχεδίων. Οι προκλήσεις είναι επίσης πολυάριθμες. Κάθε πεδίο φέρνει τη δική του εμπειρία και την ορολογία του. Αυτό καθιστά την επικοινωνία μεταξύ των επαγγελματιών στους τομείς αυτούς δύσκολη. Κατά συνέπεια, ένα μεγάλο μέρος της αλληλοεπικάλυψης στον τομέα της έρευνας εντάσσεται στον τρόπο και στον χρόνο που απαιτείται για να μοιραστούν και να κατανοηθούν τα επιστημονικά δεδομένα. Για να επιλυθεί

Οικονομίδης Α. Ιωάννης



αυτό το πρόβλημα, είναι πολλά τα διεπιστημονικά κέντρα για την καθιέρωσή τους. Σε αυτά τα κέντρα, βιολόγοι και φυσικοί εργάζονται σε συνεργασία με την ελπίδα ότι η προσέγγιση θα βοηθήσει τη συνεργασία στον τομέα της έρευνας, τη κατανόηση των διαφορετικών πεδίων, και τη καινοτομία από τις νέες προοπτικές πάνω στα προβλήματα των πεδίων. Το περιβάλλον αυτό είναι αναγκαίο, επειδή, όπως είδαμε και θα δούμε, η νανο-τεχνολογία αντλεί από πολλούς διαφορετικούς κλάδους. Ένα παράδειγμα χρήσης της νανοτεχνολογία με τη παραπάνω συνεργασία των επιστημόνων σε κάποιο έργο είναι το Ολυμπιακό Στάδιο «Φωλιά του πουλιού» στην Κίνα, σχήμα 1.2. Όπου στην κατασκευή των βασικών γηπέδων, χρησιμοποιήθηκαν:

- Νανο-επιστρώσεις.
- Νανο-μονωτικά υλικά.
- Νανο-αυτοκαθαριζόμενο γυαλί.
- Νανοϋλικά για τον καθαρισμό του αέρα.
- Νανο-χάλυβας στις πόρτες και τα παράθυρα, (πηγή η

<http://translate.google.gr/translate?hl=el&langpair=en%7Cel&u=http://www.gshjnm.com/en/display.asp%3Fid%3D107.> )



**Σχήμα 1.2** Ολυμπιακό στάδιο η φωλιά του πουλιού στο Πεκίνο της Κίνας .

Η νανοτεχνολογία, όπως και κάθε άλλη επιτυχημένη τεχνολογία, έχει πολλούς ιδρυτές. Κατά μία έννοια, το ίδιο το πεδίο της χημείας έχει ασχοληθεί με τη νανοτεχνολογία από την έναρξή της, όπως η επιστήμη των υλικών, και η

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

φυσική στερεάς κατάστασης. Στην νανοκλίμακα, δεν είναι πραγματικά όλα νέα. Αλλά η διερεύνηση και ο σχεδιασμός με ένα ειδικό μάτι της νανοκλίμακας είναι κάτι νέο - και επαναστατικό.

Ο όρος «νανοτεχνολογία», μπορεί να αναχθεί στο 1974. Ήταν η πρώτη χρήση από τον Norio Taniguchi σε ένα έγγραφο με τίτλο "Η βασική ιδέα της «νανοτεχνολογίας». Στο έγγραφο αυτό, που περιγράφεται ως Taniguchi νανοτεχνολογία, ορίζονται:

1. "Τι είναι η νανοτεχνολογία" και
2. "Από τη βασική έννοια της Νανοτεχνολογίας," η τεχνολογία της μηχανικής της ύλης σε επίπεδο νανομέτρου.

Ωστόσο, η ιστορία των νανοτεχνολογιών, προϋπήρχε αυτού. Κατά παράδοση, οι ρίζες της νανο-τεχνολογίας ανάγονται σε μια ομιλία που δόθηκε από τον νομπελίστα φυσικό Richard Feynman στο California Institute of Technology το Δεκέμβριο του 1959 με τον χαρακτηρισμό:

**«There's plenty of room at the bottom».**

11

Σε αυτή τη διάλεξη, ο Φάινμαν μίλησε για τις αρχές της μικρογράφησης και σε ατομικό επίπεδο ακρίβειας και το πώς αυτές οι έννοιες δεν παραβιάζουν κανένα γνωστό νόμο της φυσικής. Πρότεινε ότι ήταν δυνατό να οικοδομήσουμε ένα χειρουργικό ρομπότ νανοκλίμακας.

Στη συνέχεια, το 1987, ο Eric Drexler δημοσίευσε το βιβλίο με τίτλο, «Κινητήρες της Δημιουργίας». Ο ερχομός της Εποχής της νανοτεχνολογίας. (Drexler, 1987). Απευθύνεται σε ένα μη τεχνικό ακροατήριο, κάνοντας έκκληση προς τους επιστήμονες. Το βιβλίο αυτό ήταν ένα ιδιαίτερα πρωτότυπο έργο που περιγράφει μια νέα μορφή τεχνολογίας που βασίζεται στη μοριακή συναρμολόγηση η οποία θα είναι σε θέση να διευθετήσει την θέση των ατόμων και, συνεπώς, να επιτρέψει το σχηματισμό υλικών που οι νόμοι της φύσης δεν το επιτρέπουν. Αυτό μπορεί να ακούγεται σαν μια ευφάνταστη ιδέα, αλλά, όπως επισημαίνει ο Drexler, αυτό είναι κάτι που η φύση έχει ήδη κάνει, χωρίς βοήθεια από τον ανθρώπινο σχεδιασμό, με τους βιολογικούς υπολογιστές μέσα στο ίδιο το σώμα μας. Υπήρξε σημαντική συζήτηση σχετικά με τις δυνατότητες, που υπόσχονται, καθώς και προβλήματα με αυτό που σήμερα ονομάζεται «μοριακή παραγωγή». Ακόμη και οι δυνατότητες των μηχανών αυτών συζητούνται ευρέως. Αρκεί να πούμε, ωστόσο, ότι **Μηχανές Σημάτων**

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

**Δημιουργίας** είναι ένα διακεκριμένο σημείο εκκίνησης για τη νανοτεχνολογία και τη **συνειρμική\*** επιστημονική έρευνα. Παρά το γεγονός ότι μεγάλο μέρος αυτής της έρευνας δεν είχε καμία απολύτως σχέση με μοριακή κατασκευή, η εστίαση στην κλίμακα των αντικειμένων της έρευνας έγινε ο πιο σημαντικός παράγοντας.

Εργαλεία που αναπτύχθηκαν για το χειρισμό μεμονωμένων ατόμων, όπως είναι το μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας, Scanning Tunneling microscope – της IBM, νομπέλ φυσικής το 1986, επέτρεψε στους ερευνητές να μελετήσουν και να χειραγωγήσουν μεμονωμένα άτομα και μόρια με τρόπο που ποτέ πριν δεν ήταν δυνατόν. Σε μια πολύ γνωστή εικόνα, οι ερευνητές της IBM μετακίνησαν άτομα ξένου γύρω από ένα υπόστρωμα νικελίου με ένα μικροσκόπιο σάρωσης σήραγγας. Αυτή την εικόνα χρησιμοποιούν ώστε με τα άτομα να διευκρινίσουν το λογότυπο της εταιρείας, «IBM». Τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια έχουν εξελιχθεί σε σημείο που θα μπορούσαν να είναι όλο και περισσότερο χρήσιμα στο κάθε ερευνητικό περιβάλλον (συμπεριλαμβανομένων, μερικές φορές, και τις βιολογικές εφαρμογές). Εξάλλου είναι σε θέση να εμφανίσουν μεμονωμένα άτομα και τις ρυθμίσεις τους στο εσωτερικό των υλικών. Εξαιτίας αυτού οι ερευνητές άρχισαν να μελετούν την ανάπτυξη μερικών υλικών και συσκευών στην κλίμακα του ατόμου. Η ανακάλυψη νέων υλικών στην νανοκλίμακα, άρχισε ιδίως με τα του Richard Buckminster "Bucky" Fuller **φουλλερένια\*\*** (ονομάζεται επίσης και buckyballs). Τα buckyballs ονομάστηκαν έτσι λόγω της ομοιότητάς τους με τους γεωδαιτικούς τρούλους, σχήμα 1.3, που ο αρχιτέκτονας Richard Buckminster Fuller κατέστησε δημοφιλείς. Ανακαλύφθηκε το 1985 στο Rice University, αποτελείται από μια διάταξη 60 ατόμων άνθρακα, σχήμα 1.4.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα από Sumio Iijima της NEC είναι ένα τέτοιο παράδειγμα μελλοντικής τεχνολογικής ανάπτυξης, σχήμα 1.5.

---

**\*Συνειρμός** σύνδεση των παραστάσεων στην συνείδηση μας έτσι που, μόλις ανακληθεί στην επιφάνεια της συνείδησής μας η μια από αυτές, να ανασύρονται και οι άλλες.

**\*\*Φουλλερένια** είναι κάθε μόριο που αποτελείται εξ ολοκλήρου από άνθρακα..

Οικονομίδης Α. Ιωάννης



**Σχήμα 1.3** Γεωδαιτικός θόλος Eden Project στην Κορνουάλη.



**Σχήμα 1.4** Μοριακό μοντέλο C<sub>60</sub>, φουλλερενίων.



**Σχήμα 1.5** Φουλλερενικοί κρύσταλλοι του άνθρακα. Κάθε κρύσταλλος μονάδα αποτελείται από 60 άτομα άνθρακα.

#### 1.4 Η σημερινή κατάσταση της Νανοτεχνολογίας

14

Αφού εξετάσαμε τη βασική ιστορία της νανοτεχνολογίας, μπορούμε τώρα να διερευνήσουμε αυτά που ισχύουν σήμερα. Ειδικότερα, πώς γίνεται η έρευνα της νανοτεχνολογίας σε εργαστήρια σε όλο τον κόσμο σήμερα; Ποια είναι η τρέχουσα κατεύθυνση της έρευνας για τη νανοτεχνολογία; Η απάντησή μας βοηθά να κατανοήσουμε την ανάπτυξη, τον χαρακτηρισμό, και ενεργοποίηση των υλικών της νανοτεχνολογίας και των επιστημών που τα διέπει. Αυτό περιλαμβάνει τρεις κύριους άξονες της έρευνας: επιστήμη νανοκλίμακας (ή «νανοεπιστήμες» - την επιστήμη της αλληλεπίδρασης και της συμπεριφοράς στη νανοκλίμακα), τα νανοϋλικά ανάπτυξης (η πραγματική πειραματική ανάπτυξη της νανοκλίμακας υλικών, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης τους σε εφαρμογές συσκευής), και μοντελοποίηση ( εύρεση των αλληλεπιδράσεων και των ιδιοτήτων των υλικών νανοκλίμακας με τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών ). Η κατανόηση των υποκείμενων επιστημών της νανοκλίμακας και αλληλεπιδράσεων είναι εξαιρετικά σημαντική για την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές αποτελούν έναν από τους κύριους τομείς της έρευνας στον τομέα της νανοτεχνολογίας. Οι νόμοι της φυσικής που λειτουργούν πάνω σε αντικείμενα στη νανοκλίμακα συνδυάζουν την κλασική (ή νευτώνεια) μηχανική, η οποία ρυθμίζει τις δραστηριότητες των καθημερινών

αντικειμένων, και τη κβαντική μηχανική, η οποία διέπει τις αλληλεπιδράσεις των πολύ μικρών πραγμάτων.

Αν και πολλοί από τους θεμελιώδεις νόμους της φύσης, που λειτουργούν σε αυτό το επίπεδο έχουν ανακαλυφθεί, η επιστημονική ερευνά τους εξακολουθεί να είναι πολύ δύσκολη. Η κβαντική μηχανική δρα σε αυτή την κλίμακα, αλλά και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού - δηλαδή μεγαλύτερο από δύο - ατόμων σε υλικά νανοκλίμακας μπορεί να είναι δύσκολο να προβλέψει κανείς το πραγματικό αποτέλεσμα αυτών των αλληλεπιδράσεων. Επιπλέον, η κλασική μηχανική εφαρμόζεται σε αυτή τη κλίμακα, αλλά το μικρό μέγεθος των υλικών και η στενή κλίμακα των αλληλεπιδράσεων μπορεί να κάνει τις δυνάμεις που είναι καλά κατανοητές σε μεγάλες κλίμακες (π.χ. τριβή) και ισχυρές σε αυτές τις κλίμακες (π.χ., βαρύτητα) λιγότερο κατανοητές και ασθενέστερες στη νανοκλίμακα. Η κατανόηση των δυνάμεων και των θεωριών στο παιχνίδι εντός της νανοτεχνολογίας είναι μία μόνο πτυχή των νανοεπιστημών.

Μια άλλη πολύ σημαντική πτυχή των νανοεπιστημών είναι η κατανόηση του σχηματισμού, δηλαδή της δόμησης, των υλικών και των συσκευών στην νανοκλίμακα. Η εξέταση στη νανοκλίμακα, των παραδοσιακών (μη nano) υλικών, δομών, και συσκευών συχνά αναφέρεται ως "χύδην τεχνολογία", "bulk technology" Για να είμαστε σίγουροι, αυτό το "χύδην" ύφος της τεχνολογίας έχει οδηγήσει σε πολλές μεγάλες επιτυχίες: κάνουμε εύκολα θαυμάσιες υπολογιστικές συσκευές, εξαιρετικά ισχυρό ατσάλι, και πολύ καθαρά κεραμικά. Χρησιμοποιώντας χύμα τεχνολογία, μπορούμε να δημιουργήσουμε εξαιρετικά μικρές συσκευές και υλικά. Ωστόσο, αυτή η δημιουργία εξακολουθεί να γίνεται με κοπή, ξεφλούδισμα, σφυροκόπημα, τήξη, καθώς και την εκτέλεση άλλων τέτοιων διαδικασιών στα χύμα υλικά για τη δημιουργία μιας νέας συσκευής, δομής, ή υλικό. Η κύρια διαφορά με την νανοτεχνολογία είναι η διαδικασία δημιουργίας. Με τη νανοτεχνολογία, ξεκινάμε από την ατομική κλίμακα και, ελέγχοντας ατομική / μοριακή τοποθέτηση και ρύθμιση, θα εδραιώσουμε την τεχνολογία σε μοναδικές συσκευές, υλικά και δομές. Αυτός ο νέος τύπος σχηματισμού απαιτεί νέους τύπους σύνθεσης, που απαιτούν μια νέα κατανόηση του σχηματισμού των υλικών στη νανοκλίμακα. Επίσης, πολλά υλικά έχουν πολύ μοναδικές ιδιότητες, όταν αναπτυχθούν σε νανοκλίμακα. Πολλές διάφορες ατομικές ρυθμίσεις των υλικών δεν εντάσσονται στην χύμα μορφή των υλικών. Η κατανόηση των αλλαγών που τα υλικά αυτά

υποβάλλονται όπως αυτά διαμορφώνονται σε μικρότερη κλίμακα, είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη της χρήσης αυτών των υλικών στις συσκευές.

Η νανοτεχνολογία σήμερα επικεντρώνεται, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, σχετικά με την ανάπτυξη, την κατανόηση και χρήση των υλικών στη νανοκλίμακα. Τα υλικά αποτελούνται από μια ρύθμιση συγκεκριμένων ατόμων - συνήθως με ένα συγκεκριμένο τρόπο – που μας βοηθάν να καθορίσουμε τις ιδιότητες του υλικού. Για παράδειγμα, ο χάλυβας που είναι ένα από τα ισχυρότερα υλικά κατασκευών, με τον τρόπο αυτό η αντοχή του θα αυξηθεί, καθώς άνθρακας προστίθεται σε αυτόν. Ο χάλυβας, που παράγεται κυρίως από σίδηρο και άλλα στοιχεία όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, για παράδειγμα, περιέχει 10 τοις εκατό χρώμιο για την προστασία του υλικού από τη διάβρωση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

## 2.1 Ορισμοί και Κλίμακες

Πριν εξετάσουμε την νανοτεχνολογία και την νανοκλίμακα στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού, θα πρέπει να είναι σαφές τι εννοούμε όταν χρησιμοποιούμε όρους όπως «νανοτεχνολογία», «νανοεπιστήμες» και «νανοκλίμακα». Είναι μια βασική ονοματολογία, η οποία χρησιμοποιείται για να περιγράψει ορισμένα χαρακτηριστικά συστημάτων. Οι εν λόγω ονοματολογίες συνήθως αποσκοπούν στην εξάλειψη σύγχυσης και ενθαρρύνουν την ακριβή χρήση του προθέματος «νανο» μεταξύ αυτών που συζητάνε για τα εν λόγω συστήματα.

Το «νανο» προέρχεται από την ελληνική λέξη νάνος, που σημαίνει «πολύ κοντός άνθρωπος». Τα περισσότερα από τα προθέματα μέτρησης που χρησιμοποιούνται σήμερα προέρχονται από την ελληνική και λατινική γλώσσα. Στη ρίζα της, το πρόθεμα «νανο-» αναφέρεται σε μια κλίμακα του μεγέθους στο μετρικό σύστημα. «Nano» χρησιμοποιείται σε επιστημονικές μονάδες, η οποία χαρακτηρίζει το ένα δισεκατομμυριοστό (0,000 000 001) της βασικής μονάδας. Όταν μιλάμε για τη νανοτεχνολογία, μιλάμε για μια κλίμακα - κατά μία τάξη μεγέθους - για το μέγεθος, ή το μήκος. Κάνουμε μια αναφορά σε αντικείμενα που είναι κάποιου μεγέθους σε κλίμακα που έχει σημασία όταν μιλάμε για νανόμετρα (nm). Με τη χρήση αυτής της ορολογίας είναι πιο εύκολο να αναφερθούμε στο μέγεθος των αντικειμένων που μας απασχολεί στον τομέα της νανοτεχνολογίας, και συγκεκριμένα στα άτομα. Αν επρόκειτο να περιγράψει το μέγεθος των ατόμων και μορίων σε πόδια ή μέτρα, θα πρέπει να πούμε ότι ένα άτομο υδρογόνου (το μικρότερο άτομο) είναι  $7,874 \times 10^{-10}$  πόδια ή  $2,4 \times 10^{-10}$  μέτρα. Αντ' αυτού, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε νανόμετρα και να πούμε ότι το άτομο του υδρογόνου είναι 0,24 nm.

Νανοκλίμακα, λοιπόν, είναι η κλίμακα μεγέθους στην οποία λειτουργεί η νανοτεχνολογία. Αν και έχουμε ένα κατώτατο όριο αυτής της κλίμακας μεγέθους (το μέγεθος ενός ατόμου), ο ορισμός του ανωτάτου ορίου αυτής της κλίμακας είναι πιο δύσκολη. Μια χρήσιμη και καλά αποδεκτή σύμβαση είναι ότι κάτι θα υφίσταται στην νανοκλίμακα όταν τουλάχιστον μία από τις διαστάσεις του (ύψος, πλάτος ή βάθος) είναι μικρότερη από περίπου 100 νανόμετρα. Στην

Οικονομίδης Α. Ιωάννης



πραγματικότητα, είναι τα όρια που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό του νανοτεχνολογίας: «Η νανοτεχνολογία είναι η κατανόηση και ο έλεγχος της ύλης σε διαστάσεις περίπου 1 έως 100 nm, όπου μοναδικά φαινόμενα παρέχουν καινοτόμες εφαρμογές». Για το σκοπό αυτό, είναι χρήσιμο να προστεθούν δύο άλλες δηλώσεις για να σχηματίσουμε έναν πλήρη ορισμό. Πρώτον, η νανοτεχνολογία περιλαμβάνει τη διαμόρφωση και τη χρήση των υλικών, των κατασκευών, στις συσκευές και τα συστήματα που έχουν μοναδικές ιδιότητες λόγω του μικρού μεγέθους τους. Δεύτερον η νανοτεχνολογία περιλαμβάνει τις τεχνολογίες που επιτρέπουν τον έλεγχο των υλικών στη νανοκλίμακα. Αν και έχουμε διαπιστώσει ότι ο ορισμός «νανο-» στην «νανοτεχνολογία», σηματοδοτεί μια συγκεκριμένη κλίμακα, είναι σημαντικό να πάρουμε μια καλή ιδέα για το τι είναι η κλίμακα - δηλαδή, πως η νανοκλίμακα σχετίζεται με την καθημερινή μας εμπειρία. Υπάρχουν διάφορες αναλογίες που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να εξηγήσουμε το μέγεθος του μετρητή νανο σε σχέση με τα μεγέθη που είναι ευρύτερα γνωστά. Για παράδειγμα, παίρνει 50.000 nm, προκειμένου να καλυφθεί το πλάτος μιας ενιαίας δέσμης της ανθρώπινης τρίχας. Ένα άλλο παράδειγμα είναι το εξής: ένα νανόμετρο σε σύγκριση με το μέγεθος ενός μέτρου έχει περίπου την ίδια αναλογία όπως και μια μπάλα του γκολφ συγκρινόμενη με το μέγεθος της Γης.

## 2.2 Βασικά επιστημονικά πεδία – θεωρίες

Εκτός από τις πραγματικές μηχανές και συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της νανοκλίμακας, οι επιστήμονες αξιοποιούν πολλές και διαφορετικές θεωρίες, προκειμένου να προβλέψουν και να εξηγήσουν τα φαινόμενα που συμβαίνουν όταν ασχολούνται με αντικείμενα στη νανοκλίμακα. Οι θεωρίες είναι η ψυχή της επιστήμης και της τεχνολογίας. Αυτές οδηγούν την έρευνα και επιτρέπουν την ανάπτυξη. Οδηγούν στη δημιουργία νέων εργαλείων και σε νέες συμφωνίες του κόσμου γύρω μας. Μερικές φορές, οι θεωρίες μπορεί να ξεπεράσουν κατά πολύ τις τεχνολογικές προόδους που επιτρέπουν. Αν και η νανοτεχνολογία στηρίζεται σε ολόκληρο σχεδόν το φάσμα των επιστημονικών θεωριών και οδηγεί στην πλήρη ανάπτυξή τους, υπάρχουν ορισμένες βασικές θεωρίες που καθορίζουν το σημερινό επίπεδο της νανοτεχνολογίας. Μεταξύ των σημαντικότερων θεωριών είναι η κβαντική μηχανική, οι Χημικοί δεσμοί, η Κρυσταλλική δομή. Οι θεωρίες αυτές εξετάζουν την δομή της ύλης ως μη

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

συνεχές μέσο. Σε αντίθεση με τις θεωρίες του συνεχούς μέσου που εξετάζουν την συμπεριφορά της ύλης σε μεγάλες κλίμακες. Ας τις εξετάσουμε με τη σειρά.

### 2.2.1 Κβαντική μηχανική

Συζητήσαμε εν συντομία μερικές από τις παράξενες αλληλεπιδράσεις που έχουν προβλέψει με την κβαντική μηχανική, φθάνοντας σε σημαντική απόκλιση από τη παραδοσιακή νευτώνεια φυσική. Αυτό συμβαίνει γιατί η νανοτεχνολογία λειτουργεί σε αρκετά μικρή κλίμακα, τόσο μικρή που και τα αποτελέσματα ενός μόνο άτομου (ή μικρές ομάδες ατόμων) γίνονται σημαντικά. Η κβαντική θεωρία είναι καθοριστικής σημασίας για οποιαδήποτε εξήγηση των φαινομένων στην νανοκλίμακα. Εδώ, θα υπεισέλθουμε σε ορισμένες από τις πιο ειδικές πτυχές της κβαντικής μηχανικής.

Είναι απαραίτητη η χρήση της κβαντικής θεωρίας για να κατανοηθεί η συμπεριφορά των συστημάτων στη νανοκλίμακα και σε μικρότερες κλίμακες, λόγω αποτυχίας της Νευτώνειας θεωρίας να εξηγήσει τα φαινόμενα σε αυτές τις κλίμακες. Εάν οι νόμοι του Νεύτωνα διέπουν τη λειτουργία ενός ατόμου, αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια θα πρέπει να προσελκύονται στον θετικά φορτισμένο πυρήνα και θα αλληλοεξουδετερώνονταν. Αυτό φυσικά δεν συμβαίνει. Η κβαντική μηχανική περιορίζει τα ηλεκτρόνια στο ηλεκτρονικό κέλυφος γύρω από τον πυρήνα του ατόμου. Σε αυτό στηρίζονται πολλές διαφορετικές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των φωτοδιόδων (LED). Ηλεκτρόνια μπορούν να κάνουν ένα άλμα από το ένα στο άλλο κέλυφος και να εκπέμπουν φως ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος.

Κάθε αντικείμενο, έχει δυο καταστάσεις, όπως για παράδειγμα το φως, ως κύμα και ως σωματίδιο. Μπορούμε να παρατηρήσουμε διάφορες πτυχές ενός αντικειμένου, όπως την θέση του και την δυναμική του. Η πράξη της παρατήρησης του αντικειμένου επιβάλλει στο κύμα να πάρει μια συγκεκριμένη κατάσταση - αυτή που παρατηρούμε.

Είναι χαρακτηριστικό με την κβαντική μηχανική ότι η αοριστία αρχικά περιορίζεται σε ατομικό επίπεδο και μπορεί να μετατραπεί σε μακροσκοπική αοριστία, η οποία στη συνέχεια μπορεί να επιλυθεί με άμεση παρατήρηση. Μας εμποδίζει με αυτόν τον τρόπο στην αποδοχή ως έγκυρου ενός «θολού μοντέλου» για την αναπαράσταση της πραγματικότητας. Από μόνη της δεν θα

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

ενσωματώνει τίποτα ασαφές ή αντιφατικό. Υπάρχει μια διαφορά μεταξύ μιας φωτογραφίας που οφείλεται σε κακή εστίαση και ενός στιγμιότυπου των νεφών και της ομίχλης, (Schrodinger, 1980).

Είναι αυτή η πιθανότητα που οδήγησε τον σκεπτικισμό του Einstein για την κβαντική μηχανική, ότι «ο Θεός δεν παίζει ζάρια»: «μια εσωτερική φωνή μου λέει ότι δεν είναι ακόμα το πραγματικό πράγμα». Η θεωρία λέει πολλά, αλλά στην πραγματικότητα δεν μας φέρνει πιο κοντά στα μυστικά του «παλαιού». Εν πάση περιπτώσει, είμαι πεπεισμένος ότι Αυτός δεν παίζει ζάρια, (The Born-Einstein Letters, 1926). Η αντίθεση του Αϊνστάιν στη κβαντομηχανική ήταν βασικά στο γεγονός ότι ακόμη και η ρίψη ενός κέρματος ή ενός κύβου που μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας πιθανότητες, αυτό δεν σημαίνει ότι οι φυσικές κινήσεις είναι απρόβλεπτες. Με την κβαντική μηχανική απλά δεν γνωρίζουμε τον υποκείμενο μηχανισμό. Ωστόσο, η κβαντική μηχανική έχει αποδειχθεί ότι είναι πολύ επιτυχής στην πρόβλεψη και στην εξήγηση των φαινομένων. Ο Αϊνστάιν πίστευε ότι, αν και η κβαντική μηχανική εξηγεί με επιτυχία τόσα πολλά φαινόμενα, μια πιο ολοκληρωμένη θεωρία τελικά θα αναπτυχθεί - και αυτό παραμένει να αποδειχθεί. Εν τω μεταξύ, η κβαντική θεωρία παραμένει ένα ζωτικό εργαλείο για την εξήγηση και πρόβλεψη πολλών από τα θαύματα που συμβαίνουν στο πεδίο της νανοτεχνολογίας, όπως θα φανεί. Τα βασικά της κβαντικής μηχανικής, (Allhoff et al, 2010), μπορούν να συνοψιστούν σε τέσσερις βασικές αρχές:

1. Η αβεβαιότητα του Heisenberg δηλώνει καταρχήν ότι δεν είναι δυνατό να γνωρίζουμε τις τιμές των ιδιοτήτων ενός συστήματος αμέσως με ακρίβεια. Στην πραγματικότητα, όσο περισσότερα ξέρουμε για μια ιδιότητα, τόσα λιγότερο βέβαιοι μπορούμε να είμαστε για μια άλλη ιδιότητα. Αυτό μαθηματικά περιγράφεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta x * \Delta p > \hbar / 2$$

όπου  $\hbar$  είναι σταθερά του Πλανκ ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ j * s}$ ) διαιρούμενο διά  $2\pi$ , και  $\Delta x$  και  $\Delta p$  αντιπροσωπεύουν τις βεβαιότητες στη μέτρηση της θέσης και της ορμής ενός αντικειμένου. Η αρχή αυτή υποστηρίζει ότι δεν υπάρχει τρόπος να γνωρίζει κανείς τη θέση ενός κινούμενου αντικείμενου, (σωματίδιο ή μεγαλύτερο), ακόμα και αν δοθεί με κάθε

δυνατή λεπτομέρεια. Ως εκ τούτου, είναι αδύνατον να προβλέψουμε πού θα πάει με απόλυτη βεβαιότητα.

2. Η δυαδικότητα κύματος-σωματιδίων σε όλα τα θέματα. Οποιοδήποτε απλό πείραμα μπορεί να δείχτεί είτε ως ιδιότητες κύματος είτε ως ιδιότητες σωματιδίου αλλά όχι και τα δύο.
3. Κάθε σύστημα (ή αντικείμενο) είναι εντελώς περιγράψιμο από μια συνάρτηση κύματος. Αυτή η περιγραφή είναι πιθανολογική και η πιθανότητα ενός γεγονότος συνδέεται με το πλάτος του κύματος της συνάντησης.
4. Οι περιγραφές της Κβαντικής μηχανικής των μεγάλων συστημάτων εκ του σύνεγγυς προσεγγίζουν την κλασική περιγραφή.

Οι τέσσερις αυτές αρχές δεν παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της κβαντικής μηχανικής όπως άλλωστε και οι νόμοι του Νεύτωνα για την κίνηση δεν περιγράφουν πλήρως το σύνολο της κλασικής μηχανικής. Μάλλον αυτοί παρέχουν τη θεμελιώδη βάση για την κατανόηση την έννοια της κβαντικής μηχανικής. Θα δούμε πώς αυτές οι αρχές της κβαντικής μηχανικής αφορούν διαφορετικές πτυχές της νανοτεχνολογίας.

### 2.2.2 Χημικοί δεσμοί

Οι χημικοί δεσμοί είναι υπεύθυνοι για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων και των μορίων και, επομένως, πολύ σημαντικοί για την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας. Αν και η αυστηρή θεωρητική εξήγηση των διαφορετικών χημικών δεσμών είναι το αντικείμενο των θεωριών κβαντικής, θεωρητικοί συνήθως προσφεύγουν σε πιο ποιοτικές περιγραφές που είναι πιο εύκολο να κατανοηθούν. Οι Χημικοί δεσμοί βασίζονται κυρίως στην κατανομή των ηλεκτρονίων ή των ηλεκτρονικών αλληλεπιδράσεων, δεσμεύοντας τα άτομα μεταξύ τους. Σε γενικές γραμμές υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι δεσμών που διαφέρουν ως προς τη δύναμη με την οποία ο δεσμός ενώνει τα δύο άτομα. Οι ισχυρότεροι τύποι δεσμών είναι οι ομοιοπολικοί και οι ιοντικοί δεσμοί. Οι ασθενέστεροι δεσμοί είναι του υδρογόνου και οι Van der Waals δεσμοί. Η ομοιοπολική σύνδεση χαρακτηρίζεται από την κατανομή των ηλεκτρονίων μεταξύ των ατόμων, (Charitidis, 2006). Σε γενικές γραμμές, τα άτομα "προτιμούν" να έχουν οκτώ ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα τους, τη στοιβάδα σθένους, εκτός αν είναι η πρώτη οπότε συμπληρώνεται με δύο.

Στοιχεία που έχουν γεμίσει την εξωτερική στοιβάδα τους φυσικά είναι γνωστά ως ευγενή αέρια, επειδή τείνουν να είναι αδρανή: δεν αλληλεπιδρούν με άλλα στοιχεία. Στους ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων τα ηλεκτρόνια προσπαθούν να μοιράζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να διαμορφώνονται για κάθε άτομο δημιουργώντας ένα ευγενές αέριο. Αυτό μπορεί να συμβεί με άτομα του ίδιου στοιχείου ή με άτομα διαφορετικών στοιχείων. Ένα παράδειγμα είναι, όπως τα στοιχεία του υδρογόνου, τα οποία προκαλούν δεσμούς υδρογόνου. Τα άτομα Υδρογόνου έχουν ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο. Η εξωτερική στοιβάδα στα άτομα αυτά μπορεί να έχει το πολύ δύο ηλεκτρόνια. Έτσι, ένα άτομο δεσμού υδρογόνου με κάποιο άλλο άτομο του υδρογόνου μέσω ομοιοπολικής σύνδεσης μπορεί να έχει πραγματικά μια πλήρως συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα. Αυτό αποτελεί το μόριο υδρογόνου με δύο άτομα. Ένα παράδειγμα διαφορετικών ατόμων που σχηματίζουν έναν ομοιοπολικό δεσμό είναι το υδρογόνο με το χλώριο. Το χλώριο περιλαμβάνει επτά άτομα στην εξωτερική του στοιβάδα, και έτσι σχηματίζοντας ένα ομοιοπολικό δεσμό με το υδρογόνο επιτρέπει να μοιράζονται ένα ηλεκτρόνιο με το υδρογόνο και ως αποτέλεσμα έχουμε μια πλήρη εξωτερική στοιβάδα ηλεκτρονίων. Οι ιοντικές ενώσεις βασίζονται στις ηλεκτρονικές δυνάμεις μεταξύ ιόντων των ατόμων. Ιόντα είναι άτομα που έχουν περισσότερα ή λιγότερα ηλεκτρόνια από τα πρωτόνια, αναγκάζοντάς τα να έχουν αρνητική ή θετική ηλεκτρική φόρτιση. Τα στοιχεία τείνουν να σχηματίζουν ιόντα ώστε να έχουν ένα κλειστό εξωτερικό περίβλημα. Για παράδειγμα, το νάτριο έχει 11 ηλεκτρόνια - δύο στην εσωτερική στοιβάδα, οκτώ στη δεύτερη στοιβάδα, και ένα στην εξωτερική στοιβάδα. Ως εκ τούτου, αποτελεί συνήθως ένα ιόν με ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο. Το χλώριο έχει 17 συνολικά ηλεκτρόνια - δύο στην εσωτερική στοιβάδα, οκτώ στη δεύτερη στοιβάδα, και επτά στην εξωτερική στοιβάδα. Ως εκ τούτου, αποτελεί συνήθως ένα ιόν με ένα πρόσθετο ηλεκτρόνιο (επειδή "θέλει" οκτώ ηλεκτρόνια στο εξωτερικό περίβλημα του). Το γεγονός αυτό καθιστά το νάτριο και το χλώριο άτομα που ενδέχεται να έχουν ιοντικούς-συμμαχικούς δεσμούς μεταξύ τους και παράγουν χλωριούχο νάτριο (NaCl), το καθημερινό επιτραπέζιο αλάτι. Υλικά ιοντικών και ομοιοπολικών συνδέσεων τείνουν να έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Σύνθετα ιοντικά υλικά τείνουν να έχουν υψηλότερα σημεία τήξης και βρασμού από ό,τι αυτά των ομοιοπολικών ενώσεων. Εξαιτίας αυτού, οι ενώσεις ιόντων είναι συχνότερες σε στερεά κατάσταση σε θερμοκρασία δωματίου, σε αντίθεση με τις ομοιοπολικές

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

ενώσεις. Ωστόσο, οι ιοντικοί και ομοιοπολικοί δεσμοί αντιπροσωπεύουν τα άκρα ενός φάσματος δεσμών που συνθέτουν τις μορφές των υλικών. Οι εσωτερικοί ατομικοί δεσμοί, στις περισσότερες ενώσεις γίνονται με κάποιο συνδυασμό ομοιοπολικών και ιοντικών δεσμών.

Μια ηπιότερη μορφή των δεσμών προκαλείται από τη "van der Waals δύναμη" μεταξύ δύο ατόμων. Η δύναμη αυτή προέρχεται από την πόλωση των μορίων ή ατόμων σε δίπολα (δηλαδή, όπου θετικά και αρνητικά φορτία διαχωρίζονται και δεν εξουδετερώνουν χωρικά το ένα το άλλο). Αυτό προκαλείται με τη περιστροφή των αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων γύρω από το θετικά φορτισμένο πυρήνα του ατόμου. Αν και αυτό είναι ένας αδύναμος δεσμός, μπορεί να προκύψει μεταξύ όλων των ουσιών και, επομένως, είναι πολύ σημαντικός. Υπάρχουν άλλοι τύποι δεσμών από εκείνους μεταξύ ατόμων που είναι σημαντικοί στον τομέα της νανοτεχνολογίας. Η προσωρινή σύνδεση ενός μορίου πάνω στην επιφάνεια ενός υλικού μπορεί να τροποποιήσει τις ιδιότητες της αγωγιμότητας του. Όταν κατασκευάζεται με το σωστό τρόπο, αυτή η συγκόλληση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ειδικών χημικών ειδών. Σε ορισμένες εφαρμογές, η συγκόλληση είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της λειτουργίας και του σχεδιασμού της τεχνολογίας.

### 2.2.3 Κρυσταλλική δομή

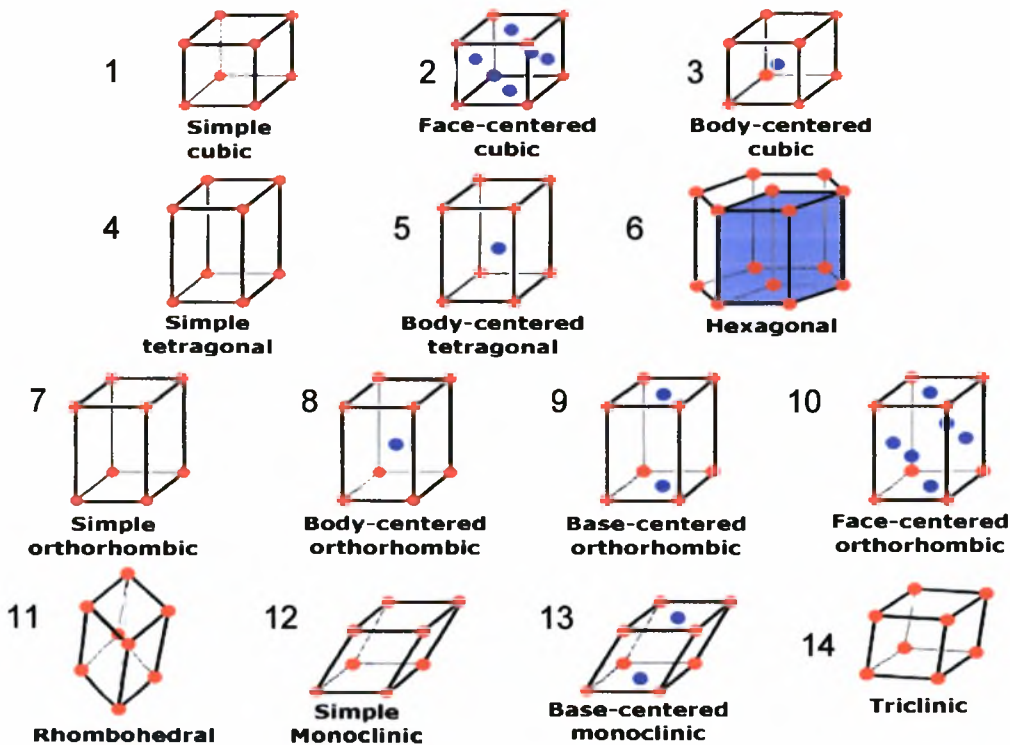
Στα περισσότερα υλικά, τα άτομα οργανώνονται με ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό που επαναλαμβάνεται με τα ίδια χαρακτηριστικά στις τρεις διαστάσεις σε ολόκληρη την έκταση του υλικού. Αυτή η επανάληψη της διάταξης των ατόμων είναι γνωστή ως διάρθρωση κρυσταλλικής δομής. Ένα ευρύ φάσμα ειδικών κρυσταλλικών δομών υπάρχουν και εξαρτώνται από τη σύνδεση μεταξύ των ατόμων τους και τη δομή τους, καθώς και από πολλούς άλλους παράγοντες (για παράδειγμα, ο τρόπος με τον οποίο το υλικό στερεοποιείται). Η περιοδικότητα του κρυστάλλου περιγράφεται από ένα μαθηματικό πλέγμα. Το 1845, ο Γάλλος φυσικός Auguste Bravais απέδειξε ότι υπάρχουν μόνο 14 μοναδικά πλέγματα που μπορούν να επαναλαμβάνουν (και να γεμίσουν) τον τρισδιάστατο χώρο. Αυτά τα 14 πλέγματα γνωστά σήμερα ως Κρυσταλλικό πλέγμα προς τιμήν του και είναι τα εξής:

Η κρυσταλλική δομή αποτελείται από ένα ή περισσότερα άτομα που επαναλαμβάνονται σε κάθε σημείο του πλέγματος.

**Πίνακας 1. Κρυσταλλικά πλέγματα**

1	Απλό κυβικό	8	Σώμα με επίκεντρο orthorhombic
2	Με επίκεντρο και όψη κυβικό	9	Βασικό επίκεντρο orthorhombic
3	Σώμα με επίκεντρο κυβικό	10	Όψης με επίκεντρο orthorhombic
4	Απλό τετραγωνικό	11	Rhombohedral
5	Σώμα με επίκεντρο το τετράγωνο	12	Απλά μονοκλινή
6	Εξαγωνικό.	13	Με βασικό επίκεντρο μονοκλινή
7	Απλό orthorhombic	14	Triclinic

και φαίνονται στο σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1** Μορφές κρυσταλλικών πλεγμάτων

Η κρυσταλλική δομή είναι πολύ σημαντική για όλες τις ιδιότητες ενός υλικού, από τη μηχανική αντοχή έως τις ηλεκτρονικές και μαγνητικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, το διαμάντι και ο γραφίτης είναι φτιαγμένα από το ίδιο χημικό στοιχείο: περιέχουν μόνο άτομα άνθρακα. Η κρυσταλλική δομή ενός διαμαντιού είναι μια κρυσταλλική όψη με επίκεντρο κυβικό πλέγμα με ένα μόνο άτομο

άνθρακα σε κάθε σημείο πλέγματος. Σε αυτή τη μορφή, το διαμάντι είναι το σκληρότερο φυσικό υλικό γνωστό για τον άνθρωπο. Ωστόσο, ο γραφίτης είναι μια διαφορετική ρύθμιση του ίδιου τύπου ατόμου. Στον γραφίτη, τα άτομα άνθρακα έχουν μορφή εξαγωνικών φύλλων, τα οποία στη συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας van der Waals δύναμης. Ο άνθρακα σε αυτή τη μορφή δεν έχει επομένως τόσο ισχυρές συνδέσεις σε όλες τις κατευθύνσεις, όπως το διαμάντι.

Γιατί λοιπόν τα υλικά παίρνουν διάφορες μορφές κρυσταλλικής δομής; Αν και η συγκεκριμένη απάντηση είναι διαφορετική για κάθε είδος υλικού, η γενική απάντηση είναι ότι τα άτομα, διευθετούνται με τον πιο ενεργειακά ευκολότερο δρόμο για το σχηματισμό των κρυστάλλων. Ακριβώς όπως οι μπάλες κυλούν στο χαμηλότερο σημείο σε ένα λόφο. Τα άτομα, διευθετούνται στην κατάσταση με την χαμηλότερη δυνατή ενέργεια.

Η διάταξη των ατόμων είναι ιδιαίτερα ισχυρή με υλικά στην νανοκλίμακα. Τα υλικά σε μεγαλύτερη κλίμακα, σχηματίζουν την ίδια δομή κρυστάλλου αλλά με διαφορετικές κατευθύνσεις προσανατολισμού εντός του ίδιου υλικού. Επίσης, ανωμαλίες στην κρυσταλλική δομή μπορεί να συμβούν. Και τα δύο φαινόμενα μπορεί να προκαλέσουν την εξασθένηση της αντοχής των υλικών ή την υποβάθμιση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους. Ωστόσο, στα υλικά νανοκλίμακας κακοί προσανατολισμοί και ατέλειες είναι πολύ λιγότερα. Στα περισσότερα υλικά στην νανοκλίμακα είναι σαφές ότι η κρυσταλλική δομή τους είναι ζωτικής σημασίας για τις ιδιότητες του υλικού.

Αυτά τα εργαλεία και οι θεωρίες δεν αντιπροσωπεύουν ολόκληρο το σετ εργαλείων που οι επιστήμονες χρησιμοποιούν στην ανάπτυξη αυτής της νέας τεχνολογίας και της κατανόησης των επιστημονικών φαινομένων στη νανοκλίμακα. Οποιαδήποτε τέτοια αντιμετώπιση θα απαιτούσε πολύ περισσότερο χώρο από ό, τι μπορούμε να διαθέσουμε εδώ. Αντ' αυτού, αυτή η θεώρηση έχει σαν σκοπό να δώσει μια εισαγωγή στα είδη των εργαλείων και διαδικασιών σκέψης που οι επιστήμονες χρησιμοποιούν για να κατανοήσουν και να χειριστούν σχέδια στην νανοκλίμακα.

### 2.3 Τι είναι νανοϋλικά

Νανοϋλικό είναι ένα υλικό όπου ορισμένες ελέγξιμες σχετικά διαστάσεις του είναι της τάξης των 100 nm ή μικρότερες. Η απλή παρουσία της νανοκλίμακας στην δομή από μόνη της δεν είναι αρκετή για να οριστεί ένα νανοϋλικό,

Οικονομίδης Α. Ιωάννης



δεδομένου ότι τα περισσότερα αν όχι όλα τα υλικά που έχουν δομή σε αυτό το φάσμα μεγέθους. Η ικανότητα ελέγχου της δομής σε αυτή την κλίμακα είναι απαραίτητη. Θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει, με αυτή την έννοια, ότι πολλά από τα κλασικά κράματα και δομικά υλικά που περιέχουν συνιστώσες ναοκλίμακας στον σχεδιασμό τους (π.χ., Οξειδίο-Διασπορά-Ενισχυμένη ή ODS κράματα) θα μπορούσαν να ονομαστούν ναουλικά. Συμβατικά, ωστόσο, η σύγχρονη χρήση του όρου δεν περιλαμβάνει τα κλασικά δομικά υλικά. Στη σύγχρονη χρήση, τα ναουλικά που έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα είναι τα υλικά των οποίων η δομή στην ναοκλίμακα ελέγχεται και κατέχει δεσπόζουσα επίδραση στην επιθυμητή συμπεριφορά του υλικού ή της συσκευής. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες ναουλικών:

1. Διακριτά τα ναουλικά,
2. Υλικά συσκευών ναοκλίμακας, και τα
3. Χύδην ναουλικά.

26

Διακριτά ναουλικά ή (*discrete nanomaterials* -dn) υλικά στοιχεία είναι τα υλικά που η μία διάστασή τους είναι τουλάχιστον 1-10 nm σε κλίμακα (σαν παράδειγμα έχουμε τα ναοσωματίδια και ναοϊνες όπως ναοσωλήνες άνθρακα). Υλικά συσκευών ναοκλίμακας είναι στοιχεία υλικών που περιέχονται μέσα σε συσκευές, συνήθως ως λεπτοί υμένες (ένα παράδειγμα ενός τέτοιου υλικού θα είναι το λεπτό στρώμα οξειδίου του μετάλλου που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ορισμένων ημιαγωγών).

Για να καταλάβουμε πώς θα χρησιμοποιούνται τα ναουλικά, θα πρέπει να έχουμε μια σαφή εικόνα όχι μόνο για τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνονται, αλλά και πως δημιουργούνται οι διάφορες συνθέσεις τους. Όλα ξεκινούν με τον άνθρακα. Άτομα άνθρακα είναι παντού. Στην πραγματικότητα, μπορείτε να τα βρείτε σε εκατομμύρια μόρια. Αυτά τα μόρια έχουν μια ευρεία γκάμα ιδιοτήτων, που σημαίνει ότι μπορούν να βρεθούν σε κάθε δυνατή μορφή. Από αέρια όπως το προπάνιο σε στερεά όπως τα διαμάντια, το σκληρότερο υλικό που απαντάται στη φύση.

Στους ομοιοπολικούς δεσμούς, τα άτομα που μοιράζονται δύο ηλεκτρόνια, ανεξάρτητα από το εάν μετακινείται ή οδηγείται σε αυτούς, η από κοινού αξιοποίηση των ηλεκτρονίων είναι αυτή που κρατά δεσμευμένα τα άτομα σε ένα μόριο. Αν η ικανότητα κάθε ατόμου να προσελκύσει αρνητικά φορτισμένα

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

ηλεκτρόνια είναι αρκετά κοντά (δηλαδή, εάν η διαφορά ηλεκτραρνητικότητας δεν υπερβαίνει το 2), τότε μπορεί να σχηματιστούν ομοιοπολικοί δεσμοί. Επειδή η ηλεκτραρνητικότητα των ατόμων άνθρακα είναι 2,5 (περίπου στη μέση), μπορούν να σχηματίσουν ισχυρούς, σταθερούς, ομοιοπολικούς δεσμούς με πολλά άλλα είδη ατόμων με υψηλότερες ή χαμηλότερες τιμές.

Υπάρχουν τρεις σημαντικοί λόγοι για την ευρεία κλίμακα των ιδιοτήτων των υλικών που περιέχουν άνθρακα: Άτομα άνθρακα μπορούν να σχηματίζουν δεσμούς με πολλά είδη ατόμων, μέσω της διαδικασίας που ονομάζεται ομοιοπολική σύνδεση. Όταν άτομα άνθρακα σχηματίζουν δεσμούς με διαφορετικά είδη ατόμων, αποτελούν μόρια με ιδιότητες, που ποικίλλουν ανάλογα για τα άτομα αυτά.

Κάθε άτομο άνθρακα μπορεί να δημιουργήσει ομοιοπολικούς δεσμούς με άλλα τέσσερα άτομα σε μια στιγμή. Κάθε άτομο αζώτου, (για παράδειγμα, μπορεί να σχηματιστεί μόνο τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς, κάθε άτομο οξυγόνο μπορεί να σχηματιστεί μόνο δύο ομοιοπολικούς δεσμούς, και ούτω καθεξής. Αυτή η ικανότητα τεσσάρων δεσμών επιτρέπει σε άτομα άνθρακα στο δεσμό με άλλα άτομα άνθρακα για να κάνουν τις αλυσίδες ατόμων, και να συνδέει με άλλα είδη των ατόμων σε διάφορα σημεία κατά μήκος αυτών των αλυσίδων. Αυτό το ευρύ φάσμα των πιθανών συνδυασμών των ατόμων σε ένα μόριο επιτρέπει μια αντίστοιχα μεγάλη ποικιλία των πιθανών ιδιοτήτων.

Σε κανένα άλλο στοιχείο στον περιοδικό πίνακα αυτοί οι δεσμοί δεν είναι τόσο ισχυροί όσο στον άνθρακα. Άτομα άνθρακα μπορεί δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς μαζί με αλυσίδες, που σε κάποιες περιπτώσεις, μπορούν να έχουν τις ιδιότητες ενός αέριου. Μπορούν να δημιουργήσουν ομοιοπολικούς δεσμούς μαζί με μεγάλες αλυσίδες, που θα μπορούσε να μας δώσει ένα στερεό, όπως ένα πλαστικό. Ή, μπορούν να δημιουργήσουν δεσμούς μαζί σε 2 ή 3 διαστάσεων πλέγματα, που μπορεί να κάνουν μερικά πολύ σκληρά υλικά, όπως είναι ένα διαμάντι.

## 2.4 Μέθοδοι παραγωγής των νανοϋλικών.

Οι τρόποι με τους οποίους γίνονται τα νανοϋλικά διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό, και δεν υπάρχει αρκετός χώρος για να αναπτυχθούν όλοι αυτοί. Από την άλλη πλευρά, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ορισμένα χαρακτηριστικά των διαδικασιών που χρησιμοποιούνται στη σύνθεση των νανοϋλικών, δεδομένου

ότι οι μεταποιητικές διαδικασίες επικρατούν συχνά της συμπεριφοράς του κάθε υλικού. Η έμφαση εδώ δίνεται στα θέματα επεξεργασίας των νανοϋλικών, και όχι στα ευρύτερα θέματα που συνδέονται με την επεξεργασία της νανοτεχνολογίας, (Ramesh, 2009).

Το θεμελιώδες ζήτημα που συνδέεται με την κατασκευή των νανοϋλικών είναι ότι κάποιος προσπαθεί να ελέγξει τη δομή ενός υλικού σε μια πολύ μικρή κλίμακα. Ή αλλιώς, κάποιος προσπαθεί να εισάγει μια διάταξη στην ύλη σε πολύ μικρή κλίμακα, (ή ισοδύναμα, προσπαθεί να μειώσει την πυκνότητα της εντροπίας σε όλο αυτό το υλικό). Αυτή η προσπάθεια για τη μείωση της τοπικής πυκνότητας εντροπία έχει δύο άμεσες συνέπειες.

- Πρώτον, οι διαδικασίες αυτές απαιτούν ένα σημαντικό ποσό ενέργειας και επομένως αυτό μπορεί να συνεπάγεται σημαντική δαπάνη.
- Δεύτερον, το υλικό που παράγεται συχνά είναι θερμοδυναμικά ασταθές, και μπορεί να επιχειρήσει να επανέλθει σε μια υψηλότερη κατάσταση εντροπίας, (για παράδειγμα μέσω της ανάπτυξης των χαρακτηριστικών που αρχικά ήταν στην νανοκλίμακα).

Μερικές από τις πιο δημιουργικές τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιούν αυτό το γεγονός προς όφελός τους: ξεκινούν με τη δημιουργία εξαιρετικά διαταραγμένης κατάστασης, η οποία στην ισορροπία παράγει τις επιθυμητές καταστάσεις νανοδομών.

Υπό την ευρεία έννοια, οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία υλικών μπορούν να τεθούν σε δύο κατηγορίες:

- από πάνω προς τα κάτω προσέγγιση, (top-down) στην οποία κάποιος αρχίζει με ένα χύμα υλικό που έπειτα επεξεργάζεται για να δημιουργήσει το νανοϋλικό, και
- από κάτω προς τα άνω προσεγγίσεις, (bottom-up), στις οποίες το νανοϋλικό είναι χτισμένο αρχίζοντας από την νανοκλίμακα, (δημιουργία νανοϋλικού με ένα άτομο τη φορά).

Είναι προφανές ότι οι από κάτω προς τα άνω προσεγγίσεις απαιτούν έλεγχο της διεργασίας σε πολύ μικρές κλίμακες, αλλά αυτό δεν είναι τόσο δύσκολο όσο ακούγεται, δεδομένου ότι οι χημικές αντιδράσεις εμφανίζονται κυρίως μόριο προς μόριο, (πράγματι, τα νανοϋλικά που δημιουργούνται από τη φύση γίνονται με την από κάτω προς τα άνω προσέγγιση).

### 2.4.1 Δημιουργία διακριτών νανοϋλικών, (*discrete nanomaterials, dn*).

Οι διαδικασίες που απαιτούνται για τη δημιουργία διακριτών νανοϋλικών είναι συνήθως αρκετά διαφορετικές από τις διαδικασίες που απαιτούνται για την παραγωγή χύμα νανοϋλικών. Πολλά χύδην νανοϋλικά δημιουργούνται από τα **dn** υλικά χρησιμοποιώντας ένα δεύτερο στάδιο επεξεργασίας, (π.χ. χύδην νανοϋλικά λέγεται ότι έχουν δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας μια διαδικασία δύο σταδίων). Διακριτά νανοϋλικά γίνονται συχνά με τη χρήση της κάτω προς τα πάνω προσέγγισης, μερικές φορές βασίζεται σε αυτο-συναρμολόγηση για τη δημιουργία του επιθυμητού νανοσωματιδίου ή νανοϊνας. Υπό ορισμένες συνθήκες, μια σωστά ρυθμισμένη από κάτω προς τα πάνω διαδικασία, (όπως η συμπύκνωση από ένα ατμού), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων των διακριτών αυτών νανοϋλικών όπως νανοσκόνες. Η πλειοψηφία των γραμμών επεξεργασίας για τα υλικά **dn** βασίζονται στον έλεγχο της πυρήνωσης\* και τη διαδικασία της ανάπτυξης, δεδομένου ότι η πυρήνωση που κυριαρχεί ως διεργασία τείνει να δημιουργήσει μικρά μεγέθη. Έτσι, θα μπορούσε κανείς να έχει πυρήνα νανοσωματιδίων με συμπύκνωση ατμών ή καθίζηση ενός διαλύματος και, στη συνέχεια να παρέμβει για τον έλεγχο της αύξησης των σωματιδίων, με αποτέλεσμα τα ίδια τα νανοσωματίδια, (Ramesh, 2009). Μερικές από τις τυπικές προσεγγίσεις για τη δημιουργία διακριτών νανοϋλικών περιλαμβάνουν:

- Συμπύκνωση από μια φάση ατμού (Birringer et al., 1984).
- Κατακρήμνιση από το διάλυμα (Meulenkamp, 1998).
- Χημικές αντιδράσεις, κυρίως με τη μείωση ή την οξειδωση (Brust et al., 1994).
- Χημική εναπόθεση ατμού (Ren et al., 1998).
- Οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κολλοειδών φάσεων (Ahmadi et al., 1996).

---

**\*Πυρήνωση:** αρχική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στο σχηματισμό των κρυστάλλων από ένα διάλυμα, ένα υγρό, ή ατμό, κατά την οποία ένας μικρός αριθμός ιόντων, ατόμων ή μορίων οργανώνονται σε ένα χαρακτηριστικό σχήμα ενός στερεού κρυστάλλου, που σχηματίζουν μια περιοχή στην οποία επιπλέον μόρια έχουν προστεθεί καθώς ο κρύσταλλος μεγαλώνει.

- Αυτο-συναρμολόγησης χρησιμοποιώντας επιφάνειες, Self-assembly using surfaces (Li et al., 1999)
- Μηχανική τριβή (Nicoara et al., 1997)

Ένας πολύ μεγάλος αριθμός διαδικασιών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία διακριτών νανοϋλικών, εφαρμόζει τεχνολογίες από διάφορους τομείς. Μερικές φορές τα νανοσωματίδια και νανοσωλήνες είναι υποπροϊόντα των αντιδράσεων που έχουν ήδη σημαντική βιομηχανική παραγωγή, καθώς η χρησιμότητα των παραπροϊόντων αυτών έχει μόλις πρόσφατα αναγνωρισθεί.

Ο χαρακτηρισμός και η μεταφορά των υλικών αυτών **dn** είναι θέματα μείζονος σημασίας για την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας. Ο οριστικός χαρακτηρισμός του μεγέθους των νανοσωματιδίων και η κατανομή του μεγέθους μπορεί να απαιτεί ακριβή ηλεκτρονικά μικροσκοπία υψηλής ανάλυσης, οπτικών και ακτινολογικών τεχνικών οι οποίες μετρούν το μέσο μέγεθος των νανοσωματιδίων σε εύλογες μεγάλες ποσότητες που έχουν μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον.

#### 2.4.1.1 Ενοποίηση των Υλικών dn

Η δεύτερη μεγάλη προσέγγιση στη δημιουργία των χύμα νανοϋλικών στηρίζεται στην ήδη καλά αναπτυγμένη ικανότητα για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων νανοσωματιδίων. Η ιδέα είναι να λάβεις ένα μεγάλο όγκο νανοσωματιδίων και στη συνέχεια να παραγάγεις ένα νανοϋλικό χύμα. Πολλές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην κονιομεταλλουργία και στην κεραμική βιομηχανία μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτές τις νανοσκόνες, οι εν λόγω βιομηχανίες παράγουν χύδην υλικά από σκόνες για δεκαετίες. Η πρωταρχική δυσκολία που αντιμετωπίζουν είναι η άμεση εφαρμογή των αποτελεσμάτων των τεχνικών της κλασικής σκόνης σε διαφορετικού μεγέθους σκόνη. Τα τυπικά στάδια στην ενοποίηση των χύδην υλικών από σκόνες, (Ramesh, 2009), είναι τα εξής:

1. Ανάμειξη της σκόνης, εάν είναι απαραίτητο, (μερικές φορές είναι συμφέρουσα για να ξεκινήσουμε μια ποικιλία μεγεθών σε σκόνη, καθώς και διάφορες σκόνες υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε περίπτωση που ένα σύνθετο υλικό είναι επιθυμητό).
2. Ένα πρώτο βήμα εξυγίανσης, η τυπική κρύα ισοστατική πίεση (CIPing) που δημιουργεί ένα στερεό που μπορεί να επεξεργάζεται, και ονομάζεται

#### πράσινο σώμα.

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

3. Σε περαιτέρω εδραίωση του πράσινου σώματος, είτε μέσω θερμοσυσσωμάτωσης ή ζεστής ισοστατικής συμπίεσης (HIPing) για να επιτευχθεί η επιθυμητή πυκνότητα. Το βήμα αυτό συνήθως περιλαμβάνει μια υψηλή θερμοκρασία γιατί είναι συνήθως ελεγχόμενη από τους μηχανισμούς διάχυσης.
4. Μια τελική διαδικασία κατεργασίας για την αφαίρεση περιοχών του υλικού που δεν έχουν πλήρως ενοποιηθεί.

Μια ποικιλία από άλλα μέτρα είναι δυνατόν να υπάρχουν, περιλαμβανομένων των πλαστικών παραμορφώσεων μέσω κύλισης και σφυρηλασίας, καθώς και η ύπαρξη ακριβής συνταγής που χρησιμοποιείται συχνά στην βιομηχανία ως μυστικές πληροφορίες από τα εργαστήρια και τις επιχειρήσεις. Οι ειδικές κατανομές θερμοκρασίας και πίεσης που χρησιμοποιούνται σε μια διαδικασία έχουν σημαντική επιρροή στην τελική μικροδομή. Η σχετική αστάθεια των νανοϋλικών σημαίνει ότι οι κόκκοι σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν μια αστάθεια που πρέπει να εξεταστεί εάν τελικά είναι μεταξύ των επιθυμητών πυκνοτήτων και του επιθυμητού τελικού μεγέθους κόκκου.

31

Κάθε ομάδα υλικών που χρησιμοποιείται σε σκόνη φαίνεται να έχει διαφορετικό ορισμό της "πλήρους πυκνότητας", κάποιες βιομηχανίες, που παράγουν νανοϋλικά, ορίζουν ως πλήρη πυκνότητα, το 98% της θεωρητικής πυκνότητας (η οποία υπολογίζεται με βάση τις γνωστές πυκνότητες των στοιχείων, των ενώσεων ή των φάσεων που εμπλέκονται και εάν δεν υπάρχει πορώδες). Πρόκειται για ένα σημαντικό πρόβλημα, διότι οι μηχανικές ιδιότητες του νανοϋλικού μπορεί να εξαρτώνται πολύ έντονα από την παρουσία του πορώδους ακόμη και σε μικρές ποσότητες. Οι ιδιότητες ενός υλικού με πυκνότητα 98% μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές από εκείνες του ίδιου υλικού με το 99,5% της πυκνότητας (ιδίως όσον αφορά την θραύση και την αστοχία), (Ramesh, 2009). Μέρος της δυσκολίας με την πυκνότητα οφείλεται στο γεγονός ότι οι πιο παραδοσιακές σκόνες μετάλλων που παράγονται από τη βιομηχανία κωνιομεταλλουργίας έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές όπου οι μικρές ποσότητες του πορώδους θα αφαιρεθούν με τις μεταγενέστερες διαδικασίες όπως η σφυρηλάτηση, ή το μικρό πορώδες θα μπορούσε ακόμη και να είναι επωφελής (όπως σε συστήματα λίπανσης). Τέτοιες διεργασίες φινιρίσματος συχνά δεν χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των νανοϋλικών, με αποτέλεσμα το υπολειμματικό πορώδες. Ένα συναφές πρόβλημα είναι ότι μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να δείτε το πορώδες ενός νανοϋλικού, διότι σε αντίθεση με την

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

παραδοσιακή επεξεργασία σε σκόνη το πορώδες υλικό θα μπορούσε να είναι πολύς λεπτής κατανομής σε πολύ μικρές κοιλότητες. Η συνέπεια είναι το χαμηλότερες τελικές πυκνότητες μπορεί να θεωρηθούν αποδεκτές επειδή η ποιότητα ελέγχου δεν είναι σε θέση να εντοπίσει συστηματικά τους πόρους. Ένα παράδειγμα ενός νανοϋλικού, (νανοκρυστάλλινος σίδηρος) που έγινε από την ενοποίηση σκόνης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



**Σχήμα 2.2** Νανοκρυσταλλικός σιδήρου που παράγονται με ενοποίηση, το πλάτος του η φωτογραφία αντιπροσωπεύει 850 nm.

Η διαδικασία παραγωγής έχει ως εξής: Πρώτον, νανοδομημένα σωματίδια σιδήρου παράγονται από μια μηχανική διεργασία τριβής όπου εμπορική σκόνη σιδήρου με καθαρότητα 99,9% και μια σειρά από μεγέθη σε σκόνη κατά μέσον όρο γύρω στα 5  $\mu\text{m}$  χρησιμοποιείται ως πρώτη υλη για την άλεση σε μπάλα. Η

μπάλα άλεσης (Malow et al, 1998) έγινε σε ένα SPEX 8000 μύλο με φιαλίδια και μπάλες από ανοξείδωτο χάλυβα (SS440). Το βάρος αναλογίας των σφαιρών / σκόνη ήταν 4:1 και ο χρόνος άλεσης ήταν 18 h. Το υλικό ήταν σφραγισμένο σε μια ατμόσφαιρα αργού που ψύχεται με τη χρήση ανεμιστήρα κατά τη διάρκεια της άλεσης. Η σκόνη των σωματιδίων μετά την άλεση είχε εσωτερικό μέγεθος των κόκκων της τάξης των 10 nm (Malow et al, 1998). Η διαδικασία ενοποίησης δύο σταδίων χρησιμοποιήθηκε για τη μορφή χύδην νανοκρυστάλλινου σιδήρου με το επιθυμητό μέγεθος κόκκου. Στην πρώτο βήμα, η σκόνη ήταν συμπιεσμένη σε πίεση 1.4GPa σε θερμοκρασία δωματίου για περίπου 10 ώρες με τη χρήση κύβου βολφραμίου (WC). Η προκύπτουσα συμπαγής πυκνότητα είναι 72-75% της θεωρητικής πυκνότητας.

Στο δεύτερο βήμα, ο υλικό μεταφέρθηκε σε ένα μεγαλύτερο κύβος WC που είναι ζεστός. Η θερμοκρασία των 753K και σε χρόνο παγίωσης των 30min με πίεση 850MPa έχει χρησιμοποιηθεί. Το μέσο μέγεθος κόκκων είναι μόλις κάτω από 100 nm και τελική πυκνότητα στο 99,2% της θεωρητικής πυκνότητας.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του νανοκρυσταλλικού σιδήρου που φαίνεται σε αυτό το σχήμα είναι ότι δεν υπάρχουν ορατά κενά στο υλικό, έστω και αν πρέπει να υπάρχει 0,8% του πορώδους κάπου στο εσωτερικό του υλικού. Είναι πιθανό ότι τα κενά είναι πολύ μικρά και έτσι δεν είναι εύκολο να φανούν, ή ίσως το πορώδες αποβάλλεται με τη διαδικασία της προετοιμασίας.

Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του νανοκρυσταλλικού υλικού που φαίνεται σε αυτό το ποσοστό είναι εκείνο που πρέπει να αναμένεται από το ενοποιημένο υλικό: πολλοί από τα κόκκους παρουσιάζουν ενδείξεις για την ουσιαστική εκ των προτέρων πλαστική παραμόρφωση που εμπλέκονται στη διαδικασία ενοποίησης, (υπάρχει εκτενής δραστηριότητα εξάρθρωσης κατά των κόκκων).

Αυτό μπορεί να είναι δύσκολο να το αποσυνδέσει κανείς από τις επιπτώσεις της πλαστικής παραμόρφωσης και τις συνέπειες του μικρού μεγέθους κόκκων στις μηχανικές ιδιότητες του νανοϋλικού, και από την άποψη της επιστήμης, αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένα από τα μειονεκτήματα της διαδικασίας ενοποίησης. Από την άποψη της μηχανικής, ωστόσο, η διαδικασία ενοποίησης επιτρέπει να παραχθούν σημαντικές ποσότητες χύδην νανοϋλικών, και να επωφεληθούμε των υφιστάμενων τεχνολογιών της μεταλλουργίας σκόνης και της κεραμικής βιομηχανίας.



## 2.4.2 Δημιουργία χύδην νανοϋλικών

Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για την παραγωγή χύδην νανοϋλικών, κοινώς αναφέρονται ως bottom-up και top-down προσέγγιση, (Ramesh, 2009). Στην bottom-up προσέγγιση, το υλικό έχει δημιουργηθεί από ένα άτομο, μόριο, σωματίδιο ή στρώμα κάθε φορά, με το ενδιαφέρον να επικεντρώνεται στον ακριβή έλεγχο σε αυτήν την κλίμακα. Ενώ τα υλικά που κατασκευάζονται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να έχουν πολύ καθαρές μικροδομές, η προσέγγιση είναι ακριβή και δεν είναι γενικά κατάλληλη για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων υλικών. Στην top-down προσέγγιση, από την άλλη πλευρά, τα νανοϋλικά γίνονται με την εφαρμογή διαδικασιών της μεγάλης κλίμακας, με την νανοκλίμακα κατασκευής να δημιουργείται εκ των υστέρων. Τέτοιες προσεγγίσεις γενικά δεν δημιουργούν υψηλής ποιότητας υλικά, αλλά είναι σχετικά φθηνά.

### 2.4.2.1 Τεχνικές Εναπόθεσης

34

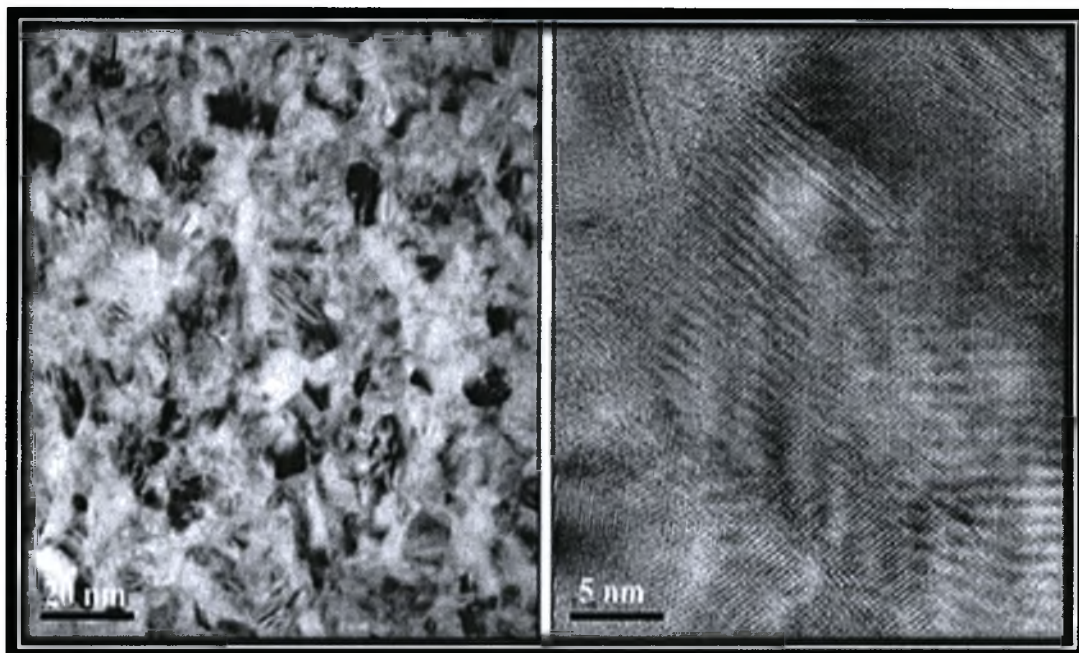
Στις τεχνικές εναπόθεσης που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νανοκρυσταλλικών υλικών περιλαμβάνονται:

- Η ηλεκτροαπόθεση, (Elsharik and Erb, 1995),
- Χημική εναπόθεση, (Bhattacharyya et al., 2001)
- Η εναπόθεση φυσιολογικών ατμών, (Musil and Vlcek, 1998)
- Μια ποικιλία τεχνικών που σχετίζονται με την κατασκευή ημιαγωγών.

Αυτές είναι συνήθως αργές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των σχετικά λεπτών μορφών του υλικού, με τον καλύτερο έλεγχο των μικροδομών και παράγουν συνήθως ένα πάχος που είναι μικρότερο από 1  $\mu\text{m}$ . Αυτές οι τεχνικές είναι καλά προσαρμοσμένες στην ανάπτυξη των επιχρισμάτων, π.χ., με μηχανικές εφαρμογές στην αντίσταση στη φθορά και στον έλεγχο της τριβής. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι η μεγάλη ακρίβεια έλεγχου του περιβάλλοντος που επιτρέπει σε κάποιον να αναπτύξει ελεγχόμενες μικροδομές με μεγάλη ακρίβεια ελέγχου, και έτσι χύδην υλικά που παράγονται με αυτό τον τρόπο μπορεί να αναπαραχθούν εύκολα. Περαιτέρω, είναι δυνατό να δημιουργήσει μικροδομές με ειδικές προσμίξεις (προσεγγίσεις που είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για εφαρμογές αισθητήρων). Το σχήμα 2.3 δείχνει τη μικροδομή, από εμπορική ανάπτυξη

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

ηλεκτροαποτεθείσμενου νανοκρυσταλλικού φιλμ νικελίου από τη εταιρία Integran.



**Σχήμα 2.3** Φωτογραφία του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου νανοκρυσταλλικού υλικού νικελίου που παράγεται από ηλεκτροαπόθεση (Integran).

35

Με τις διαδικασίες ελέγχου που είναι διαθέσιμες δεν σημαίνει ότι τα υλικά που παράγονται θα είναι χωρίς ελαττώματα. Η ανάπτυξη των πλήρως ελεγχόμενων πυκνών νανοκρυσταλλικών δομών δεν είναι εύκολο έργο. Η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει μεγάλο κόστος. Για τα περισσότερα νανοκρυσταλλικά υλικά, ως εκ τούτου, παραμένει δύσκολο να έχουμε απολύτως αναπαραγωγικές λωρίδες μέσω τεχνικών απόθεσης. Πράγματι, μεγάλο μέρος της πρόωρης σύγχυσης σχετικά με τις ιδιότητες των νανοκρυσταλλικών υλικών προέκυψαν από τη μεταβλητότητα των μικροδομών των υλικών που δημιουργούνται μέσω αυτών των διαφόρων διαδικασιών.

Ειδικά ζητήματα που δημιουργούν προβληματισμό είναι το πορώδες, η ανομοιογένεια των μικροδομών και ιδιαίτερα η μεταβλητότητα των κατανομών μεγέθους των κόκκων του υλικού. Αυτό καθιστά δύσκολη τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το ένα εργαστήριο σε ένα υλικό που έχουν γίνει με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από άλλο εργαστήριο σε ένα παρόμοιο ονομαστικά υλικό που παρήχθη με διαφορετικό τρόπο.

Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητος ο ενιαίος χαρακτηρισμός για να κατανοηθεί η συμπεριφορά των υλικών. Εντατικές διαδικασίες χαρακτηρισμού προσπαθούν να καθορίσουν τη δομή σε μια πολύ λεπτή κλίμακα, π.χ.,

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

χρησιμοποιώντας TEM, (**Transmission electron microscopy**), για να καθορίσουν το μέγεθος των τοπικών κόκκων. Αυτή η εντατική διαδικασία είναι σε θέση να παρέχει πολλές πληροφορίες.

Οι τεχνικές εναπόθεσης όπως αυτές που αναφέρονται σε αυτό το τμήμα είναι συνήθως σε θέση να παράγουν μόνο λωρίδες υλικού. Λεπτές λωρίδες είναι τα πιο συνήθη προϊόντα, αν και η χρήση πολλαπλών επιπέδων μπορεί να επιτρέψει σε κάποιον να δημιουργήσει παχύτερες δυο διαστάσεων δομές, και μερικές φορές μέχρι και το "τυχαίου μεγέθους" πάχος.

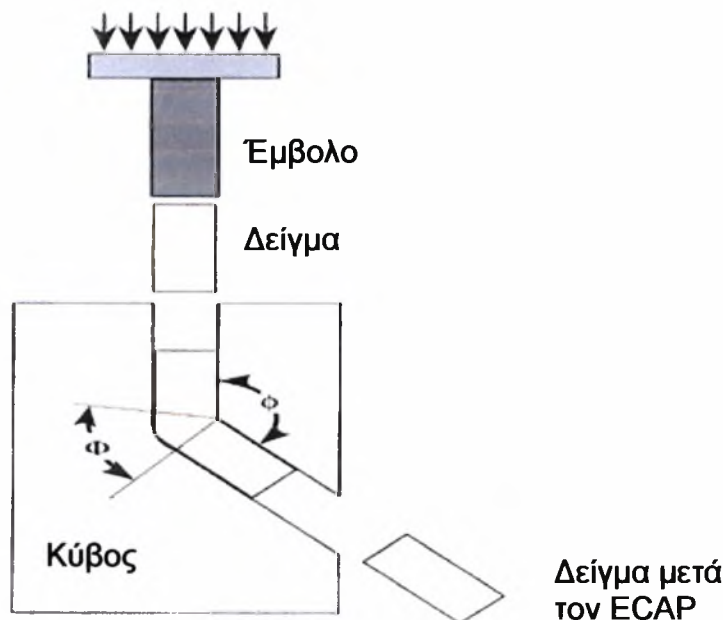
#### 2.4.2.2 Διεργασίες με ισχυρή πλαστική παραμόρφωση

Μια ποικιλία από τεχνικές επεξεργασίας για χύμα νανοϋλικά εφαρμόζει την ισχυρή πλαστική παραμόρφωση. Η πρωταρχική ιδέα σε όλες αυτές τις τεχνικές είναι να αναπτύξουν πολύ μεγάλη πλαστική παραμόρφωση εντός του μετάλλου, με τις σχετικές εξαρθρωτικές υποδομές, και στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουν τις διαδικασίες ανάκτησης, ανακρυστάλλωσης και αναδιάταξης της μικροδομής για την ανάπτυξη της επιθυμητής διάταξης. Η ανάκτηση περιλαμβάνει την θερμικά ενισχυμένη κίνηση της μετατόπισης για τη μείωση των εσωτερικών τάσεων μέσω της ανακατάταξης και της εξόντωσης, ενώ ανακρυστάλλωση συνεπάγεται ανάπτυξη των νέων κρυσταλλών. Οι μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις των μετάλλων είναι γνωστές για πολλά χρόνια, (Mughrabi, 1983), και η βιομηχανία των μετάλλων τις έχει χρησιμοποιήσει εκτενώς προς όφελός της. Μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις μπορεί να οδηγήσουν στην μετατόπιση δομών που αναδιοργανώνονται για να σχηματίσουν τα δομικά στοιχεία, (κύτταρα). Το τελικό μέγεθος του κόκκου που επιτυγχάνεται σε αυτές τις διαδικασίες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις λεπτομέρειες των σχετικών θερμομηχανικών διαδικασιών. Σε γενικές γραμμές, οι μεγαλύτερες πιέσεις αναπτύσσουν ισχυρότερες δομές, αλλά και το ελάχιστο μέγεθος κόκκου που μπορεί να επιτευχθεί, ποικίλλει από υλικό σε το υλικό. Πραγματικά νανοκρυσταλλικοί κόκκοι ( $\leq 100\text{nm}$ ) έχουν παρατηρηθεί εντός των κέντρων διαβατικών ζωνών διάτμησης που αναπτύσσονται στο πλαίσιο ορισμένων υλικών που αναπτύχθηκαν επίσης κατά τη διάρκεια της υψηλής περιστροφικής πίεσης. Ωστόσο, οι περισσότερες **SPD**, (**Severe plastic deformation**), διαδικασίες, έχουν ως αποτέλεσμα εξαιρετικά λεπτά μεγέθη κόκκων στα περισσότερα υλικά.

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

## 2.4.2.3 Γωνιακή μεταποίηση ίσου καναλιού

Η γωνιακή μεταποίηση ίσου καναλιού ή κοινώς γνωστή ως **ECAP**, (Equal Channel Angular Processing), (Ramesh, 2009), είναι μια τεχνική κατά την οποία αναπτύσσονται πολύ μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις, υποχρεώνοντας μια μεταλλική ράβδο (το δείγμα), να διέλθει μέσω ενός κύβου, με τον άξονα του κύβου να αλλάζει κατεύθυνση ξαφνικά, (με αποτέλεσμα τη σημαντική παραμόρφωση διάτμησης). Μια παραλλαγή της τεχνική αυτή είναι γνωστή ως διεργασία σε ισότιμο γωνιακό κανάλι διέλασης (ECAE), (equal channel angular extrusion). Ένα σχηματικό διάγραμμα που αντιπροσωπεύει μια τέτοια διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 2.4.



**Σχήμα 2.4** Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας γωνιακής μεταποίησης ίσου καναλιού.

Ένα σκληρό έμβολο αναγκάζει ένα δείγμα μετάλλου να διέλθει ανάμεσα σε δύο κανάλια ίσου μεγέθους που συνδέονται με μια γωνία. Το μέγεθος της διατμητικής παραμόρφωσης η οποία έχει αναπτυχθεί σε ένα μόνο πέρασμα του δείγματος μέσω του κύβου καθορίζεται από τη γεωμετρία του, και ιδίως από την καθορισμένη  $\Phi$  γωνία που φαίνεται στον σχήμα. Η γωνία  $\Phi$  η οποία φαίνεται ως εξωτερική είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος. Διαφορετικές διαστάσεις κύβων και γωνιών μπορούν να χρησιμοποιούνται, για να επιτευχθεί μια αποτελεσματικής διαδικασίας ECAP. Γωνίες πιο κοντά στις  $90^\circ$  δίνουν

μεγαλύτερη διάτμηση, αλλά απαιτούν μεγαλύτερη λειτουργικότητα του υλικού. Το δείγμα μέταλλου που αναγκάζεται να διέλθει μέσω της μήτρας που είναι συνήθως περίπου 1 ίντσα σε διάμετρο και μερικές ίντσες σε μήκος κατασκευάζεται από συμβατικά υλικά μεγέθους κόκκου.

Δεδομένου ότι η αλλαγή της γωνίας καθιστά τη διαδικασία εγγενώς ανισότροπη, αποτελεί συνήθη πρακτική κατά την διαδικασία της διέλευσης του δοκιμίου μέσα από τον κύβο αυτό να περιστρέφεται μεταξύ διαδοχικών διαβάσεων. Πολλαπλά περάσματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση του κλάσματος του δείγματος που έχει υποβληθεί σε μεγάλες παραμορφώσεις.

#### 2.4.2.4 Στρέψη με υψηλή πίεση

Ένα άλλο είδος της διαδικασίας SPD παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5, και είναι γνωστή ως συστροφή υψηλής πίεσης (Liao et al., 2006). Σχετικά μικρά δείγματα υποβάλλονται σε συνδυασμένη υψηλή πίεση και σε ισχυρές στρεπτικές παραμορφώσεις χρησιμοποιώντας μεγάλες πρέσες με πολλούς άξονες.

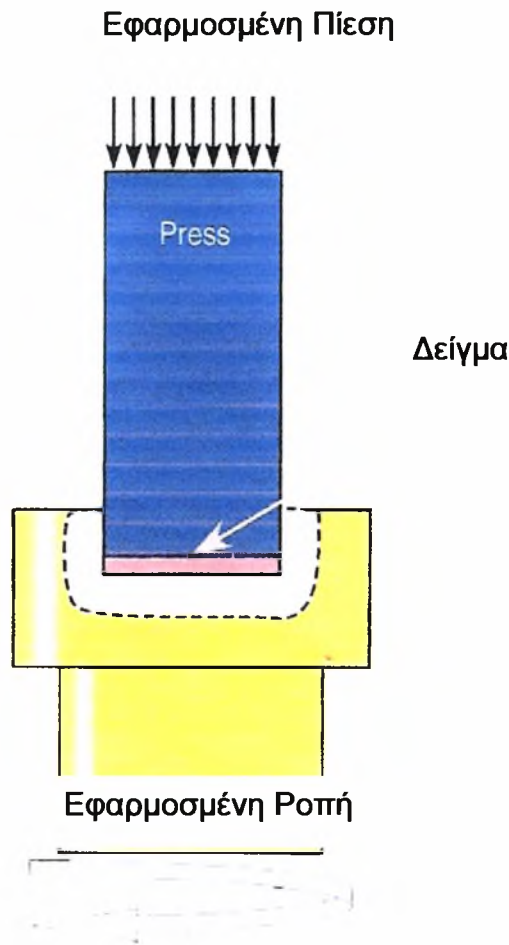
38

Πιέσεις πολλών GPa χρησιμοποιούνται, και η στρέψη των στελεχών μπορεί να είναι πολύ μεγάλη (ανάλογα με τη συνολική γωνία συστροφής). Για λεπτά δείγματα και για συμπίεσεις σχετικά μικρές για οποιοδήποτε προσαύξηση της γωνίας θ στριψίματος, η τοπική αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης δίνεται από τον τύπο:

$$\delta_v = \frac{r \delta_\theta}{h} \quad (2.1)$$

όπου:  $r$  είναι η ακτινική απόσταση από το κέντρο του δίσκου και  $h$  είναι το πάχος του δίσκου.

Πολύ μεγάλα μεγέθη παραμορφώσεων μπορούν έτσι να παράγονται με τη χρήση μικρού πάχους δειγμάτων. Για παράδειγμα, μια πλήρη περιστροφή  $360^\circ$  θα οδηγήσει σε διατμητική παραμόρφωση της τάξεως του 30 mm/cm σε ένα δείγμα που είναι 10 mm σε διάμετρο και πάχους 1 mm. Αυτές οι πολύ μεγάλες πιέσεις οδηγούν σε πολύ πιο εκλεπτυσμένες μικροδομές που μπορούν να επιτευχθούν μέσω των ECAP διαδικασιών.



**Σχήμα 2.5** Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας υψηλής πίεσης στρέψης, (Torsion , ΤΦ), ένα λεπτό δείγμα συμπιέζεται και στη συνέχεια υποβάλλεται σε μεγάλη συστρόφη μέσα σε ένα δεσμευτικό κύβο. Το τυπικό μέγεθος δείγματος είναι περίπου 1 cm διάμετρο και περίπου πάχους 1 mm.

Η επάνω πίεση είναι απαραίτητη για τη διατήρηση του δείγματος χωρίς να σπάσει, και τα θέματα λειτουργικότητας κατά κανόνα εξακολουθούν να απαιτούν την εκτέλεση αυτής της λειτουργίας ΤΦ σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μεγαλύτερη δυσκολία με την τεχνική αυτή, ωστόσο, είναι το μικρό μέγεθος του δείγματος που υποβάλλεται σε πολύ μεγάλη καταπόνηση. Περαιτέρω, η καταπόνηση είναι αρκετά ανομοιογενής, με το κέντρο του δείγματος να μην δέχεται σχεδόν καθόλου καταπόνηση. Σε αυτό το σημείο, ως εκ τούτου, η τεχνική αυτή είναι ένας καλός τρόπος να κατανοήσουμε ποιες είναι οι συνέπειες των σοβαρών πλαστικών παραμορφώσεων στα υλικά, αλλά αυτή δεν είναι μια καλή προσέγγιση για την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων των νανοϋλικών.

## 2.5 Κλίμακα - Κυρίαρχος μηχανισμός στα νανοϋλικά, (Scale-Dominant Mechanisms in Nanomaterials)

Οι ασυνήθιστες ιδιότητες των νανοϋλικών προκύπτουν από μηχανισμούς που δεν είναι αντιληπτοί σε μας στην ανθρώπινη κλίμακα μήκους. Για να αποκτήσουμε την κατανόηση των ιδιοτήτων αυτών - και τον έλεγχό τους - θα πρέπει να ανακαλύψουμε τους μηχανισμούς που λειτουργούν σε αυτές τις κλίμακες μήκους και σχετίζονται με τα συγκεκριμένα νανοϋλικά. Από τη σκοπιά της επιστήμης, πολλές από αυτές τις ασυνήθιστες ιδιότητες προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις σε αυτές τις κλίμακες, (που συνδέονται με την υποκείμενη παραμόρφωση ή αυτών των λειτουργικών μηχανισμών), από τις εξωγενείς ή εξωτερικές κλίμακες μήκους που σχετίζονται με το νανοϋλικό ή από την ίδια τη συσκευή. Αυτή η παράγραφος ασχολείται με μια ποικιλία αυτών των αλληλεπιδράσεων, και περιγράφει τις επιπτώσεις τους σε ορισμένες από αυτές από την άποψη της μηχανικής συμπεριφοράς. Η έμφαση δίνεται στην παραμόρφωση και τους μηχανισμούς αστοχίας και όχι τόσο στους λειτουργικούς μηχανισμούς, αλλά πολλοί από τους μηχανισμούς παραμόρφωσης που αναλύθηκαν εδώ έχουν άμεσες συνέπειες στη λειτουργία, (Ramesh, 2009). Ένα ευρύ φάσμα από τους σημαντικότερους μηχανισμούς που συνδέονται με τα νανοϋλικά παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Χρησιμοποιώντας το σύστημα ταξινόμησης των υλικών των προηγούμενων παραγράφων, στο πίνακα παρατίθενται οι πρωτογενείς μηχανισμοί που συνδέονται με διακριτά νανοϋλικά ( $dn$ ), υλικά συσκευών νανοκλίμακας, καθώς και χύδην νανοϋλικά ( $nc$ ).

Μια ποικιλία από μορφολογίες νανοσωματιδίων είναι:

- Σφαιρικά νανοσωματίδια (nanospheres), σχήμα 2.6.
- Νανοσωματίδια Ράβδων - όπως τα (nanorods), σχήμα 2.7.
- Νανοσωματίδια Πλάκας - όπως τα (nanoplates), σχήμα 2.8.
- Μερικά πολύ πολύπλοκα σχήματα, συμπεριλαμβανομένων των δενδρίτων.

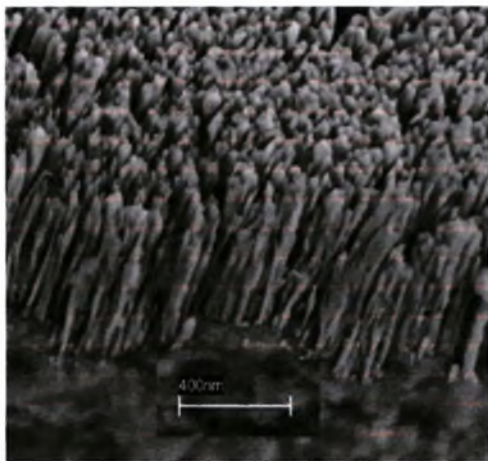
**Πίνακας 2** Κλίμακα - κυρίαρχος μηχανισμός στα νανοϋλικά, κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τον τύπο των υλικών ταξινόμησης, τη μορφολογία, και της κλίμακας μήκους.

Τύπος του νανοϋλικού	Μορφολογία ή συνθήκες εφαρμογής	Εξωτερικές κλίμακες μήκους	Εσωτερικές κλίμακες μήκους	Μηχανισμοί	Παρατηρήσεις
<b>Διακριτά νανοϋλικά (dn)</b>	Equiaxed νανοσωματίδια	Διαμέτρου σωματιδίων	Ατομικής απόσταση	Επιφανειακή εξισορρόπηση τάσεων	Προτεινόμενες νανοδομές σε μορφή κελύφους πυρήνα
	Νανოსωλήνες	διαμέτρου, πάχος τοιχώματος, το μήκος	Ατομικής απόσταση, ελάττωμα απόσταση	Λυγισμός, τηλεσκοπική, κάταγμα	Πολύ υψηλή ακαμψία και αντοχή
	Νανοϊνες	Διάμετρος, μήκος	Ατομικής απόσταση, μοριακό βάρος	Θραύση, αλληλεπιδράσεις επιφάνεια	1να-μήτρα αλληλεπιδράσεις
<b>Υλικά συσκευών νανοκλίμακας</b>	Νανოსωματίδια	Διάμετρος	Ατομικής διάστημα	Ενεργοποίηση της επιφανειακής πυκνότητας	τονίζει λόγω αλληλεπιδράσεων ενεργοποίηση της σε οπτικά μήκη κύματος
	Nanowires και νανοςωλήνες	Διάμετρος, μήκος	Ατομικής διάστημα, το διάστημα μεταξύ ελαττώματος	Ενεργοποίηση της πυκνότητας ενεργοποίηση της που προκαλείται από παραμορφώσεις	Αδελφοποιήσεις, flexure ευαίσθητα Πολύ μέσω flexure
	Δομές Νανοπορώδες	Πάχος	Μέγεθος πόρων, πυκνότητα ενεργοποίησης	Αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον	Οπτικές αλληλεπιδράσεις μοριακή ευαισθησία
	Λεπτά φιλμ	Πάχος	Ατομικό διάστημα, το διάστημα μεταξύ της ανωμαλίας περβάσι διάστημα, η πυκνότητα ενεργοποίησης	Ένταση στην Επιφάνεια, η κινητικότητα επιφάνεια, 2D μηχανισμούς, στρώματα παθητικότητας, αλληλεπιδράσεις με το υπόστρωμα, διάχυση	Ιδιαίτερα ανεπτυγμένες τεχνικές κατασκευής
<b>Χύδην νανοκρυσταλλικά νανοϋλικά</b>	Μικρο Πυλώνες	Διάμετρος, μήκος	Μεγέθους Κόκκων, της πυκνότητας εξάρθρωση	Εξάρθρωση των μηχανισμών, Αδελφοποίηση, ορίου σιταριού (ζ)  διεργασίες, περιστροφή κόκκους, διάτμηση ανεπάρκεια περιορισμός, λυγισμού, αποτελέσματα	Υπόδειγμα αποτελέσματα μέγεθος κλίσεις στέλεχος,
	Μικρο τάση του δείγματος	Διάμετρος, μήκος	Μέγεθος Κόκκων	Εξάρθρωση των μηχανισμών, αδελφοποίησης, των διαδικασιών gb, κόκκους  περιστροφής, τα αποτελέσματα περιορισμών, necking, κάταγμα	Παρενέργειες οδόντωσης κλίσεις στέλεχος

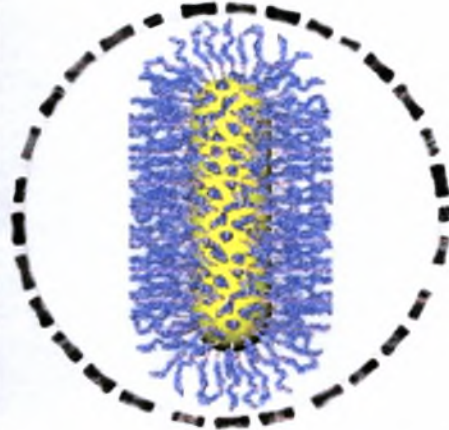
**Σφάλμα! Η αναφορά της υπερ-σύνδεσης δεν είναι έγκυρη.**



**Σχήμα 2.6** Σφαιρικά νανοσωματίδια  $\text{CeO}_2$



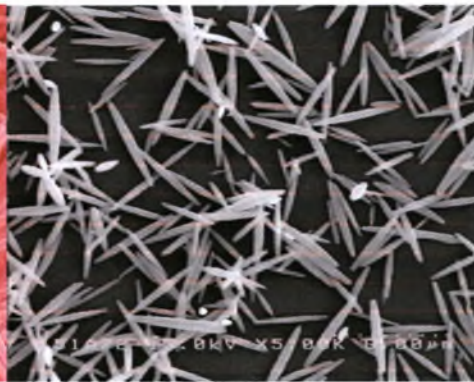
Χαλκού



Χρυσού

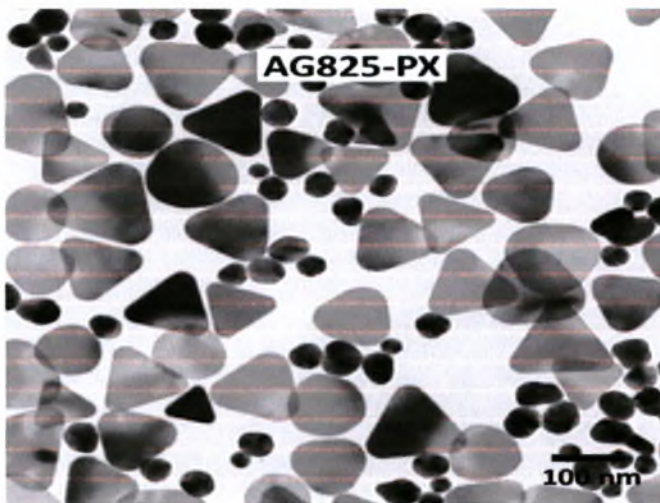


Διαμαντιού



Οξειδίο του ψευδαργύρου

**Σχήμα 2.7** Διάφορα νανοσωματίδια Ράβδων



**Σχήμα 2.8** Νανοσωματίδια Πλάκας, ασήμι

Αυτές οι μορφολογίες μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες, και μάλιστα σε ένα μεγάλο φάσμα των εφαρμογών που έχουν αποδοθεί σε αυτά τα νανοσωματίδια. Σημειώστε ότι ο λόγος του εμβαδού της επιφάνειας προς τον όγκο των nanorods και nanoplates μπορεί να είναι πολύ διαφορετικός από εκείνο των nanospheres.

Δεδομένου ότι η αναλογία αυτή κυριαρχεί σε πολλές από τις εφαρμογές των νανοσωματιδίων, η μορφολογία έχει δραματικές συνέπειες για την εφαρμογή.

Μεγάλα κλάσματα των νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται σε ποικίλες τεχνολογίες είναι επίσης ετερογενή, αποτελούνται από σύνθετες δομές και περιέχουν περισσότερες από ένα υλικά. Μερικά νανοσωματίδια φαίνεται να είναι σχεδόν άμορφα, δεν έχουν σαφώς καθορισμένη κρυσταλλική δομή, ενώ άλλα έχουν καθαρές κρυσταλλικές πλευρές. Η ποικιλία των μηχανισμών που είναι κατάλληλοι για την παραμόρφωση των νανοσωματιδίων είναι τόσο μεγάλη όσο και η ποικιλία των νανοσωματιδίων. Θα επικεντρώσουμε τη συζήτησή μας σχετικά με τα νανοσωματίδια που είναι σχεδόν ίσων διαστάσεων, δηλαδή, με λόγο διαστάσεων, (από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη) διάσταση, κοντά στο ένα. Οι εξωτερικές κλίμακες μήκους που σχετίζονται με τα νανοσωματίδια είναι η διάμετρος των σωματιδίων (εξ ορισμού, κάτω των 100 nm). Η μόνη εσωτερική σκάλα διαβάθμισης μήκους που σχετίζεται με τις μηχανικές ιδιότητες των νανοσωματιδίων είναι το διατομικό διάστημα. Το μέγεθος αυτής της απόστασης είναι συνήθως της τάξης των 3Å για τα περισσότερα στοιχεία, έτσι ώστε ένα νανόμετρο να περιέχει ίσως 3 ατομικές αποστάσεις, σχήμα 2.9, που χωρίζει 4 άτομα, και ένα κυβικό νανόμετρο θα αποτελείται από 64 άτομα.

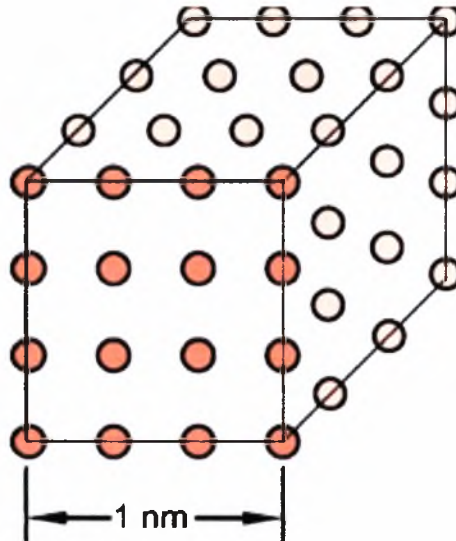
Σωματίδια που αποτελούνται από λιγότερα από 100 άτομα καλούνται συχνά (nanoclusters), νανο-συσσωματώματα .

Θεωρίστε ένα νανο-συσσωμάτωμα των 64 ατόμων σε μια κυβική διάταξη πλέγματος - εάν ήταν ένας κύβος πλευράς 1 nm, τα περισσότερα άτομα, (περίπου 80%), θα είναι στην επιφάνεια της νανοσυσπείρωσης. Τα επιφανειακά άτομα δεν περιβάλλονται από παρόμοια άτομα από όλες τις πλευρές και έτσι έχουν μια διαφορετική απόσταση ισορροπίας, με αποτέλεσμα στο κυβικό πλέγμα να στρεβλώνεται η συνολική διαμόρφωση της ισορροπίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας μπορεί να οδηγήσουν σε ασυνήθιστες δομές. Επιπλέον, τα άτομα της επιφάνειας μπορούν να αλληλεπιδρούν έντονα με άλλα άτομα ή τα μόρια στο περιβάλλον, οδηγώντας στην ανάπτυξη των

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

νανοσωματιδίων που είναι ουσίες με επιφανειακή δράση. Νανοσωματίδια τύπου κελύφους-πυρήνα μπορούν να αναπτυχθούν σχετικά εύκολα και ως εκ τούτου, να έχουν μεγάλη αξία στην μηχανική.

Ας υποθέσουμε ότι η απόσταση ισορροπίας στην εσωτερική ατομική απόσταση είναι  $a$  στο κρύσταλλο, ενώ η διάσταση των σωματιδίων είναι το  $D$ .



**Σχήμα 2.9** Σχηματική του κυβικού nanocluster που αποτελείται από 64 άτομα, περίπου 1 nm σε μια πλευρά. Η πλειονότητα των ατόμων είναι στην επιφάνεια αυτής της nanocluster, και έτσι θα έχουν μια διαφορετική ισορροπία διαστήματος από ό, τι άτομα σε ένα συνολικό δείγμα από το ίδιο υλικό.

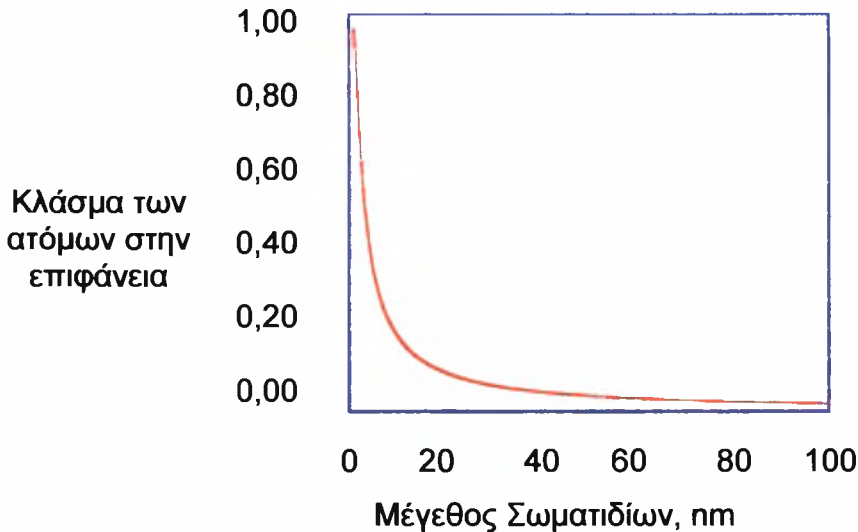
Εάν το σωματίδιο είναι ένας κύβος με πλευρά  $D$  και τα άτομα είναι διατεταγμένα σε ένα κυβικό πλέγμα, ο συνολικός όγκος του κύβου είναι η  $D^3$ , ενώ ο όγκος που αντιστοιχεί στα άτομα που βρίσκονται μέσα τον κύβο, (που δεν εκτίθενται προς την επιφάνεια), είναι  $(D-2a)^3$ . Το κλάσμα του όγκου  $f$  των ατόμων που βρίσκονται στην επιφάνεια του νανοσωματιδίου είναι: (σημειώστε ότι το κλάσμα όγκου είναι της ίδιας τάξης, όπως το κλάσμα του αριθμού)

$$(2.2)$$

Μια γρήγορη λύση της εξίσωσης που προκύπτει δείχνει ότι περίπου το ήμισυ των ατόμων θα είναι στην επιφάνεια του νανοσωματιδίου με διάσταση  $D \approx 15a$ . Δεδομένου ότι η εσωτερική ατομική απόσταση είναι συνήθως της τάξης των  $3\text{\AA}$ , κυβοειδή νανοσωματίδια έχουν κυρίαρχη επιφάνεια, (όσον αφορά τη δομή και την μηχανική απόκριση), εφόσον έχουν τυπική διάσταση μικρότερη των  $5\text{nm}$ .

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

Μεγαλύτερα νανοσωματίδια, (έως και 20 nm, βλέπε σχήμα 2.10), έχουν πολύ μεγάλους λόγους εμβαδού επιφάνειας προς τον όγκο, σε σύγκριση με τα συμβατικά σωματίδια μεγέθους Μικρού, (θυμηθείτε ότι αυτή η αναλογία φθάνει  $1/D$ ), αλλά το αποτέλεσμα της επιφανειακής εξισορρόπησης στην εσωτερική δομή είναι λιγότερο σημαντικό.



**Σχήμα 2.10** Κλάσμα όγκου των ατόμων στην επιφάνεια ενός κυβοειδούς νανοσωματιδίου ως συνάρτηση του μεγέθους των νανοσωματιδίων, με βάση την εξίσωση (2,2).

Η διακύμανση του κλάσματος όγκου των ατόμων προς τη επιφάνεια σε σχέση με το μέγεθος των νανοσωματιδίων φαίνεται στο σχήμα 2.6 για μια υποτιθέμενη εσωτερική ατομική απόσταση των 0,3 nm. Η ταχεία ανάπτυξη του κλάσματος των ατόμων στην επιφάνεια ως προς το μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται κάτω των 20 nm, όπως προκύπτει, και το κλάσμα επιφάνειας κυριαρχεί στον στο σύμπλεγμα του νάνο.

Τα επιφανειακά άτομα εμφανίζουν μια διαφορετική κατανομή των γειτόνων τους σε σχέση με τα εσωτερικά άτομα, και έτσι έχουν διαφορετική ενέργεια από τα εσωτερικά άτομα. Σημειώστε ότι δεν είναι μόνο οι άκρως απόκεντρες στρώσεις των ατόμων που επηρεάζονται από την επίδραση της επιφάνειας. Οι επιδράσεις είναι συνήθως αισθητές σε αρκετές στρώσεις ατόμων (ανάλογα με την έκταση του εσωτερικού ατομικού δυναμικού). Ο ακριβής αριθμός των στρωμάτων που πρέπει να εξεταστούν μπορεί να προέρχεται μόνο από ατομική ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη τα εσωτερικά ατομικά δυναμικά. Η επιρροή του κλάσματος επιφάνειας στη μηχανική συμπεριφορά εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας των ατόμων στην επιφάνεια και της ενέργειας

που σχετίζεται με τα άτομα στο εσωτερικό του σωματιδίου. Η συζήτηση των επιπτώσεων της ενέργειας στη επιφάνεια, που ακολουθεί, έχει ληφθεί σε μεγάλο βαθμό από την περίληψη των μηχανικών θεμάτων που παρέχονται από τον (Dingreville et. al, 2005). Αν ορίσουμε τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας ενός ατόμου στην επιφάνεια και της ενέργειας ενός ατόμου στο εσωτερικό του  $e_i$ , τότε μπορούμε να ορίσουμε μια επιφάνεια ελεύθερης ενεργειακής πυκνότητας, ως πυκνότητα της περιοχής  $\Gamma$ :

$$\Gamma dA = \sum e_i \quad (2.3)$$

όπου η άθροιση γίνεται σε όλα τα άτομα στο στρώμα που επηρεάζονται από το στοιχείο της επιφάνειας  $dA$ , το κεφάλαιο A δείχνει ότι το στοιχείο επιφάνειας είναι σε κατάσταση που σχηματίζεται ή κατάσταση αναδιαμόρφωσης, (θυμηθείτε ότι τα άτομα ανακατανέμονται ως αποτέλεσμα αυτής της επιφανειακής αλληλεπιδράσεις). Το στοιχείο  $da$  συνδέεται με το στοιχείο  $dA$  μέσω των επιφανειακών τάσεων:

$$da = dA (1 + \varepsilon_{11}^s + \varepsilon_{22}^s) \quad (2.4)$$

όπου οι οριζόμενοι άξονες έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να είναι κάθετοι προς την επιφάνεια (δηλαδή, οι επιτόπου τάσεις είναι  $\varepsilon_{11}^s$ ,  $\varepsilon_{22}^s$  και  $\varepsilon_{12}^s$ ). Αυτές οι επιφανειακές τάσεις σχετίζονται με την πυκνότητα της ενέργειας μέσω της επιφανειακής πίεσης  $T_{\alpha\beta}^s$  με την σχέση:

$$T_{\alpha\beta}^s = \quad (2.5)$$

όπου  $\alpha$  και  $\beta$  χρησιμοποιούνται για να αποδώσουν ότι οι ποσότητες εξετάζονται μόνο επιφανειακά, με τους δείκτες να παίρνουν τιμές μόνο 1 και 2. Αυτός είναι ένας αποτελεσματικός ορισμός της επιφανειακής τάσης, και βλέπουμε ότι μπορεί να προκύψει από την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα. Πώς η επιφανειακή πυκνότητα ενέργεια  $\Gamma$  εξαρτάται από την επιφανειακή τάση; Ως μια πρώτη προσέγγιση, μπορεί κανείς να αναπτύξει την επιφανειακή ενέργεια με

μια Σειρά Taylor στο σημείο  $\epsilon_{\alpha\beta}^s = 0$ , οι διάφοροι όροι σε αυτή της σειρά μπορούν να υπολογιστούν. Για τους σκοπούς μας, είναι απλούστερο να υποθέσουμε ότι για τις μικρές τάσεις της επιφανειακής ενεργειακής πυκνότητας είναι το τετράγωνο της επιφανειακής τάσης, αμελώντας τους όρους ανώτερης τάξης (η ίδια υπόθεση γίνεται στη γραμμική ελαστικότητα και για την ενεργειακή πυκνότητα τάσης). Επομένως, στη συνέχεια έχουμε ότι η πίεση στην επιφάνεια είναι ίση με: (χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.5)

$$T_{\alpha\beta}^s = G_{\alpha\beta\gamma\delta} \epsilon_{\gamma\delta}^s \quad (2.6)$$

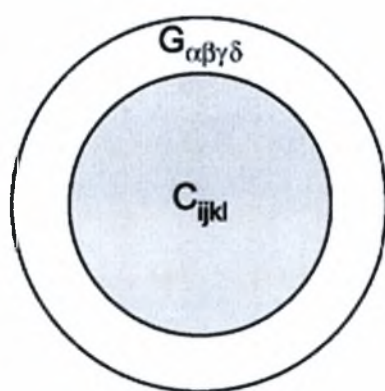
Οι συντελεστές  $G_{\alpha\beta\gamma\delta}$  είναι τα συστατικά του επιφανειακού τανυστή ελαστικότητας, ο οποίος είναι ένα δισδιάστατος ανάλογος του μέτρου ελαστικότητας, αλλά προέρχεται ειδικά για επιφάνειες, ως αποτέλεσμα του γεγονότος ότι η επιφανειακή ενέργεια  $\Gamma$  είναι διαφορετική από την τάση  $W$  της ενέργειας στο εσωτερικό του στερεού. Σημειώστε ότι σαν τανυστής του μέτρου ελαστικότητας, έχουμε:

$$G_{\alpha\beta\gamma\delta} = G_{\beta\alpha\gamma\delta} = G_{\alpha\beta\delta\gamma} = G_{\gamma\delta\alpha\beta} \quad (2.7)$$

Οι τιμές των συστατικών του επιφανειακού τανυστή ελαστικότητας πρέπει να ληφθούν είτε μέσω υπολογισμών και στη συνέχεια μέσω της εξίσωσης (2.3), ή με άμεση μέτρηση, παρόλο που τέτοιου είδους μετρήσεις είναι εξαιρετικά δύσκολες.

Η εξίσωση (2.6) μας λέει ότι το αποτέλεσμα της ελεύθερης επιφάνειας είναι οι λίγες στρώσεις ατόμων στην επιφάνεια να συμπεριφέρονται πραγματικά σαν να είναι κατασκευασμένες από άλλο υλικό όσον αφορά την ελαστική συμπεριφορά. Θα μπορούσε κανείς να προβάλει το σωματίδιο ως μια σύνθετη δομή, σχήμα 2.11, με τον εσωτερικό πυρήνα που έχει τις συνήθεις χύδην ιδιότητες και το εξωτερικό κέλυφος με διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες, με βάση την επιφανειακή ενέργεια. Κατά πόσον το εξωτερικό περίβλημα είναι πιο σκληρό ή πιο μαλακό εξαρτάται από το είδος του ατόμου που έχουμε, (σημειώστε ότι πολλά νανοσωματίδια δεν είναι μόνο σωματίδια με ένα στοιχείο, για παράδειγμα, το  $ZnO$  (οξειδίο του ψευδαργύρου) και το  $Cds$  (θειούχο

**Καδμίου)** σωματίδια). Από μηχανικής απόψεως, η συμπεριφορά των επιφανειακών στρωμάτων δεν θα εξαρτηθεί μόνο από τον τανυστή ελαστικότητα της επιφάνειας αλλά και από το σχήμα των σωματιδίων, (Μορφολογία), δεδομένου ότι ένα σχήμα σωματιδίων «αστερία» μπορεί να αναμένεται ότι θα έχει μια διαφορετική απόκριση στην επιφάνεια, (στο επίπεδο της εξίσωσης 2.3) από ό, τι ένα σφαιρικό σωματίδιο του ίδιου υλικού. Σύνθετες μηχανικές προσεγγίσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί η αποτελεσματική ελαστική συμπεριφορά των μορίων που έχουν μια τέτοια δομή πυρήνα-κελύφους.



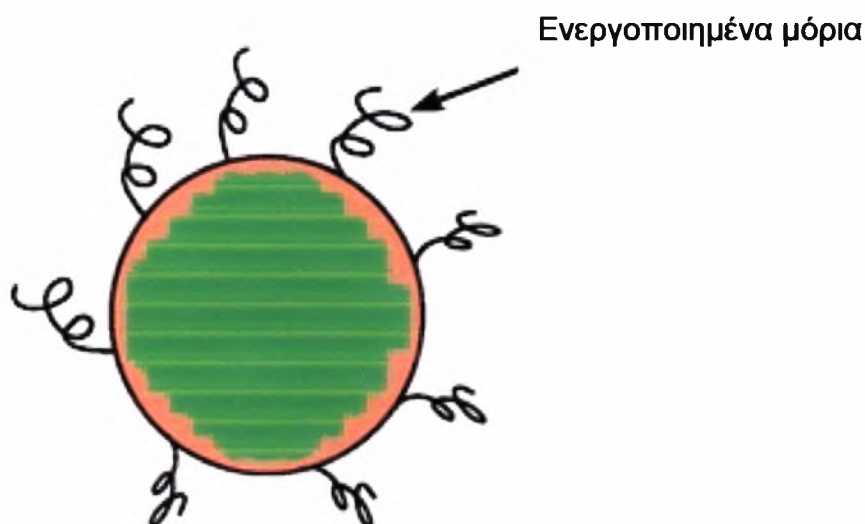
**Σχήμα 2.11** Πυρήνας - κέλυφος μοντέλο ενός νανοσωματίδιου που θεωρούνται ως ένα σύνθετο, με μια επιφανειακή στρώση να έχει διαφορετικές ιδιότητες ως αποτέλεσμα της επιφανειακής ενέργειας.

Για παράδειγμα, (Dingreville et al. 2005) δείχνει ότι η συμβολή της ενεργειακής επιφάνειας για ένα αποτελεσματικό συντελεστή ενός σφαιρικού νανοσωματίδιου είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος των σωματιδίων. Για τα μεγάλα σωματίδια το αποτέλεσμα μπορεί να αγνοηθεί, αλλά το αποτέλεσμα είναι σημαντικό για τα νανοσωματίδια.

Εφαρμογές πολλών νανοσωματιδίων βασίζονται στο γεγονός ότι οι επιφάνειες των νανοσωματιδίων μπορούν να τροποποιηθούν με την προσθήκη σε αυτές συγκεκριμένων μορίων για την εκτέλεση ειδικών λειτουργιών. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως **ενεργοποίηση, functionalization**. Για παράδειγμα, μεταλλικά νανοσωματίδια μπορεί να είναι επικαλυμμένα με ένα στρώμα οργανικής χημικής ένωσης, και στη συνέχεια, ειδικά βιολογικά μόρια που συνδέονται με τη βιολογική χημική ένωση, (σχήμα 2.12), έτσι ώστε τα ενεργοποιημένα νανοσωματίδια μπορούν να αλληλεπιδρούν με το βιολογικό περιβάλλον (Bruchez et al., 1998). Τα μόρια έχουν επιλεγεί για να επιτελέσουν

συγκεκριμένη λειτουργία, όπως η αναγνώριση ενός μορίου στο περιβάλλον, και έτσι ονομάζονται ενεργοποιημένα μόρια.

Η απόσταση μεταξύ των ενεργοποιημένων μορίων ορίζει την πυκνότητα ενεργοποίησης. Δεδομένου ότι τα μόρια τροποποιούν την κατάσταση της επιφανειακής τάσης όταν πλησιάσουν στην επιφάνεια, η πυκνότητα ενεργοποίησης τροποποιεί την τάση στην επιφάνεια και μπορεί ακόμη και να τροποποιήσει την καθαρή διάπλαση των νανοσωματιδίων.



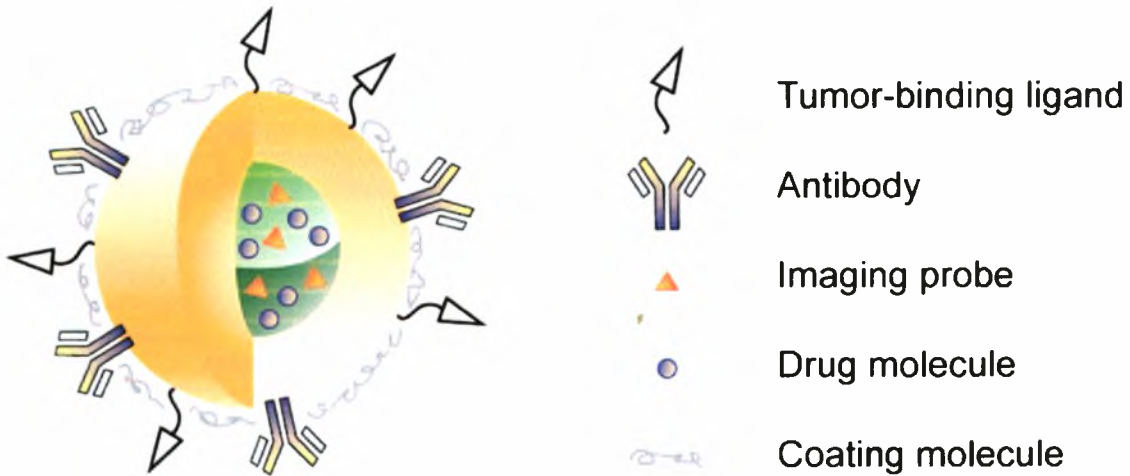
**Σχήμα 2.12** Ένα σφαιρικό νανοσωματίδιο που μεταφέρει αρκετά οργανικά μόρια στην επιφάνειά του.

Η διαδικασία ενεργοποίησης αλλάζει την επιφανειακή τάση του νανοσωματιδίου με την αλλαγή των πηγών επιφανειακής ενέργειας και, αντιστοίχως, ορισμένα είδη ενεργοποίησης είναι ευκολότερα για τα νανοσωματίδια που έχουν ειδική επιφανειακή τάση.

Αυτή η τροποποίηση της επιφανειακής τάσης των νανοσωματιδίων θα εξαρτηθεί από την πυκνότητα  $n_f$  των ενεργοποιητικών μορίων που εφαρμόζεται στην επιφάνεια (η πυκνότητα ορίζεται ως ο αριθμός των μορίων ενεργοποίησης ανά μονάδα επιφάνειας).

Το αντίστροφο είναι η τετραγωνική ρίζα αυτής της πυκνότητας ενεργοποίησης που παρέχει άλλη μια εγγενή κλίμακα μήκους στο πρόβλημα. Υπάρχει μια αυξανόμενη σειρά των βιοϊατρικών εφαρμογών των ενεργοποιητικών νανοσωματιδίων, σχήμα 2.13, (Sanvicens και Marco, 2008) συμπεριλαμβανομένων των πιθανών θεραπειών για ορισμένα είδη των κακοήθων όγκων.





**Σχήμα 2.13** Σχηματική απεικόνιση ενός πολύ λειτουργικού νανοσωματιδίου με ανιχνευτές ή/και με αντικαρκινικά φάρμακα εγκλεισμένα μέσα σε ειδικά ligands με τα αντισώματα να εμφανίζονται στην επιφάνεια.

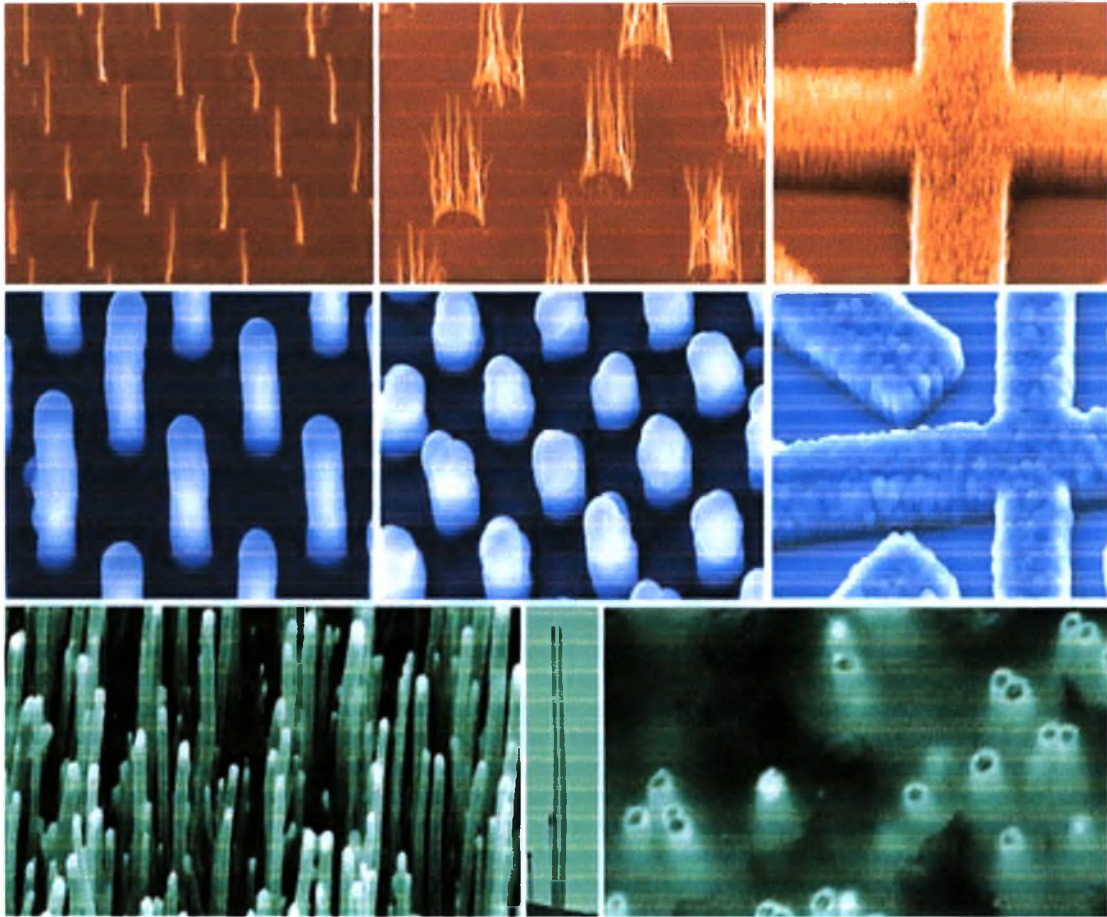
Άλλα είδη ενεργοποίησης μπορεί να οδηγήσουν στην αλληλεπίδραση των νανοσωματιδίων με οπτικά μήκη κύματος, γεγονός που οδηγεί σε διάφορες εφαρμογές αισθητήρων, (ένα συγκεκριμένο παράδειγμα στον τομέα αυτό είναι η εφαρμογή με τις κβαντικές τελείες, (Alivisatos, 1996).

50

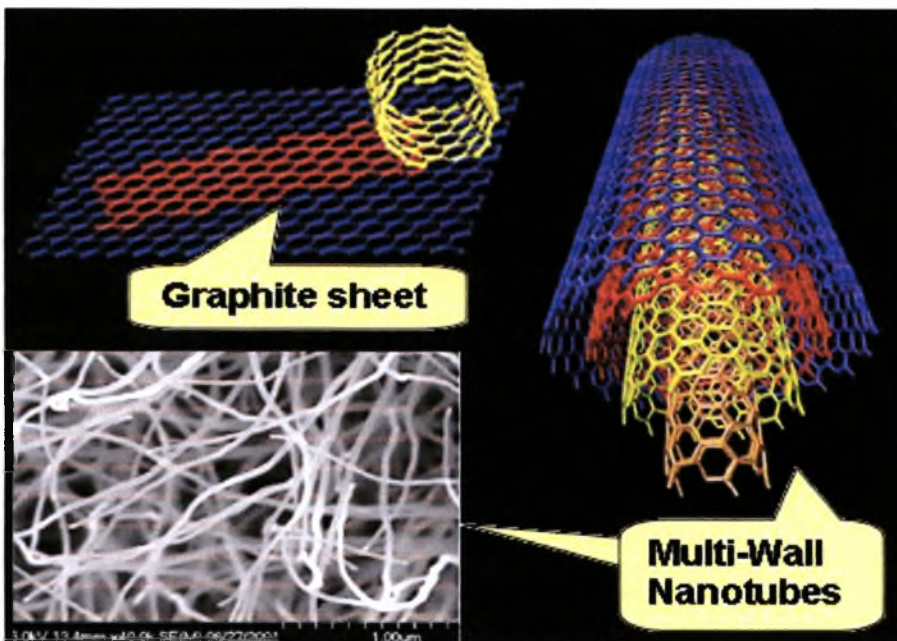
## 2.6 Νανოსωλήνες.

Υπάρχει μια τεράστια βιβλιογραφία σχετικά με νανοςωλήνες άνθρακα. Εξ ορισμού, νανοςωλήνες είναι σωλήνες που έχουν διαμέτρους νανοκλίμακας και κάποιο προκαθορισμένο πάχος τοιχώματος, με μήκος προς διάμετρο σε αναλογίες που συνήθως είναι μεγαλύτερες από 10. Οι νανοςωλήνες άνθρακα, σχήμα 2.14, αποτελούνται από δομές με μονά ή πολλαπλά τοιχώματα που μπορούν να θεωρηθούν ως φύλλα γραφήματος που τυλίγονται, σχήμα 2.15. Κάθε φύλλο έχει ένα παχύ στρώμα ατόμων από άνθρακα διατεταγμένα σε μια συγκεκριμένη δομή - ανάλογα με το πώς ακριβώς τυλίγονται τα φύλλα, μία από τις ποικιλίες των νανοςωλήνων είναι γνωστή ως πολυθρόνα, σπιράλ ή ζιγκ-ζαγκ νανοςωλήνες.

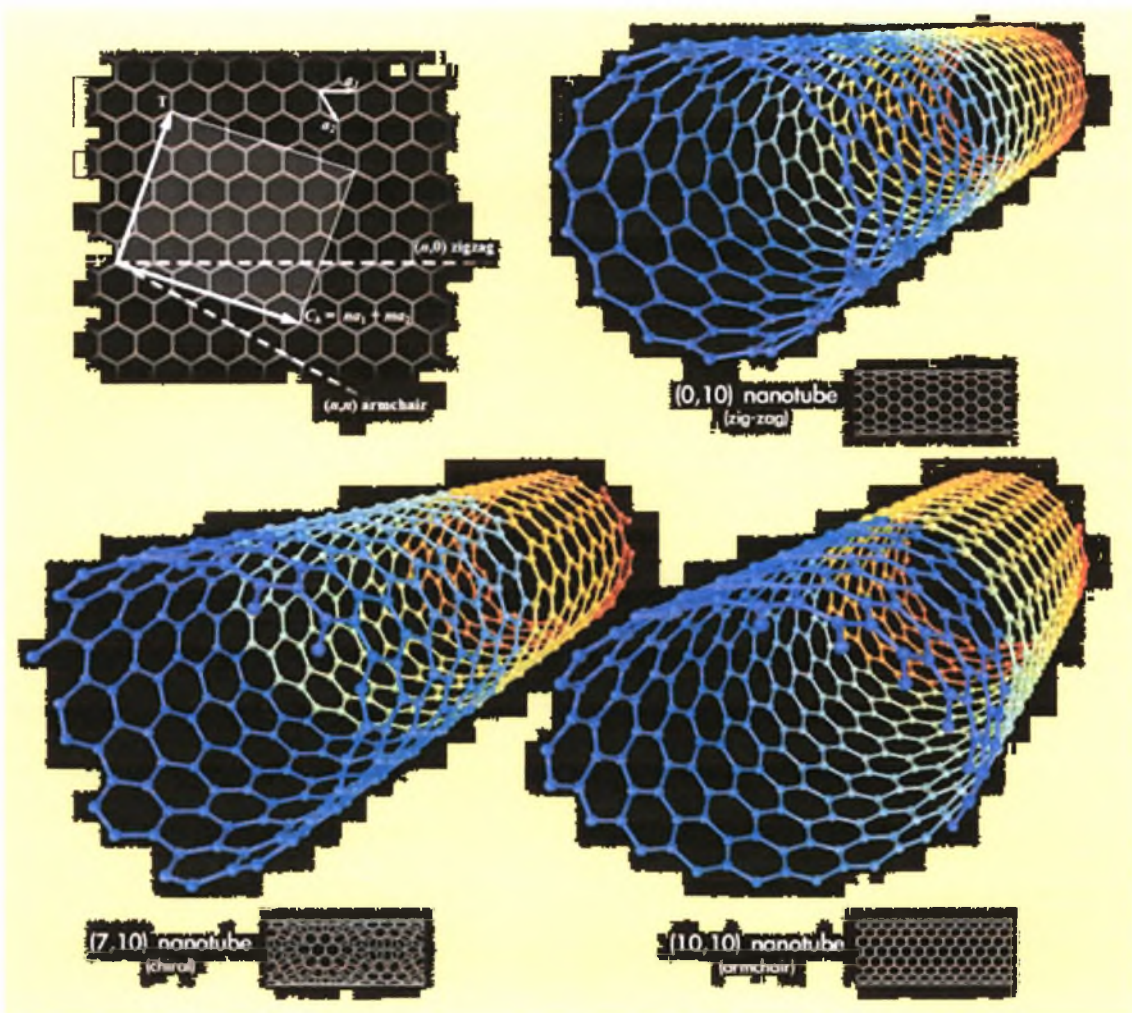
Το εξαγωνικό διδιάστατο πλέγμα αντιστοιχίζεται σε ένα κύλινδρο ακτίνας  $R$  με ελικώσεις που χαρακτηρίζονται από τους λεγόμενους τροχαίους φορείς ( $n$ ,  $m$ ), καθώς τα διάφορα είδη νανοςωλήνες χαρακτηρίζονται από αυτά τα ζεύγη ( $n$ ,  $m$ ), σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.14 Νανοσωλήνες (NASA, 2008)



Σχήμα 2.15 Φύλλα γραφήματος, Graphite sheets, νανοσωλήνων (Nanopedia,2008)



**Σχήμα 2.16** Σχηματική δομής των νανοσωλήνων άνθρακα.

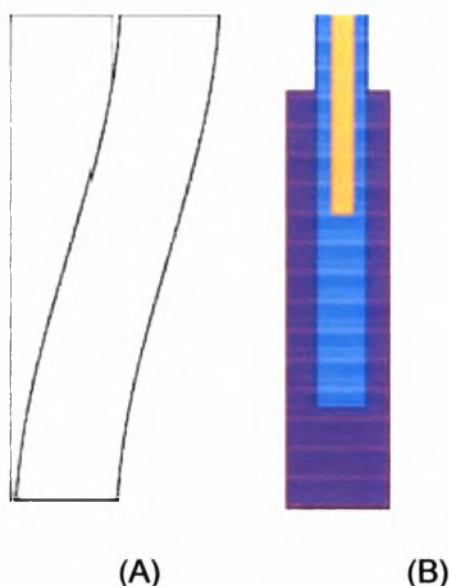
Οι εξωτερικές κλίμακες μήκους σχετίζονται με το εσωτερικό ατομικό διάστημα των νανοσωλήνων, καθώς και την απόσταση των ατελειών, (οι ατέλειες μπορούν να ελέγχουν τις μηχανικές ιδιότητες των νανοσωλήνων).

Υπάρχουν, (σχήμα 2.17), τρεις σχετικοί μηχανισμοί παραμόρφωσης:

- λυγισμός στήλης και κελύφους του σωλήνα με λεπτά τοιχώματα,
- τηλεσκοπική σύμπτυξη του σωλήνα, και
- θραύση του σωλήνα.

Τηλεσκοπικός είναι ένας τρόπος παραμόρφωσης που είναι δυνατός μόνο σε νανοσωλήνες με πολλαπλά τοιχώματα, αλλά λυγισμός και θραύση μπορεί να εμφανιστούν σε όλους τους νανοσωλήνες.

Λυγισμός είναι μια δομική αστάθεια κατά την οποία μια δομή παραμορφώνεται ξαφνικά με απότομη πτώση της ικανότητας μεταφοράς φορτίου, και, συνεπώς, αποτελεί μια αστοχία που οφείλεται σε διαρθρωτικό μηχανισμό.



**Σχήμα 2.17** Σχηματική απεικόνιση των δύο πιθανών τρόπων παραμόρφωσης και αστοχίας των νανοσωλήνων. (Α) Λυγισμός σε μια λεπτή στήλη. (Β) Τηλεσκοπική ενός Πολύτοιχου νανοσωλήνα. Η θραύση των νανοσωλήνων είναι ο τρίτος τρόπος, αλλά δεν εμφανίζεται στο σχήμα.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη λυγισμού, ο πιο γνωστός είναι ο θλιπτικός λυγισμός λεπτής στήλης, (που ονομάζεται Euler λυγισμός). Αυτό είναι μια διαρθρωτική αστάθεια κατά την οποία η στήλη παύει να παραμένει ίσια, παίρνοντας μια κλίση στο σχήμα όταν το φορτίο υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή που ονομάζεται φορτίο λυγισμού Euler:

$$P_{CR} = \pi^2 EI / L_e^2 = \pi^2 EA / (L_e^2 / \rho_g) = \pi^2 EA / S_R^2 \quad (2.8)$$

όπου  $L_e$  είναι το πραγματικό μήκος της στήλης, και  $I = A \rho_g^2$  είναι η ροπή

αδρανείας, με  $A$  η επιφάνεια διατομής της στήλης και  $\rho_g = \sqrt{\frac{I}{A}}$  μια γεωμετρική ιδιότητα της διατομής που ονομάζεται ακτίνα περιστροφής. Για μια κυκλική διατομή ακτίνας  $r$ ,  $\rho_g = r/2$ , ενώ για ένα σωληνάριο με εσωτερική ακτίνα  $r$  και πάχος τοιχώματος  $t$ , η ακτίνα περιστροφής είναι:

$$\rho_g = \sqrt{r(r + t)} / \sqrt{2} \quad (2.9)$$

Η αναλογία του πραγματικού μήκους της στήλης προς την ακτίνα περιστροφής ονομάζεται ισχνότητα:  $S_R = L_e / \rho_g$ . Μεγάλος λόγος ισχνότητας σημαίνει χαμηλό κρίσιμο φορτίο λυγισμού σε συμπίεση. Δεδομένου ότι τα μήκη των

νανοσωλήνων είναι συνήθως τάξεις μεγέθους μεγαλύτερα από τη διάμετρο, τέτοιος θλιπτικός λυγισμός μπορεί να συμβεί πολύ εύκολα, και έτσι οι νανοσωλήνες σπάνια προορίζονται για χρήση υπό θλιπτική φόρτιση. Η κύρια καταπόνηση των λεπτών ινών είναι πάντα σε εφελκυσμό.

Ωστόσο, ακόμη και όταν το εφαρμόσιμο φορτίο είναι εφελκυσμός, οι νανοσωλήνες συνήθως υπόκεινται σε καμπτικές δυνάμεις (για παράδειγμα, ως αποτέλεσμα των έκκεντρων αξονικών φορτίων), και στις περιπτώσεις αυτές η πρόσθετη λειτουργία του ασύμμετρου λυγισμού του τοιχώματος του σωλήνα καθίστανται δυνατή. Προσομοιώσεις του λυγισμού ενιαίου τοιχώματος νανοσωλήνα άνθρακα μελετώνται τόσο με τη μέθοδο της μοριακής δυναμικής όσο και με την μέθοδο συνεχούς μέσου από πολλούς συγγραφείς, όπως για παράδειγμα, (Cao και Chen, 2006). Ένας νανοσωλήνας άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων όταν καταπονηθεί με εφελκυσμό μπορεί αρχικά να αστοχήσει με τηλεσκοπική διεργασία κατά την οποία τα εσωτερικά τοιχώματα τραβιούνται σε σχέση με τα εξωτερικά (Cumings και Zettl, 2000, 2004). Αυτός ο τρόπος αστοχίας οφείλεται στο γεγονός ότι η διατμητική αντοχή της διεπαφής μεταξύ των τοιχωμάτων είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αντοχή των πολλαπλών τοιχωμάτων των νανοσωλήνων. Η σχετική ολίσθηση των τοιχωμάτων φαίνεται να γίνεται σχεδόν χωρίς τριβή (Kis et al., 2006). Η τηλεσκοπική λειτουργία προτείνεται επίσης σε εφαρμογές με αισθητήρες για μικρές μετατοπίσεις και ως κωδικοποιητές (Jiang et al., 2007).

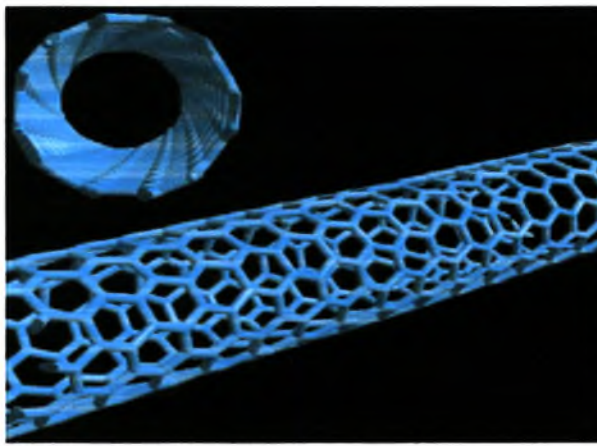
Αν ένας νανοσωλήνας τεθεί υπό θλιπτική τάση, ο κύριος τρόπος αστοχίας είναι η θράση (Yu et al., 2000b). Ο τρόπος της θραύσης εξαρτάται από τη δομή και τη σύνθεση του νανοσωλήνα, καθώς και από τον αριθμό και τις σχετικές θέσεις των ατελειών στο εσωτερικό του νανοσωλήνα, (σημειώστε ότι ατέλειες στους νανοσωλήνες σημαίνει ότι λείπουν κυρίως άτομα ή βρίσκονται άτομα σε λάθος θέση). Σε αντίθεση με τις συμβατικές κρυσταλλικές μεταλλικές κατασκευές, οι νανοσωλήνες δεν περιέχουν εξαρθρώσεις, και έτσι η εξαρθρωτική πλαστικότητα με καθαρή επιταχυνόμενη αστοχία δεν μπορεί να συμβεί. Πολύτοιχοι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιούν την ολίσθηση ανάμεσα στα στρώματα των τοίχων για να δημιουργήσουν προφανή πλαστική παραμόρφωση πριν από την τελική θραύση, (αυτό σχετίζεται με την τηλεσκοπική λειτουργία), αλλά νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος δεν έχουν αυτή την δυνατότητα. Πολύτοιχοι νανοσωλήνες άνθρακα συχνά θραύονται λόγω ελλείψεως του πρώτου από το εξωτερικά κελύφη (αυτός ο

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

τρόπος μερικές φορές αποκαλείται «σπαθί-στη-θήκη», “sword-in-sheath” ) (Yu et al., 2000). Όταν οι δέσμες από νανοσωλήνες με μονά τοιχώματα καταπονηθούν σε θλιπτική τάση, μια δέσμη φαίνεται να λυγίζει προς τα κάτω πριν από την θράση, αλλά αυτό αντιστοιχεί στον προοδευτικό αριθμό των πολλαπλών νανοσωλήνων στα πλαίσια της δέσμης (Yu et al., 2000). Προσομοιώσεις δείχνουν ότι νανοσωλήνες άνθρακα μονού τοιχώματος ενδέχεται να αστοχήσουν τελικά μέσω της αναδιοργάνωσης της ατομικής τους δομής μέχρι ότου μεμονωμένοι δεσμοί να φέρουν το φορτίο. Οι νανοσωλήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή σύνθετων υλικών από ίνες που μπορούν να κληρονομήσουν κάποιες από τις εξαιρετικές ιδιότητες των νανοσωλήνων, (Coe et al, 2009). Για παράδειγμα, νανο-σωλήνες άνθρακα μπορούν να αναμειγνύονται με αργιλο-πυριτικά υλικά και να παράγουν πολύ λεπτές πλάκες που είναι πολύ ανθεκτικές και αγώγιμες. Το παραγόμενο υλικό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ένα σκληρό, ανθεκτικό, υψηλής θερμοκρασίας και χαμηλής τριβής επίστρωμα. Τα τρέχουσα αργιλο-πυριτικά κατασκευάσματα αποτελούνται από σωματίδια διοξειδίου του πυριτίου στο φάσμα από 50 έως 100 nm. Είναι δυνατή η βελτίωση των ιδιοτήτων τους με τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων των κυψελίδων, matrix, σε 5 ή 10 nm. Αυτές οι κυψελίδες μπορούν να ενισχυθούν με την χρήση 0,5% νανοσωλήνων και να εξακολουθούν να παράγουν υλικό εξαιρετικής αντοχής και βέλτιστης ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

### 2.6.1 Μονοφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα, (single-walled nanotubes, SWCNTs)

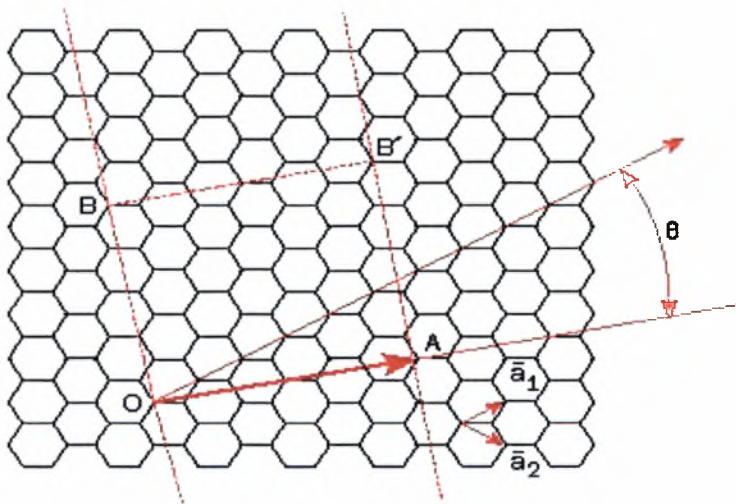
Οι μονοφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα , σχήμα 2.18, αποτελούνται από ένα γραφικό φύλλο τυλιγμένο σε καθορισμένη διεύθυνση σε κυλινδρικό σχήμα.



**Σχήμα 2.18** Μονοφλοιικός νανοσωλήνας άνθρακα (SWCNT)

Οι SWCNTs μπορεί να είναι κλειστοί στα άκρα τους από 'καπάκια' με ημισφαιρική δομή, όπως αυτή των φουλερινών. Συνεπώς, περιέχουν και πεντάγωνα στα άκρα τους εκτός από εξάγωνα. Η διάμετρός τους δεν ξεπερνάει τα 2 nm, ενώ το μήκος τους πολλές φορές φτάνει και τα 5 μm. Ο τρόπος ή η διεύθυνση κατά την οποία τυλίγεται το εξαγωγικό γραφίτικό φύλλο καθορίζεται από το διάνυσμα chiral, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.19.

56



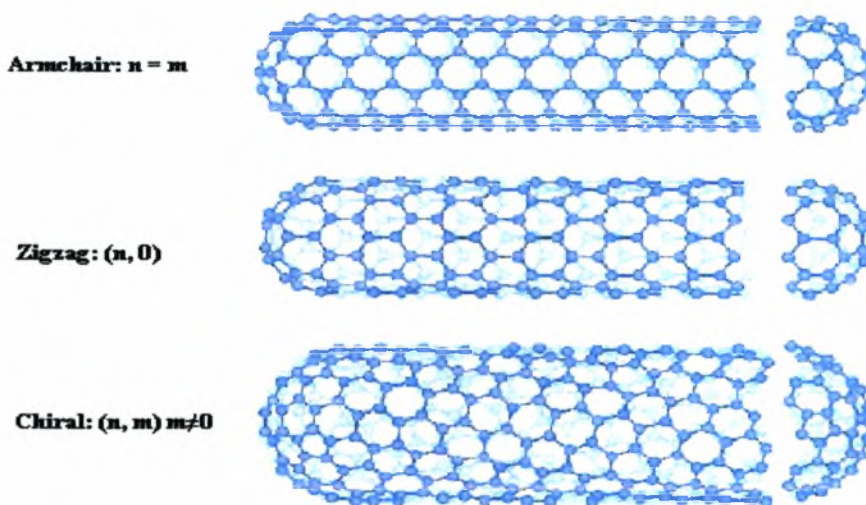
**Σχήμα 2.19** Γραφίτικό πλέγμα και απεικόνιση διανύσματος chiral

Επιλέγονται δύο άτομα στο γραφίτικό πλέγμα, O και A. Έπειτα τυλίγεται το φύλλο, ώστε το O να συμπέσει με το A και το B με το B'. Το διάνυσμα chiral έχει αρχή το O, πέρας το A και το μήκος του ισούται με την περιφέρεια του νανοσωλήνα. Η διεύθυνση του νανοσωλήνα είναι πάντα κάθετη με το διάνυσμα chiral (Ch), το οποίο καθορίζεται από τα μοναδιαία διανύσματα του διδιάστατου

γραφιτικού πλέγματος,  $a_1$  και  $a_2$ , ως  $C_h = n a_1 + m a_2$ , όπου  $n$  και  $m$  ακέραιοι. Η γωνία  $\theta$  είναι η γωνία του διανύσματος  $C_h$  με το διάνυσμα  $a_1$ .

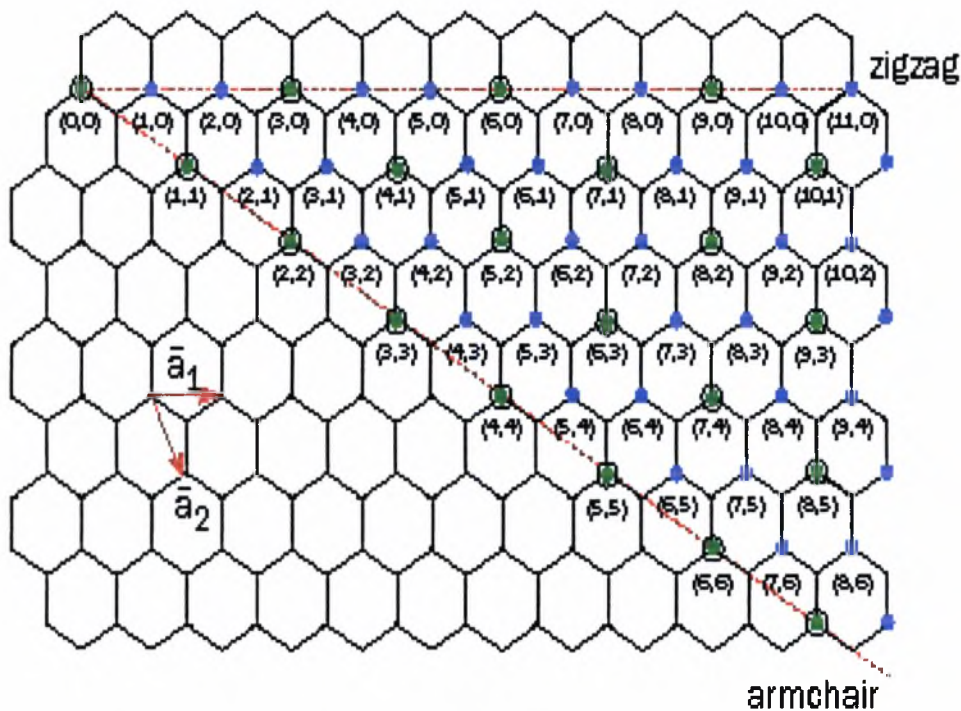
Για  $m=0$  ( $\theta = 0^\circ$ ) ο αντίστοιχος νανοσωλήνας ονομάζεται 'zigzag'. Αν  $m=n$  ( $\theta=30^\circ$ ), τότε προκύπτει ο 'armchair' νανοσωλήνας, ενώ για  $m \neq n$  ( $0 < \theta < 30^\circ$ ) έχουμε τον 'chiral νανοσωλήνα'. Ένας από τους κύριους σκοπούς των ερευνητών είναι να συνθέσουν μονοφλοιικούς νανοσωλήνες άνθρακα με προκαθορισμένους δείκτες  $m$  και  $n$ . Στο σχήμα 2.20 φαίνονται οι τρεις δομές των μονοφλοιικών νανοσωλήνων άνθρακα.

Όλες οι πιθανές δομές των μονοφλοιικών νανοσωλήνων άνθρακα απεικονίζονται στο σχήμα 2.21. Ο περιορισμός αφορά στην γωνία του διανύσματος  $chiral$  ( $\theta < 30^\circ$  ή  $m \leq n$ ). Οι ακέραιοι  $m$  και  $n$  εκτός από την δομή και τη διάμετρο του νανοσωλήνα υποδηλώνουν και τις ηλεκτρονικές του ιδιότητες. Όταν το πηλίκο  $(n-m)/3$  είναι ακέραιος αριθμός, ο νανοσωλήνας παρουσιάζει μεταλλική συμπεριφορά (πράσινοι κύκλοι στο σχήμα 2.21) ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση είναι ημιαγωγίμος (μπλε σημεία στο σχήμα 2.21). Αξίζει να αναφερθεί ότι όλοι οι armchair νανοσωλήνες είναι μεταλλικοί.



**Σχήμα 2.20** Armchair, Zigzag και Chiral νανοσωλήνες άνθρακα



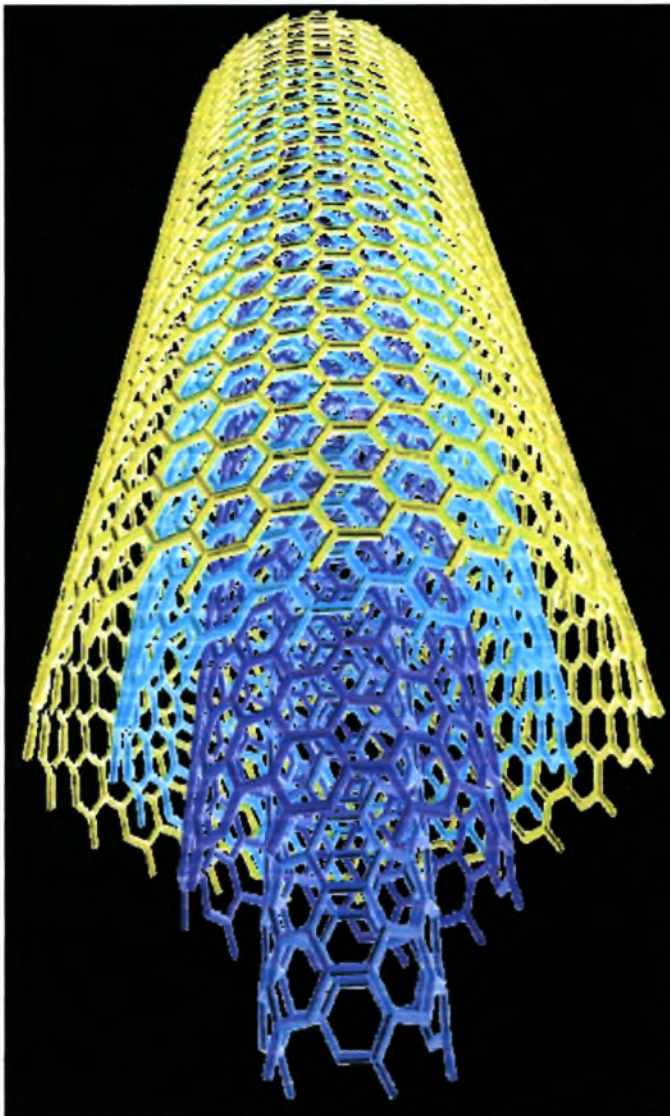


Σχήμα 2.21 Πιθανές δομές μονοφλοιικών νανοσωλήνων άνθρακα

### 2.6.2 Πολυφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα, (Multi-walled nanotubes, MWCNTs)

Οι πολυφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα αποτελούνται από μια σειρά από γραφικά φύλλα, τα οποία είναι τυλιγμένα ομοκεντρικά το ένα μέσα στο άλλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22. Η διάμετρός τους συνήθως κυμαίνεται μεταξύ των 3 και των 250 νανο-μέτρων. Η απόσταση μεταξύ των τοιχωμάτων τους προσεγγίζει την απόσταση μεταξύ δύο γραφικών φύλλων (0.335 nm) .

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν προσελκύσει τα τελευταία χρόνια οι πολυφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα που περιλαμβάνουν δυο γραφικά φύλλα (Double-Walled Carbon Nano-Tubes, DWCNTs). Οι ιδιότητες τους είναι παρόμοιες με αυτές των μονοφλοιικών. Παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι τροποποιούνται χημικά πιο εύκολα από τους μονοφλοιικούς, στους οποίους για να προστεθεί χημικά μια ομάδα χρειάζεται να σπάσουν ορισμένοι διπλοί δεσμοί. Με αυτόν τον τρόπο προκαλούνται κενά στη δομή των SWCNTs και συνεπώς μεταβάλλονται οι ηλεκτρικές και οι μηχανικές τους ιδιότητες. Σε αντίθεση, στους DWCNTs τροποποιείται μόνο το εξωτερικό τοίχωμα.

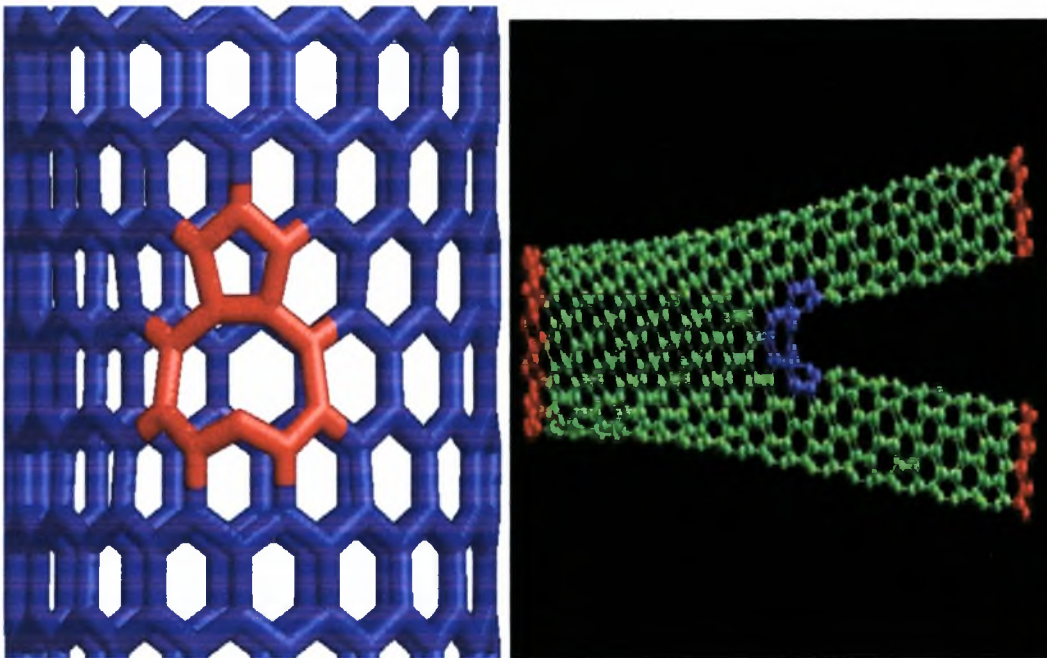


**Σχήμα 2.22** Δομή πολυφλοιικού νανοσωλήνα άνθρακα, (πηγή, <http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm>)

### 2.6.3 Ατέλειες στη δομή των νανοσωλήνων άνθρακα

Όπως και σε κάθε άλλο υλικό, έτσι και στους νανοσωλήνες άνθρακα εντοπίζονται πληθώρα από ατέλειες, οι οποίες μπορούν να υφίστανται με τη μορφή των ατομικών κενών, όπως δείχνει το σχήμα 2.22α. Επίσης, μπορούν να παρατηρηθούν νέες δομές όπως Y- ή T- διακλαδώσεις (σχήμα 2.22β ) καθώς και αλλοίωση του κυλινδρικού σχήματός τους, όταν αντικαθίστανται εξάγωνα με επτάγωνα ή πεντάγωνα στο πλέγμα των νανοσωλήνων. Άλλη κατηγορία ατελειών προκαλείται από ακαθαρσίες-προσμίξεις που ενσωματώνονται στη δομή τους κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των

νανοσωλήνων, όπως είναι τα καταλυτικά σωματίδια. Μια άλλη βασική μορφή ατελειών αποτελεί η παρουσία άμορφου άνθρακα στα τοιχώματα των νανοσωλήνων



α)

β)

**Σχήμα 2.22** Ατέλειες στη δομή των νανοσωλήνων α) Ατομικό κενό β) Υ-διακλάδωση

#### 2.6.4 Ιδιότητες νανοσωλήνων άνθρακα

Όπως προαναφέρθηκε, οι νανοσωλήνες άνθρακα επιδεικνύουν μοναδικές ιδιότητες που τους επιτρέπουν να χρησιμοποιούνται σε μια σειρά από εφαρμογές. Εκτός των μηχανικών, δομικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων, παρουσιάζουν αξιοσημείωτες θερμικές και οπτικές ιδιότητες.

#### 2.6.5 Μηχανικές ιδιότητες

Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι τα πιο ελαφριά και ανθεκτικά υλικά. Η ειδική τους επιφάνεια αγγίζει τα 1000 m<sup>2</sup>/g, η πυκνότητά τους κυμαίνεται στα 1.3 g/cm<sup>3</sup> και η αντοχή που επιδεικνύουν σε εφελκυσμό πηγάζει από τους ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων άνθρακα στο πλέγμα τους. Έχει αναφερθεί ότι ένας MWCNT παρουσιάζει αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 150

GPa. Αυτό μεταφράζεται στην ικανότητα ενός καλωδίου με διατομή 1 mm<sup>2</sup> να αντέχει βάρος 15000 Kg.

**Πίνακας 3** Μηχανικές ιδιότητες διάφορων υλικών

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (TPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)	Επιμήκυνση πριν τη θραύση ( % )
Armchair SWCNT	0.94 (Θ)	126.2 (Θ)	23.1
Chiral SWCNT	0.92		
Zigzag SWCNT	0.94 (Θ)	94.5 (Θ)	15.6 – 17.5
MWCNT	0.8 – 0.9	150	
Ανοξείδωτο ατσάλι	0.2	0.65 - 1	15-50
Kevlar29	0.062	3.8	3.5
Kevlar49	0.13	3.6	2.5
Kevlar149	0.18	3.6	1.9

Επίσης οι νανοσωλήνες άνθρακα παρουσιάζουν πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας Young κατά την αξονική διεύθυνση. Στο σύνολό τους, είναι πολύ ευλύγιστοι λόγω του μεγάλου τους μήκους. Ο πίνακας 3 συγκρίνει τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων διάφορων υλικών, που έχουν υπολογιστεί πειραματικά, αλλά και από θεωρητικούς υπολογισμούς. Ας σημειωθεί ότι η ύπαρξη σημαντικού ποσοστού ατελειών στο πλέγμα μπορεί να ελαττώσει την αντοχή σε εφελκυσμό μέχρι και 85 %.

## 2.7 Νανοϊνες

Νανοϊνες εξ ορισμού είναι στερεές ίνες όπου η διάμετρος είναι μικρότερη από 100 nm, και συνήθως τα μήκη των ινών είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερα από την διάμετρο παραγωγής των ινών. Η πρωταρχική εξωτερική κλίμακα μήκους είναι ως εκ τούτου η διάμετρος ινών και το μήκος των ινών,

(Charitidis, 2006). Παρόλο που υπάρχουν διάφορες νανοϊνες διαθέσιμες, η συντριπτική πλειοψηφία των νανοϊνών που συσχετίζονται με τον τομέα της νανοτεχνολογίας είναι κατασκευασμένες από πρόδρομες πολυμερείς ουσίες, συνήθως με διεργασίες όπως οι ηλεκτροστατικές, σχήμα 2.21. Για πολυμερείς νανοϊνες, μια εσωτερική κλίμακα μήκους που φαίνεται σχετίζεται με το μοριακό βάρος των ινών, και μπορεί να αντιμετωπισθεί με διάφορες ονομασίες όπως το μοριακό μήκος είτε ως το μήκος εμμονής\*, (persistence length).



### Σχήμα 2.21 Νανοϊνα άνθρακα με δομή 'ψαροκόκκαλο'

Το μήκος εμμονής είναι το μήκος κατά το οποίο ο προσανατολισμός ενός μέρους μεγάλου μορίου συσχετίζεται με τον προσανατολισμό ενός άλλου, έτσι ώστε τα βασικά μέτρα, η ακαμψία του μορίου, τα μεγάλα μήκη εμμονής συνεπάγονται άκαμπτα μόρια. Για παράδειγμα, το μήκος εμμονής μιας άκαμπτης ράβδου θα είναι άπειρο, ενώ το μήκος εμμονής του DNA είναι περίπου 50 nm. Στις συμβατικές πολυμερικές ίνες με διαμέτρους ινών στην κλίμακα μικρο, το μήκος εμμονής του πολυμερούς είναι συνήθως πολύ μικρότερο από τη διάμετρο των ινών. Η ακαμψία των ινών καθορίζεται όχι από τη μοριακή ακαμψία όσο και από την ποικιλία των συνθέσεων των πολλαπλών μορίων που απαρτίζουν την ίνα. Αυτή είναι γνωστή ως εντροπία δυσκαμψίας, με το σκεπτικό ότι είναι ιδιαίτερα διαταραγμένη κατάσταση, με πολλές πιθανές διαμορφώσεις, που προτιμώνται σε σχέση με καθορισμένες καταστάσεις (λιγότερες δυνατές διαμορφώσεις) από εντροπικής άποψης.

---

\*Το **μήκος εμμονής**, *persistence length*, είναι μια βασική μηχανική ιδιότητα ποσοτικοποίησης της ακαμψίας ενός μακρού πολυμερούς.

Οικονομίδης Α. Ιωάννης

Όταν η διάμετρος ινών τείνει να ταυτιστεί με το μήκος εμμονής του μορίου, πρέπει να αναμένεται μια δραματική αλλαγή στη συμπεριφορά της ίνας (επειδή η μοριακή ακαμψία είναι η ίδια πλέον σημαντική, και όχι απλώς η εντροπία δυσκαμψίας). Αυτό υποδηλώνει ότι νανοΐνες θα πρέπει να έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες από τις συμβατικού μεγέθους ίνες. Σημειώστε ότι οι περισσότερες αλυσίδες πολυμερών έχουν σχετικά σκληρό άνθρακα στην ραχοκοκαλιά της αλυσίδας. Η διαδικασία της κατασκευής των νανοΐνων κατά κανόνα συνεπάγεται μια αποτελεσματική σχεδίαση των ινών, με αποτέλεσμα τα προσανατολιζόμενα μόρια να έχουν πάλι μεγαλύτερη ακαμψία. Έτσι, σε γενικές γραμμές, θα πρέπει να αναμένεται ότι η ακαμψία της νανοΐνας θα υπερβαίνει την ακαμψία των ινών συμβατικού μεγέθους. Πρόσθετες επιπτώσεις προκύπτουν λόγω της αυξημένης επιφάνειας ως ποσοστό του όγκου που σχετίζονται με τις νανοΐνες, για τους ίδιους ενεργητικούς λόγους που συζητήθηκαν στην περίπτωση των νανοσωματιδίων.

Υπάρχουν πολύ λίγα πειραματικά δεδομένα για τις μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών νανοΐνων, αλλά υπάρχουν πληθώρα στοιχείων σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών νανοΐνων από συνθετικά ενισχυμένα υλικά (Huang et al., 2003). Με τέτοια σύνθετα υλικά, οι αλληλεπιδράσεις του συνόλου των ινών γίνονται κυρίαρχος όρος στο καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων. Η ευελιξία και η αντοχή αυτών των ινών τις καθιστά επίσης ελκυστικές για εφαρμογές σε συσκευές, όπου η μεγάλη επιφάνεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργοποίηση της. Αυτές οι ίνες χρησιμοποιούνται συχνά ως δομικά στοιχεία για τις μεγαλύτερες κατασκευές όπως επιχρίσματα με νανοΐνες. Οι μηχανικές ιδιότητες των ινών και τα ψαθωτά ικρίωματα πολυμερών είναι ενδιαφέροντα, αλλά οι μεγάλες εφαρμογές των δομών αυτών είναι η δημιουργία μεγάλης επιφάνειας αλληλεπίδρασης με τα βιολογικά και χημικά περιβάλλοντα.

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΑΝΟΥΪΚΩΝ

### 3.1 Εφαρμογές της νανοτεχνολογίας και των νανοϋλικών στις κατασκευές

Η τρέχουσα έρευνα που διεξάγεται στον τομέα αυτό στοχεύει στην επανεξέταση των τρεχόντων προγραμμάτων της νανοτεχνολογίας με σκοπό να εντοπιστούν οι τομείς εφαρμογής που θα μπορούσαν να επωφεληθούν από μια στενή συνεργασία μεταξύ του μηχανικού και της βιομηχανίας των κατασκευών και της ερευνητικής κοινότητας. Η έρευνα θα εξετάσει τα προγράμματα της νανοτεχνολογίας και θα συνοψίσει τις υπάρχουσες γνώσεις για την κατανόηση της, θα διερευνηθούν οι υπάρχουσες ιδέες της, οι ανάγκες και τα προϊόντα σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας, για να διδαχθούμε έτσι από την ιστορία της και από την υπάρχουσα εμπειρία κατά την υλοποίηση των προϊόντων νανοτεχνολογίας, στο κατά πόσο αξίζει να εφαρμοστεί στις κατασκευές. Τα οφέλη και οι περιορισμοί των επιλεγμένων εφαρμογών της νανοτεχνολογίας θα πρέπει να αξιολογούνται για τα αποτελέσματα που μπορούν να έχουν στον τομέα των κατασκευών.

Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον από τον ακαδημαϊκό χώρο, την επενδυτική κοινότητα και μεταξύ των κατασκευαστών σχετικά με τις συναρπαστικές ευκαιρίες που προσφέρουν τα υλικά της νανοκλίμακας.

Οι κατασκευές, όμως, είναι ένας τομέας στον οποίο πολλές εφαρμογές έχουν ήδη προκύψει. Οι παραγωγοί των νανοϋλικών υπόσχονται πολλά οφέλη από νανο-ενίσχυση των δομικών προϊόντων, στα οποία περιλαμβάνονται:

- χαμηλό κόστος συντήρησης παράθυρων,
- μεγάλη διάρκεια ζωής και ανθεκτικότητα στις χαράξεις των δαπέδων,
- πολύ ισχυρά δομικά στοιχεία,
- βελτίωση της διάρκειας ζωής και της μονωτικής ικανότητας των χρωμάτων,

- υγιεινότερος και ασφαλέστερος εσωτερικός κλιματισμός,
- αυτό-καθοριζόμενοι ουρανοξύστες,
- αντι-μικροβιακές επιφάνειες στον σίδηρο και τον χάλυβα,
- βελτίωση της βιομηχανικής συντήρησης των κτιρίων,
- χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων,
- μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων και των γεφυρών.

Η χρήση των νανοϋλικών επιτρέπει στους κατασκευαστές να προσφέρουν πλέον μεγαλύτερες εγγυήσεις στα προϊόντα. Οι ιδιοκτήτες των κατασκευών αναμένεται να επωφεληθούν από την μείωση των δαπανών συντήρησης, ενώ οι καταναλωτές ελπίζουν για σπίτια που θα κατασκευάζουν οι ίδιοι.

### **3.2 Νανοτεχνολογία και Χάλυβας**

Ο Χάλυβας είναι ευρέως διαθέσιμος από τη δεύτερη βιομηχανική επανάσταση και από τα τέλη της δεκαετίας του 19<sup>ου</sup> και στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, και διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στον κλάδο των κατασκευών από την εποχή εκείνη. Συνολικά 185 mega τόνοι χάλυβα παράγονται ετησίως στην ΕΕ και τα οφέλη από την ευρεία χρήση του στις βιομηχανίες, και τις σχετικές κατασκευές βρίσκεται σε μια ικανοποιητική κατανομή της χρηματοδότησης στην έρευνα.

Ο κλάδος των κατασκευών μπορεί να επωφεληθεί από τις εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στη χαλυβουργία και κάποιες από τις πολλά υποσχόμενες περιοχές βρίσκονται υπό μελέτη ή είναι διαθέσιμες σήμερα, και θα διερευνηθούν στις επόμενες παραγράφους.

Η κόπωση είναι ένα σημαντικό ζήτημα που μπορεί να οδηγήσει στη διαρθρωτική αδυναμία του χάλυβα που υπόκειται σε κυκλική φόρτωση, όπως σε γέφυρες ή πύργους. Αυτό μπορεί να συμβεί σε σημαντικά χαμηλότερη τιμή από την όριο ελαστικότητας του υλικού και να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής της κατασκευής. Η τρέχουσα σχεδιαστική φιλοσοφία επιβάλλει ένα ή περισσότερα από τρία μέτρα περιορισμού. Μια βάση είναι:

- η δραματική μείωση της επιτρεπόμενης φόρτισης,
- μια μικρότερη επιτρεπόμενη διάρκεια ζωής,
- ή η ανάγκη για ένα κανονικό σύστημα επιθεωρήσεων της



κατασκευής.

Αυτό έχει σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος του κύκλου ζωής της κατασκευής και των ορίων της αποτελεσματικής και αειφόρου χρήσης των πόρων καθώς και θεμάτων ασφάλειας των κατασκευών. Η αύξηση του φορτίου είναι η αιτία για την έναρξη ρωγμών, το αποτέλεσμα των οποίων είναι η αστοχία λόγω της κόπωσης. Η έρευνα έχει δείξει ότι η προσθήκη των νανοσωματιδίων χαλκού μειώνει τις επιφανειακές ανομοιομορφίες του χάλυβα, γεγονός που περιορίζει τον αριθμό των αυξήσεων των φορτίσεων και ως εκ τούτου, τα ραγίσματα που προκαλούνται λόγω κόπωσης, (NanoForum, 2006).

Η πρόοδος στην τεχνολογία αυτή θα οδηγήσει σε αυξημένη ασφάλεια, η μικρότερη ανάγκη για παρακολούθηση και αποδοτικότερη χρήση υλικών στις κατασκευές που είναι επιρρεπείς σε θέματα κόπωσης. Η τρέχουσα έρευνα για την τελειοποίηση της σεμεντιτικής\* φάσης του χάλυβα σε μια νανο-μεγέθους φάση με την οποία παράγονται ισχυρότερα καλώδια. Καλώδια υψηλής αντοχής χάλυβα, χρησιμοποιούνται στα ελαστικά των αυτοκινήτων, στην κατασκευή γεφυρών και στο προτεταμένο σκυρόδεμα. Τα ισχυρότερα υλικά καλωδίων θα μείωνε το κόστος και τη περίοδο κατασκευής τους, ιδιαίτερα σε καλωδιακές γέφυρες, όπου τα καλώδια τρέχουν από άκρη σ' άκρη τη γέφυρα. Η αειφορία ενισχύεται επίσης από τη χρήση των καλωδίων υψηλότερης αντοχής, δεδομένου ότι οδηγεί σε μια πιο αποτελεσματική χρήση των υλικών. Η αύξηση του ύψους των κατασκευών, απαιτεί υψηλής αντοχής αρθρώσεων και αυτό με τη σειρά του οδηγεί στην ανάγκη για βίδες υψηλής αντοχής, (NanoForum, 2006). Η ικανότητα των υψηλής αντοχής κοχλιών πραγματοποιείται κατά κανόνα μέσω της βαφής και της σκλήρυνσης, οι μικροδομές των εν λόγω προϊόντων αποτελούνται από σκληρυμένο μαρτενσίτης\*\*.

---

\*Ο **σεμεντίτης** είναι διαμεταλλική ένωση του σιδήρου με τον άνθρακα (καρβίδιο) με χημικό τύπο  $Fe_3C$  και σύσταση 93,31% κ.β. Fe και 6,69% κ.β. C. Πρόκειται για σκληρή και εύθραυστη στερεά φάση με ιδιαίτερη σημασία στην μεταλλογνωσία του χάλυβα.

\*\*Ο **μαρτενσίτης** είναι μετασταθή φάση που σχηματίζεται όταν ένας χάλυβας θερμανθεί σε υψηλή θερμοκρασία, ώστε να σχηματιστεί ωστενίτης ( $\gamma-Fe$ ), και κατόπιν υποστεί απότομη ψύξη.

Όταν η αντοχή σε εφελκυσμό από σκληρυμένο Μαρτενσίτη χάλυβα υπερβαίνει τις 1.200 MPa ακόμη και μια πολύ μικρή ποσότητα υδρογόνο στα όρια σκληρότητας του υλικού του χάλυβα μπορεί να αποτύχει κατά τη χρήση. Η χρήση των νανοσωματιδίων του βανάδιου και μολυβδαίνιου έχει δείξει ότι μπορεί να βελτιώσει τη καθυστέρηση εμφάνισης των προβλημάτων καταγμάτων που συνδέονται με της υψηλής αντοχή βίδες, (NanoForum, 2006). Αυτό το φαινόμενο, το οποίο είναι γνωστό ως καθυστερημένο κάταγμα, που εμπόδισε την περαιτέρω ενίσχυση των κοχλιών από χάλυβα και η υψηλότερη αντοχή τους έχει εδώ και πολύ καιρό περιορίσει την αντοχή σε περίπου 1.000 έως 1.200 MPa.

Αυτό είναι το αποτέλεσμα των νανοσωματιδίων στον περιορισμό των συνεπειών της ευθραυστότητας υδρογόνου και τη βελτίωση του χάλυβα στην μικρο δομή με τη μείωση των συνεπειών της μεταξύ των κόκκων στη φάση του Σεμεντίτη.

Ένα άλλος τομέας στον οποίο η νανοτεχνολογία μπορεί να βοηθήσει είναι οι συγκολλήσεις θερμαινόμενης ζώνη (Heat Affected Zone) (HAZ) οι οποίες μπορεί να είναι εύθραυστες και να αποτυγχάνουν χωρίς προειδοποίηση, όταν υποβάλλονται σε ξαφνική δυναμική φόρτιση, η ανθεκτικότητα της συγκόλλησης τους όμως είναι ένα σημαντικό ζήτημα ιδίως στις περιοχές με υψηλή σεισμική δραστηριότητα. Οι συγκολλήσεις με HAZ οδήγησαν σε αποτυχίες δομικών αρμών κατά την διάρκεια του σεισμού του ρήγματος Northridge του 1994 στο Los Angeles. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αλλάξουν οι τρέχουσες φιλοσοφίες σχεδιασμού που περιλαμβάνουν την επιλεκτική εξασθένιση των δομών για να παράγουν ελεγχόμενη παραμόρφωση μακριά από το σημείο θραύσης των συγκολλημένων αρμών ή τη σκόπιμη υπέρ-διαστασιολόγηση των δομών για να αντέχουν, (NanoForum, 2006). Η έρευνα βρίσκεται υπό εξέλιξη, ωστόσο, έχει δείξει ότι η προσθήκη νανοσωματιδίων μαγνησίου και ασβεστίου κάνει την συγκόλληση με HAZ να παράγει κόκκους λεπτότερους, (περίπου το 1/5 του μεγέθους του συμβατικού υλικού των λαμαρινών), και αυτό οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας συγκόλλησης. Πρόκειται για μια βιώσιμη ανάπτυξη καθώς και για ένα θέμα ασφάλειας, όπως η αύξηση της ανθεκτικότητας των συγκολλημένων αρμών, που θα οδηγήσει σε μια μικρότερη απαίτηση πόρων, επειδή λιγότερο υλικό θα

είναι αναγκαίο για να διατηρήσει την αντοχή εντός επιτρεπομένων ορίων. Αν και οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNT) είναι ένα συναρπαστικό υλικό, με τεράστιες ιδιότητες αντοχής και δυσκαμψίας, έχουν βρει λίγες εφαρμογές ως προσθήκη στο χάλυβα (λόγω της φύσης τους σαν γραφιτικός) πράγμα που καθιστά δύσκολη την σύνδεση του με τον κύριο όγκο του υλικού και αποβάλλεται εύκολα, καθιστώντας το αναποτελεσματικό. Επιπλέον, οι ψηλές θερμοκρασίες που εμπλέκονται στην παραγωγή χάλυβα και οι επιπτώσεις τους στην CNT παρουσιάζουν μια πρόκληση για την αποτελεσματική χρήση τους ως ένα σύνθετο συστατικό. Η νανο-σύνθεση παράγεται με την προσθήκη νανοσωματιδίων σε χύμα υλικό προκειμένου να βελτιώσουν τις ιδιότητές του στο μεγαλύτερο μέρος των υλικών. Δύο σχετικά νέα προϊόντα που είναι διαθέσιμα σήμερα, (NanoForum, 2006), είναι:

1. Ο χάλυβας Sandvik Nanoflex (που παράγεται από την Sandvik Τεχνολογίας Υλικών).
2. Ο MMFX2 χάλυβα (που παράγεται από την MMFX Steel Corp).

Και οι δύο είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση, αλλά έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και είναι το αποτέλεσμα των διαφόρων εφαρμογών της νανοτεχνολογίας. Παραδοσιακά, η εναλλαγή μεταξύ αντοχής και ολκιμότητας είναι ένα σημαντικό ζήτημα για το χάλυβα. Οι δυνάμεις στις σύγχρονες κατασκευές, απαιτούν υψηλή αντοχή, ενώ η ασφάλεια (ιδίως σε σεισμικές περιοχές) και η αναδιανομή των φορτίσεων απαιτεί υψηλή ολκιμότητα. Αυτό έχει οδηγήσει στη χρήση ελατού υλικού χαμηλής αντοχής σε μεγαλύτερα μεγέθη από ό, τι θα ήταν διαφορετικά δυνατή με υψηλής αντοχής εύθραυστο υλικό και, κατά συνέπεια, πρόκειται για ένα θέμα της βιωσιμότητας και της αποτελεσματικής χρήσης των πόρων. Ο χάλυβας Sandvik Nanoflex έχει τόσο τις επιθυμητές ιδιότητες του υψηλού μέτρου Young και την υψηλή αντοχή και είναι επίσης ανθεκτικός στη διάβρωση λόγω της παρουσίας σκληρών νανοσωματιδίων στην βασική δομή του. Παρουσιάζει πραγματικά υψηλή αντοχή με εξαιρετική σχηματιστικότητα και επί του παρόντος αυτό χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξαρτημάτων πολύ διαφορετικών όπως ιατρικά μηχανήματα και εξαρτήματα ποδηλάτων, ωστόσο, υπάρχουν εφαρμογές και στην κατασκευή μηχανών και εργαλείων για τις καλλιέργειες. Η χρήση του ανοξειδωτού χάλυβα στο



οπλισμένο σκυρόδεμα έχει περιοριστεί μόνο στις περιπτώσεις υψηλού κινδύνου, όπως και για περιβάλλοντα όπου η χρήση της είναι απαγορευτική λόγω κόστος. Ωστόσο, ο MMFX2 χάλυβας, ενώ έχει τις μηχανικές ιδιότητες του συμβατικού χάλυβα, διαθέτει μια τροποποιημένη νανο-δομή που το καθιστά ανθεκτικό στη διάβρωση και είναι μια εναλλακτική λύση σε σχέση με τον συμβατικό ανοξειδωτο χάλυβα, αλλά με μικρότερο κόστος. Η εμπράγματη φύση των τεχνολογιών που εμπλέκονται στην παραγωγή σιδήρου και χάλυβα επιτρέπει μια πιο λεπτομερή περιγραφή της ακριβούς φύσης των νανοτεχνολογικών πτυχών αυτών των δύο προϊόντων.

Ερευνητές στην Ιαπωνία έχουν ανακαλύψει ένα νέο τρόπο για την ενίσχυση του χάλυβα. Έχουν δημιουργήσει χάλυβα που είναι εκατό φορές ισχυρότερος σε ερπυσμό\* από τον πιο ισχυρότερο που διατίθεται σήμερα. Η μέθοδος θα μπορούσε να οδηγήσει στην οικονομική κατασκευή μεγάλης κλίμακας στοιχείων χάλυβα για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, (Taneike et al., 2003).

Ερπυσμός είναι το είδος της παραμόρφωσης που αποδυναμώνει τα μέταλλα και τα κράματά τους, όταν αυτά είναι εκτεθειμένα σε τάσεις και σε υψηλές θερμοκρασίες. Για την ενίσχυση του χάλυβα κατά του ερπυσμού, εισάγονται και διασπείρονται μικρά σωματίδια - κυρίως οξειδία - σε όλο το μέταλλο, αλλά η τεχνική αυτή είναι δαπανηρή και δεν είναι κατάλληλη για την κατασκευή μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον λόγω σκλήρωσης των σωματιδίων με το χρόνο μειώνεται η ενίσχυση της αντοχής τους. Σε πολλούς ενισχυμένους χάλυβες, οι αυξήσεις του μεγέθους του ερπυσμού απότομα μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα είναι ένα δείγμα ύπαρξης ρωγμών. Αυτή η λεγόμενη "ρήξη με τον χρόνο" εξαρτάται από την ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα στο χάλυβα, (Nippon , 2005).

---

\***Ερπυσμός** λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα στερεό σώμα, στο οποίο ασκείται μια δύναμη τάσης (το οποίο δηλαδή "τραβάμε" προς τα έξω) συνεχίζει να παραμορφώνεται ακόμα κι όταν η δύναμη παραμείνει σταθερή ή ακόμα μειωθεί.

Με την προσθήκη μόλις 0,002% του άνθρακα σε μαρτενσιτικούς χάλυβες που περιέχουν ήδη το 9% σε χρώμιο. Ο Sawada και οι συνεργάτες του ήταν σε θέση να αυξήσει την ρήξη με τον χρόνο στους 923 Kelvin με συντελεστή πάνω από 100 και στην κατασκευή του πιο ανθεκτικού χάλυβα είναι διαθέσιμος σήμερα (που περιέχει περίπου άνθρακα 0,08%). Χρησιμοποιώντας ανίχνευση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, η ομάδα Tsukuba, (ερευνητικό κέντρο), παρατήρησε ότι το δείγμα του περιείχε ένα μεγάλο αριθμό των λεπτών σωματιδίων, μεταξύ 5 και 10 νανόμετρα σε μέγεθος. Αντίθετα, οι συμβατικά ενισχυμένοι χάλυβες περιέχουν πολύ μεγαλύτερα σωματίδια, συνήθως 100 με 300 νανόμετρα συνολικά. Τα μικρά σωματίδια που περιέχονται στο μεταλλικό κράμα είτε με άνθρακα είτε με άζωτο και βρίσκονται, «συνδέονται», σε ευαίσθητες περιοχές. Αυτές είναι συνδέσεις ενίσχυσης του χάλυβα, (Taneike et al., 2003).

### **3.3 Νανοτεχνολογία και σκυρόδεμα**

Το σκυρόδεμα είναι ίσως το μοναδικό υλικό στον τομέα των κατασκευών, που μπορεί η εξέλιξη της έρευνας σε αυτό να έχει ως αποτέλεσμα την οικονομική μεγέθυνση των αποτελεσμάτων της σχετικής βιομηχανίας. Η ακόλουθη ενότητα περιγράφει μερικές από τις πιο ελπιδοφόρες εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στον κλάδο των κατασκευών, που αναπτύσσονται ή είναι ακόμα διαθέσιμες σήμερα, (NanoForum, 2006).

Στο βασικό επίπεδο της επιστήμης, ένα μεγάλο μέρος της ανάλυσης του σκυροδέματος γίνεται σε νανο-επίπεδο, προκειμένου να κατανοηθεί η δομή του, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές που αναπτύχθηκαν για τη μελέτη σε αυτή την κλίμακα όπως:

- Ατομικά Μικροσκόπια Δυνάμεων, (Atomic Force Microscopy), (AFM),
- Ηλεκτρονικά μικροσκοπία σάρωσης, (Scanning Electron Microscopy), (SEM)
- Δέσμη εστιασμένων ιόντων, (Focused Ion Beam) (FIB).

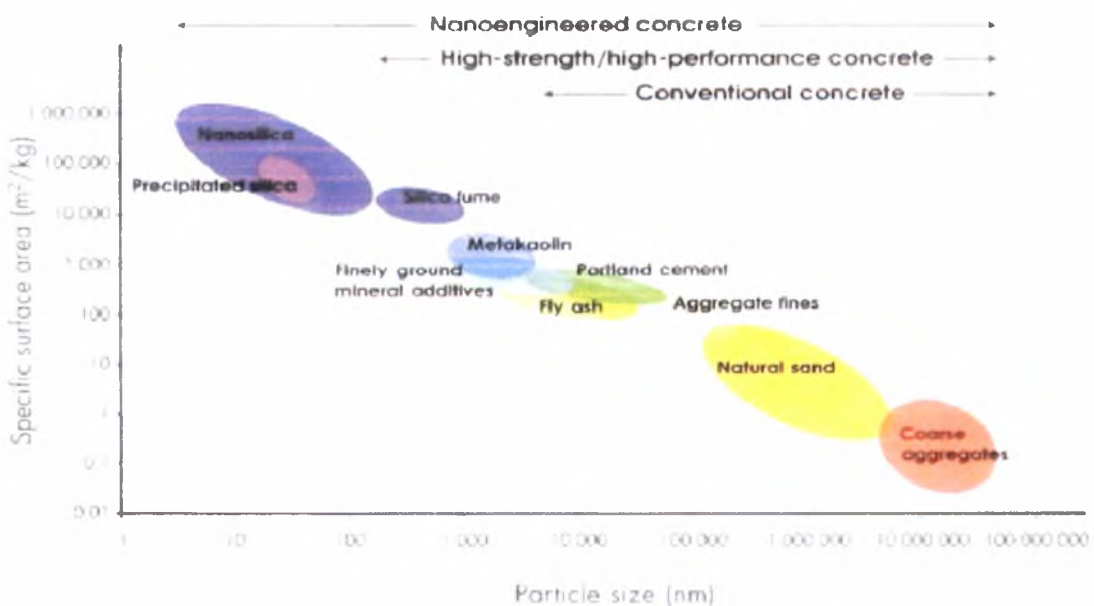
Αυτές έχουν προκύψει σαν δευτερεύον όφελος της ανάπτυξης των εν λόγω μέσων για την μελέτη της νανοκλίμακας εν γένει, αλλά η κατανόηση της δομής και της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε θεμελιώδες επίπεδο

είναι μια σημαντική και πολύ σωστή χρήση της νανοτεχνολογίας. Μία από τις θεμελιώδεις πτυχές της νανοτεχνολογίας είναι η διεπιστημονική της φύση. Υπάρχει ήδη μια διασταύρωση της έρευνας μεταξύ των μηχανικών μοντέλων για τα οστά στην ιατρική τεχνολογία με εκείνη του σκυροδέματος η οποία επέτρεψε τη μελέτη της διάχυσης του χλωρίου στο σκυρόδεμα (η οποία προκαλεί διάβρωση του οπλισμού). Το σκυρόδεμα, τελικά, είναι ένα μακρο-υλικό που επηρεάζεται έντονα από τις νανο-ιδιότητές του και η κατανόησή τους σε αυτό το νέο επίπεδο πρόκειται να δώσει νέες προοπτικές για τη βελτίωση της αντοχής του, της διάρκειας ζωής του και του ελέγχου του, που περιγράφονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

### 3.3.1 Ορισμός του νανοσκυροδέματος

Το νανο-σκυρόδεμα ορίζεται ως «ένα σκυρόδεμα που γίνεται με σωματίδια τσιμέντου Portland που είναι μικρότερα από 500 νανο-μέτρα". Επί του παρόντος, το μέγεθος των σωματιδίων του τσιμέντου κυμαίνεται από λίγα νανόμετρα με ανώτατο όριο περίπου τα 100 μικρο μέτρα. Στην περίπτωση των μικρο-τσιμέντου το μέσο μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται στο 5 μικρο μέτρα. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται το μέγεθος των σωματιδίων και των ειδικών διαστάσεων επιφάνειας που αναφέρονται σε συγκεκριμένα υλικά.

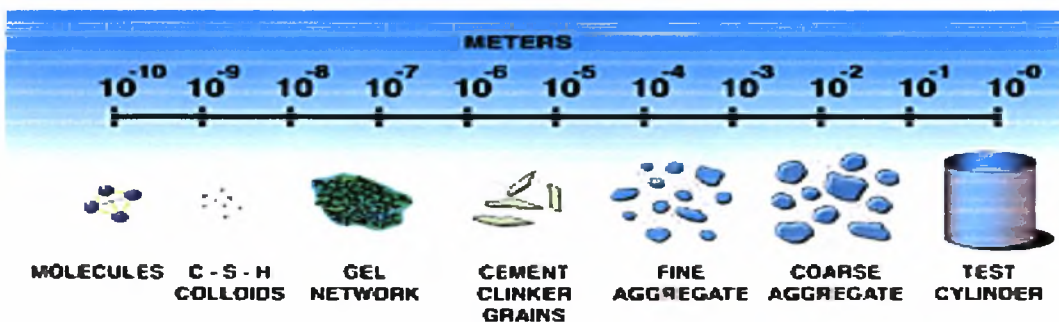
71



**Σχήμα 3.1** Μέγεθος σωματιδίων και ειδικών διαστάσεων επιφάνειας που αναφέρονται σε συγκεκριμένα υλικά.

Κάποιος μπορεί να ισχυριστεί ότι χρησιμοποιεί συγκεκριμένες

νανοτεχνολογίες επειδή το παραγόμενο υλικό περιέχει νανο-σωματίδια, δηλαδή τα συστατικά του συμπεριλαμβάνουν νανο-σωματίδια, νερό και κενά νανο-αέρα. Ωστόσο, για να υπάρχει η χρήση της νανοτεχνολογίας, θα πρέπει να είναι σε θέση να ελέγχεται η ποσότητα και οι θέσεις αυτών των νανο-συστατικών στο εσωτερικό των τελικών προϊόντων. Οι κλίμακες των διαφόρων συστατικών του σκυροδέματος παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2. Εάν μπορούσαμε να δημιουργήσουμε χημικά ή μηχανικά εργαλεία για τον έλεγχο των πόρων νανο-κλίμακας στο σκυρόδεμα και την τοποθέτηση του πυριτικού ασβεστίου στα προϊόντα ενυδάτωσης τότε το σκυρόδεμα γίνεται ένα προϊόν της νανοτεχνολογίας, (Balaguru, 2005).



Σχήμα 3.2 Κλίμακες συστατικών σκυροδέματος

Μερικοί παράγοντες που είναι σημαντικοί στην παραγωγή του σκυροδέματος, (COEet. al.,2009), είναι:

1. Το διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) είναι παρών στο συμβατικό σκυρόδεμα, ως μέρος του κανονικού μίγματος. Ωστόσο, ένα από τα πλεονεκτήματα που προέκυψαν από την μελέτη του σκυροδέματος στη νανοκλίμακα είναι ότι η προπαρασκευή των σωματιδίων του σκυροδέματος μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση νανο-πυριτίου που οδηγεί σε ενίσχυση των μικρο και νανο δομών με αποτέλεσμα τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Η προσθήκη νανο-διοξειδίου του πυριτίου στα βασικά υλικά του τσιμέντου μπορεί επίσης να ελέγξει την υποβάθμιση της βασικής αντίδρασης, (ένυδρο πυριτικό ασβέστιο), (calcium-silicate-hydrate), (CSH), του σκυροδέματος που προκλήθηκε από την διαρροή ασβεστίου στο νερό καθώς θα

εμποδίσει τη διείσδυση του νερού και, επομένως, να οδηγήσει σε βελτιώσεις στην αντοχή.

2. Σχετικό με τη βελτίωση προπαρασκευής του σκυροδέματος είναι η υψηλής ενέργειας άλεση του απλού τσιμέντου portland, (ordinary portland cement, OPC) κλίνκερ και των τυπικών άμμων, παράγει μια μεγαλύτερη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τα συμβατικά OPC και, ως εκ τούτου, η θλιπτική αντοχή του εξευγενισμένου υλικού είναι 3 έως 6 φορές υψηλότερο (σε διαφορετικές ηλικίες).
3. Εκπομπές CO<sub>2</sub> από την παγκόσμια βιομηχανία τσιμέντου είναι σημαντικές και έχουν αυξηθεί. Η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου σήμερα είναι γύρω στους 1,6 δισεκατομμύρια τόνους/έτος, και μέσα από την πύρωση του ασβεστόλιθου για την παραγωγή οξειδίου του ασβεστίου και διοξειδίου του άνθρακα, περίπου 0,97 τόνους του CO<sub>2</sub> που παράγεται για κάθε τόνο του κλίνκερ. Περίπου 900Kg κλίνκερ χρησιμοποιείται σε κάθε 1000kg του τσιμέντου που παράγεται έτσι η παγκόσμια βιομηχανία τσιμέντου παράγει περίπου 1,4 δισεκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> κάθε χρόνο. Αυτό αντιπροσωπεύει περίπου το 6% της συνολικής παγκόσμιας ανθρωπογενούς-παραγωγής CO<sub>2</sub>.
4. Η ιπτάμενη τέφρα δεν βελτιώνει μόνο την διάρκεια ζωής και την αντοχή του σκυροδέματος αλλά είναι σημαντική για την αειφορία της παραγωγής του σκυροδέματος, μειώνει την απαίτηση για ωρίμανση του τσιμέντου και την επιβραδύνει με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε σύγκριση με κανονικό σκυρόδεμα. Με την προσθήκη του SiO<sub>2</sub> μέρος από τα νανοσωματίδια του τσιμέντου, αντικαθίστανται, αλλά η πυκνότητα και η αντοχή της ιπτάμενης τέφρας σκυρόδεμα βελτιώνεται ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια. Έρευνα για τα νανοσωματίδια αιματίτη (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) που προστίθενται στο σκυρόδεμα έδειξε ότι αυξάνουν επίσης την αντοχή και προσφέρουν την δυνατότητα για παρακολούθηση των επιπέδων των τάσεων, μέσω της μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης ενός τμήματος.
5. Ένας άλλος τύπος νανοσωματιδίων που προστίθεται στο σκυρόδεμα για να βελτιώσει τις ιδιότητές του είναι το διοξείδιο του



**τιτανίου (TiO<sub>2</sub>)** που είναι μια λευκή χρωστική ουσία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια εξαιρετική ανακλαστική επίστρωση, λόγω της φωτεινότητάς της. Μπορεί επίσης να οξειδώνει οξυγόνο ή οργανικά υλικά, ως εκ τούτου, προστίθεται στα χρώματα, τα τσιμέντα, πλακάκια, ή άλλα προϊόντα για την αποστείρωση, απόσμηση και με αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Όταν ενσωματωθούν με εξωτερικά δομικά υλικά μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αερομεταφερόμενων ρύπων. Επιπλέον, όταν το TiO<sub>2</sub> έχει εκτεθεί σε υπεριώδες φως, γίνεται όλο και περισσότερο υδρόφιλο με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταπολέμηση της δημιουργίας υγρασίας στα επιχρίσματα ή σε αυτοκαθαριζόμενα παράθυρα. Ενσωματώνεται, όπως τα νανοσωματίδια για να μπλοκάρουν το υπεριώδες φως. Προστίθεται στα χρώματα, τσιμέντα και τα παράθυρα για την αποστείρωσή τους, λόγω της ιδιότητας του TiO<sub>2</sub> να διαλύει οργανικούς ρύπους, πτητικών οργανικών ενώσεων, καθώς και βακτηριακές μεμβράνες μέσω ισχυρών καταλυτικών αντιδράσεων. Αυτό μπορεί να μειώσει κατά συνέπεια τους αερομεταφερόμενους ρύπους, όταν εφαρμόζεται σε υπαίθριες επιφάνειες. Επιπλέον, είναι υδρόφιλο και ως εκ τούτου δίνει την ιδιότητα του αυτό-καθαρισμού για επιφάνειες στις οποίες έχει εφαρμοστεί. Η διαδικασία με την οποία συμβαίνει αυτό είναι ότι το νερό βροχής προσελκύεται από την επιφάνεια και σχηματίζει λεπτά φύλλα που συλλέγουν τους ρύπους και τις ακαθαρσίες τα οποία κατακρημνίζονται με συνέπεια τον καθαρισμό της επιφάνειας. Το σκυρόδεμα, που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε έργα σε όλο τον κόσμο, έχει λευκό χρώμα που διατηρεί την λευκότητα του με μεγάλη αποτελεσματικότητα σε αντίθεση με τα χρωματισμένα κτίρια, (COEet. al., 2009).

6. Ένα ακόμη είδος νανοσωματιδίων, τα οποία έχουν αξιοσημείωτες ιδιότητες, είναι οι νανοσωληνές άνθρακα, carbon nanotube, (CNT) και η τρέχουσα έρευνα που διεξάγεται για να διερευνήσει τα οφέλη από πρόσθεση CNT στο σκυρόδεμα. Η προσθήκη μικρών ποσοτήτων (1% του βάρους) CNT, μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων που αποτελούνται από τσιμέντο

Portland και νερό. Οι οξειδωμένοι πολλαπλών τοίχων νανοσωλήνες, multi-walled nanotubes, (MWNT), παρουσιάζουν τις καλύτερες βελτιώσεις της αντοχής σε θλίψη (+ 25 N/mm<sup>2</sup>) και καμπτική αντοχή (+ 8 N/mm<sup>2</sup>) σε σύγκριση με τα δείγματα αναφοράς χωρίς την ενίσχυση. Στην θεωρία η υψηλή συγκέντρωση από την επιφάνεια των οξειδωμένων MWNT's θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια καλύτερη σχέση μεταξύ των νανοδομών και των συνδετικών υλικών βελτιώνοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες και την παραμόρφωση στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Ωστόσο, υπάρχουν δύο προβλήματα με την προσθήκη των νανοσωλήνων άνθρακα σε οποιοδήποτε υλικό το ένα είναι η συγκέντρωση σε υψηλό βαθμό των νανο σωλήνων σε μια περιοχή και δεύτερον η έλλειψη συνοχής μεταξύ αυτών και των χύδην υλικών. Λόγω της αλληλεπίδρασης που υπάρχει μεταξύ των νανοσωλήνων, οι σωλήνες έχουν την τάση να σχηματίζουν δέσμες με μορφή σχοινοῦ, σχήμα 3.3, και τα σχοινιά μπορούν ακόμη και να μπερδεύονται το ένα με το άλλο.

75



**Σχήμα 3.3** Σχοινιά από νανοσωλήνες άνθρακα με μονό τοίχωμα (Gerhard Wilde, 2009, σελ 135)

Για να επιτευχθεί η ομοιόμορφη διασπορά τους πρέπει να απεμπλακούν. Επιπλέον, λόγω της γραφικτικής φύσης, δεν υπάρχει σωστή πρόσφυση μεταξύ των νανοσωλήνων και του υλικού προκαλώντας αυτό που ονομάζεται ολίσθηση. Ωστόσο, όταν προδιαλυθούν οι νανοσωλήνες παρατηρείται μια αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων, κυρίως στην περίπτωση των νανοσωλήνων με μονό τοίχωμα, (single walled nanotubes, SWNT).

Με την χρήση όλων των παραπάνω η μηχανική συμπεριφορά των συγκεκριμένων υλικών εξαρτάται από τα δομικά στοιχεία και τα φαινόμενα που συμβαίνουν σε μικρο και νάνο κλίμακες. Ως εκ τούτου, η νανοτεχνολογία μπορεί: να τροποποιήσει τη μοριακή δομή του συγκεκριμένου υλικού για τη βελτίωση των κύριων ιδιοτήτων του. Η τεχνολογία αυτή βελτιώνει σημαντικά την μηχανική απόδοση, τη σταθερότητα της ευστάθειας, την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα του σκυροδέματος. Η επαναστατική δράση αυτής της τεχνολογίας θα επιτρέψει την ανάπτυξη θετικών αποτελεσμάτων από πλευράς οικονομικής αποδοτικότητας, υψηλής απόδοσης, και μακράς διάρκειας ζωής στα προϊόντα και τις μεθόδους παρασκευής για το τσιμέντο και το σκυρόδεμα, εντός των ιδανικών της αιεφόρου ανάπτυξης. Επιπλέον, η νανο-τεχνολογία με την τροποποίηση των συγκεκριμένων υλικών σκυροδέματος μπορεί να οδηγήσει σε άνευ προηγουμένου χρήσεις των συγκεκριμένων υλικών, καθώς επίσης και νέες ταξινομήσεις του σκυροδέματος, με εκτεταμένες εφαρμογές στις υποδομές των μεταφορών.

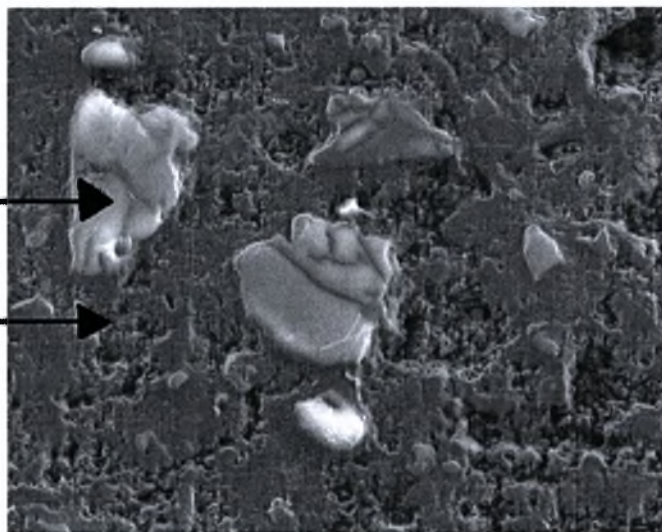
Το μέσο μέγεθος των σωματιδίων τσιμέντο Portland είναι περίπου 50 μικρά. Σε εφαρμογές που απαιτούν λεπτότερα τελικά προϊόντα και ταχύτερο χρόνο στερεοποίησης, χρησιμοποιείται μικρο τσιμέντο με μέγιστο μέγεθος σωματιδίων της τάξεως των 5 μικρών. Συνεπώς, το μέγεθος των σωματιδίων πρέπει να μειωθεί κατά μία τάξη μεγέθους για να αποκτήσουμε το νανο-τσιμέντο Portland. Εάν αυτά τα σωματίδια νανο-τσιμέντου μπορούν να επεξεργαστούν με τη χρήση νανοσωλήνων και αντιδραστικών νανο σωματιδίων πυριτίου μπορεί να παραχθούν, ισχυρά, σκληρά, αγωγιμα, και με επεξεργασία σε θερμοκρασία δωματίου, κεραμικά υλικά για εφαρμογές στην ηλεκτρονική και τις επενδύσεις επιφανειών. Εφόσον ο άνθρακας οξειδώνεται σε θερμοκρασίες άνω των 400°C, η

επεξεργασία σε θερμοκρασία δωματίου θα είναι ένα όφελος για τη διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των νανοσωλήνων άνθρακα. Μια και τα περισσότερα κεραμικά επεξεργάζονται σε θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από 400°C, οι ίνες άνθρακα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε αυτές τις διαδικασίες. Σε μικρο-επίπεδο, υπάρχει επίσης μια πολύ καλή αναλογία μεταξύ οπλισμένου σκυροδέματος και συνθετικών ινών. Η εμπειρία σχετικά με ίνες από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την σύνθεση υλικών που γίνονται με τη χρήση μικρών διακριτών ινών, τόσο σε μικρο- όσο και σε νανο-κλίμακα. Ένα παράδειγμα είναι, σημαντικό μέρος των ινών οπλισμένο σκυρόδεμα που περιέχει 0,5% των ινών χάλυβα, που χρησιμοποιούνται σε πραγματικές κατασκευές. Η ενίσχυση των ιδιοτήτων που προβλέπονται από παρουσία 0,5% ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα δεν διαφέρει πολύ από την ενίσχυση που παρέχεται με το 0,5% των νανοσωλήνων άνθρακα υψηλής απόδοσης. Σημειώστε ότι οι ίνες άνθρακα, παρέχουν ενίσχυση στις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Το σκυρόδεμα, ακόμη και αυτό της υψηλής ποιότητας, περιέχει τριχοειδή αγγεία και μικρο ρωγμές. Αυτό επιτρέπει το νερό να περάσει μέσα από τη δομή του. Το πέρασμα του νερού και της υγρασίας με τη μέθοδο αυτή ονομάζεται τριχοειδή απορρόφηση, σχήμα 3.4.

77

Υλικό που δεν  
ενυδατώνεται

Υλικό που  
ενυδατώνεται



Σχήμα

50 μm

### 3.4 Ενυδάτωση σκυροδέματος

Ακόμη και πυκνό σκυρόδεμα υψηλών προδιαγραφών δεν εξαλείφει την απορρόφηση του νερού μέσω τριχοειδών και την διαπερατότητά του. Το σκυρόδεμα που απορροφά την υγρασία είναι εγγενώς διαλυτό και μολύνεται από το περιβάλλον.

### 3.3.2 Σκυρόδεμα νανοκλίμακας

Η βασική έρευνα στην αλληλεπίδραση μεταξύ ιπτάμενης τέφρας και της νανοδομής του τσιμέντο Portland βρίσκεται σε εξέλιξη, σχήμα 3.5, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία σκέδασης νετρονίων.



78

Σχήμα 3.5 Το EMACO Nanocrete , σκυροδέματος την επόμενη γενιάς για κονίαμα επισκευής με εξαιρετικές ιδιότητες.

Η νανοτεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα για μια καλύτερη εξέταση της ενυδάτωσης των κόκκων του τσιμέντου και της αντιδραστικότητας της νανοδομής του τσιμέντου ως ένυδρες επιφάνειες που αναπτύσσονται στους κόκκους του. Η δυνατότητα των έξυπνων αδρανών στοιχείων ως ασύρματοι αισθητήρες μέσα στο τσιμέντο ή στο έδαφος είναι υπό εξέταση. Προβλήματα του σκυροδέματος, όπως η αντίδραση του αλκαλίου του διοξειδίου του πυριτίου (ASR) και η καθυστέρηση του σχηματισμού των

ettringite\*, που είναι η αιτία καταστροφής των αυτοκινητοδρόμων και γεφυρών, διερευνώνται σε μοριακό επίπεδο, χρησιμοποιώντας τεχνολογία νετρονίων-σκέδασης και άλλες διαδικασίες, (COE et. al., 2009).

### 3.3.3 Η αντιδραστικότητα του τσιμέντου στην νανοκλίμακα

Για την βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος είναι απαραίτητός ο καλύτερος έλεγχος του χρόνου σκυροδέτησης. Η εξέλιξη της μεταβολής του υδρογόνου δείχνει το χρονοδιάγραμμα της καταστροφής των επιφανειακών στρωμάτων του. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της διαδικασίας σκυροδέτησης ως συνάρτηση του χρόνου, της θερμοκρασίας, της χημείας του τσιμέντου, καθώς και με άλλους παράγοντες. Για παράδειγμα, ερευνητές της, National Risk Retention Association, (NRRA,2009), διαπίστωσαν ότι όταν η ενυδάτωση του τσιμέντου γίνεται στους 30°C, (COE et. al., 2009), η καταστροφή πραγματοποιείται σε 1,5 ώρα. Η επιφανειακή διάλυση στη συνέχεια εκλύει συσσωρευμένο πυριτικό άλας στη περιοχή, το οποίο αντιδρά με τα ιόντα ασβεστίου και τα κάνει να σχηματίζουν ένα ζελέ ένυδρου πυριτικού ασβεστίου, το οποίο δεσμεύει κόκκους του τσιμέντου καθώς σχηματίζεται το σκυρόδεμα. "Αυτό επιλύει μια επιστημονική συζήτηση που συνεχίζεται εδώ και περισσότερο από έναν αιώνα." Το επιφανειακό στρώμα πάχους 20 νανόμετρων ενεργεί ως ένα ημι-διαπερατό εμπόδιο που επιτρέπει στο νερό να εισέλθει στους κόκκους του τσιμέντου και στα ιόντα ασβεστίου να διαφεύγουν. Ωστόσο, τα μεγαλύτερα πυριτικά ιόντα του τσιμέντου παγιδεύονται πίσω από αυτό το στρώμα. Δεδομένου ότι η αντίδραση συνεχίζεται, ένα πυριτικό ζελέ σχηματίζεται, προκαλώντας διόγκωση του τσιμέντου.

79

### 3.3.4 Η αντιμετώπιση των πυριτικών αλκαλικών αντιδράσεων, *Alkali Silicate Reaction, ASR* στη νανοκλίμακα.

Οι πυριτικές αλκαλικές αντιδράσεις εμφανίζονται κατά την επαφή των

\***Ettringite** είναι hexacalcium αργιλικό trisulfate ένυδρο, από γενικό τύπο:  
 $(\text{CaO})_6(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SO}_3)_3 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$ ,

αλκάλιων του τσιμέντου και μιας αντιδραστικής μορφής του πυριτίου που βρίσκεται στα κυρίως αδρανή υλικά. Οι αντιδράσεις αυτές μπορεί να παράγουν ένα ζελέ αλκαλικό / πυριτικό. Εάν υπάρχει αρκετή υγρασία το ζελέ θα επεκταθεί, προκαλώντας σημαντικές ζημιές στο σκυρόδεμα. Επειδή τα ASR αποδυναμώνουν το σκυρόδεμα σε διάφορα σημεία και το καθιστούν ιδιαίτερα ευάλωτο στις εξωτερικές δυνάμεις, το φαινόμενο καλείται και «**AIDS του σκυροδέματος**». Οι χημικές και φυσικές διεργασίες που προκαλούν ζημιές ονομάζονται ζελέ ASR. Το ζελέ ASR είναι ένας μηχανισμός επέκτασης που φαίνεται να συνεπάγεται μια φάση μετασχηματισμού από άμορφο ζελέ σε πολύ επίπεδη διάρθρωση σχετικά με την ναοκλίμακα. Επομένως, η έρευνα περιλαμβάνει την εφαρμογή της σκέδασης νετρονίων και της φασματοσκοπικής εξόντωσης ποζιτρονίων για τη μέτρηση των αλλαγών στις νανο και υπο κλίμακες της μικροδομής του ζελέ σε συνάρτηση με τη χημείας του ζελέ, τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία.

### *3.3.5 Το νανοσκυρόδεμα και το διοξείδιο του άνθρακα*

80

Οι ερευνητές αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ρίχνοντας φως στην ναοδομή του τσιμέντου. Το σκυρόδεμα είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο τεχνητό υλικό, καθώς κατά την παραγωγή τσιμέντου δημιουργείται το 5 έως 10 τοις εκατό όλων των ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ένα αέριο του θερμοκηπίου που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι ερευνητές στο MIT μελέτησαν την ναοδομή του τσιμέντου και έκαναν μια ανακάλυψη που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά την παραγωγή τσιμέντου. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι τα δομικά στοιχεία των συγκεκριμένων σωματιδίων έχουν μέγεθος λίγα νανόμετρα, και ότι αυτά τα νανοσωματίδια είναι διατεταγμένα σε δύο διαφορετικούς τρόπους. Επίσης διαπιστώθηκε ότι η ρύθμιση της δομής των νανοσωματιδίων καθορίζει τις ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως η αντοχή και η ακαμψία. "Το ορυκτό του νανοσωματίδιου δεν αποτελεί το κλειδί για την επίτευξη των εν λόγω στόχων στο μέλλον, αλλά η συσκευασία των σωματιδίων," αναφέρει ο (Ulm et al., 2009), καθηγητής

μηχανολογίας στο MIT ο οποίος ηγήθηκε της εργασίας. "Έτσι δεν μπορούμε να αντικαταστήσουμε το αρχικό ορυκτό με κάτι άλλο;" Ο στόχος είναι να διατυπώσει μια αντικατάσταση του τσιμέντου που να διατηρεί την ρύθμιση της συσκευασίας των νανοσωματιδίων», αλλά μπορεί να κατασκευαστεί με χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η κατασκευή του τσιμέντου προκαλεί την εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα, διότι αφορά στην καύση των καυσίμων για τη θέρμανση του μείγματος της σκόνης του ασβεστόλιθου και του πηλού σε θερμοκρασίες έως 1.500°C. Όταν το τσιμέντο αναμειγνύεται με νερό, μια πάστα διαμορφώνεται, άμμος και χαλίκια προστίθενται στην πάστα. Αλλά οι επιστήμονες δεν κατανοούν πλήρως τη δομή του τσιμέντου, αναφέρει ο Ulm. Το μεγαλύτερο μυστήριο είναι η δομή και οι ιδιότητες των βασικών δομικών στοιχείων του τσιμέντου, της πάστας με το νερό, του ένυδρου πυριτικού ασβεστίου, το οποίο λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος, που κατέχουν από κοινού όλα τα συστατικά του σκυροδέματος. «Όλες οι μακροσκοπικές ιδιότητες του σκυροδέματος κατά κάποιο τρόπο σχετίζονται με αυτό που σε αυτή τη φάση είναι στο επίπεδο του νανομέτρου» αναφέρει ο, (Thomas, 2008), καθηγητής μηχανολογίας στο Πανεπιστήμιο Northwestern. Εάν αυτή η δομή ήταν καλύτερα κατανοητή, οι ερευνητές θα μπορούσαν τότε μηχανικά να προσαρμόσουν τις ιδιότητες του τσιμέντου και του σκυροδέματος στην νανοκλίμακα, αναφέρει ο (Hamlin, 2008) καθηγητής επιστημών στο Northwestern. Επειδή οι ερευνητές δεν γνωρίζουν τη συμπεριφορά του τσιμέντου σε νανοκλίμακα, μέχρι τώρα, "η πρόοδος στο σκυρόδεμα και στην έρευνα του τσιμέντου σε μεγάλο βαθμό έχει πληγεί," αναφέρει ο Hamlin. Ο Hamlin είχε προβλέψει ότι το ένυδρο πυριτικό ασβέστιο είναι ένα σωματίδιο με μέγεθος περίπου πέντε νανόμετρα. Ο Ulm και ο μεταδιδακτορικός ερευνητής του, George Constantinides επιβεβαίωσαν αυτή τη δομή χρησιμοποιώντας μια τεχνική που ονομάζεται νανο εσοχή (nanoindentation), (Ulm, 2004), η οποία περιλαμβάνει σχολαστικές πάστες τσιμέντου με υπέρλεπτες βελόνες διαμαντιού. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι το ασβέστιο διοργανώθηκε σε ένυδρα πυριτικά νανοσωματίδια, είτε κατά τρόπο παρόμοιο με τα πορτοκάλια που βρίσκονται στοιβαγμένα σε ένα κουτί ή σαν την πυραμιδική διεύθυνση των πορτοκαλιών σε ένα μπακάλικο. Με τα δύο



αυτά καθεστώτα, τα σωματίδια πλήρωσης, αντιστοιχούν στο 63 και 74 τοις εκατό του όγκου της πάστας του τσιμέντου, ενώ το υπόλοιπο είναι το νερού και ο αέρας. Ο σχετικός όγκος που καταλαμβάνουν τα νανοσωματίδια στον έλεγχο πάστας επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες της πάστας τσιμέντου, διαπίστωσαν οι ερευνητές. Ο Ulm και ο Constantinides σχεδιάζουν τώρα να αλλάξουν τα συστατικά του τσιμέντου. Μία ιδέα είναι η υποκατάσταση του μαγνησίου με το ασβέστιο ούτως ώστε να χρειάζεται λιγότερη θερμότητα για να γίνει το τσιμέντο, αλλά το αποτέλεσμα είναι τα νανοσωματίδια να εξακολουθούν να έχουν την ίδια διάταξη συσκευασίας όπως το πυριτικό ασβέστιο και τα ένυδρα νανοσωματίδια. Επίσης, το σχέδιο για τη μελέτη των νανοσωματιδίων επεκτείνεται μέχρι να καταλάβουν στο ατομικό επίπεδο. Αυτό θα τους δώσει ακόμα μεγαλύτερη ελευθερία στην νανο μηχανική του τσιμέντου, Ο Ulm αναφέρει, "Θα μπορούσαμε να προσθέσουμε χημικές ουσίες στο τσιμέντο, προκειμένου να βελτιωθούν οι επιδόσεις με ίσως λιγότερο τσιμέντο, ή να καταφέρουμε το ίδιο το τσιμέντο να έχει μεγαλύτερη αντοχή".

### *3.3.6 Συμπεράσματα*

Αν το τσιμέντο Portland μπορέσει να παρασκευαστεί σε μέγεθος νανοσωματιδίων, θα ανοίξει ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Για παράδειγμα, το τσιμέντο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια ανόργανη κόλλα, με την χρήση ινών άνθρακα. Επί του παρόντος, το μέγεθος των κόκκων του τσιμέντου δεν κάνει ευνοϊκή την χρήση του με τις ίνες άνθρακα που έχουν μεγέθους διαμέτρου 7 μικρόμετρα. Το τσιμέντο δεν θα είναι μόνο πιο οικονομικό από τα οργανικά πολυμερή, αλλά θα είναι επίσης και πυρίμαχο. Επιπλέον δεν θα εκπέμπει πτητικές οργανικές ενώσεις, (volatile organic compounds, VOC), και τα σύμμεικτα υλικά τους που μπορούν να συνδεθούν στο τσιμεντένιο υπόστρωμα χρησιμοποιώντας μια συμβατή κόλλα. Θα είναι επίσης πολύ ανταγωνιστική με τα τρέχουσα ανόργανα σύνθετα γιατί πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία σε υψηλή θερμοκρασία.

Ορισμένες έρευνες έχουν διεξαχθεί για την ανάπτυξη έξυπνου σκυροδέματος με την χρήση ινών άνθρακα. Αυτό θα γίνει πραγματικότητα

με το νανο-τσιμέντο επειδή οι νανο σωλήνες άνθρακα είναι πολύ πιο αποτελεσματικές από τις ίνες άνθρακα. Το πάχος του τσιμέντου μπορεί να μειωθεί σε μέγεθος μικρών και, συνεπώς, ευέλικτο και έξυπνο σύνθετο τσιμέντο μπορεί να κατασκευαστεί.

Μεγάλα ποσά κεφαλαίων και προσπάθειών χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη της τεχνολογίας νανο. Ακόμα κι αν το τσιμέντο και το σκυρόδεμα μπορεί να αποτελεί μόνο ένα μικρό μέρος αυτής της συνολικής προσπάθειας, θα μπορούσε να πληρώσει τεράστια μερίσματα στους τομείς των τεχνολογικών καινοτομιών και στα οικονομικά οφέλη. Οι τρέχουσες προσπάθειες, (COE et. al., 2009), εστιάζονται:

- Στην κατανόηση της ενυδάτωσης των σωματιδίων του τσιμέντου, και
- Του νανο μεγέθους του διοξειδίου του πυριτίου.
- Στις προσθήκες με σούπερ πλαστικοποιητές και
- Στους αισθητήρες.

Η ανάπτυξη του νανο-τσιμέντου μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη ανάπτυξη τις τεχνολογίες του σκυροδέματος και του κλάδου των κατασκευών.

### **3.4 Νανοτεχνολογία και γυαλί**

Η ευρωπαϊκή αγορά τοποθέτησης υαλοπινάκων, που αντιπροσωπεύει το 45% της παγκόσμιας αγοράς, έφθασε σε έναν όγκο 80.000 μονάδων το 2001, και σε έναν όγκο πωλήσεων €18bn. Η τρέχουσα κατάσταση της προόδου στην επένδυση είναι ένα ενεργό σύστημα που ακολουθεί τον ήλιο, τον αέρα και τη βροχή προκειμένου να ελεγχθεί το περιβάλλον οικοδόμησης και να συμβάλει στην ικανότητα υποστήριξης, αλλά αυτό είναι αναξιόπιστο και δύσκολο να διατηρηθεί. Συνεπώς, υπάρχει πολλή έρευνα που διεξάγεται για την εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στο γυαλί και μερικές από τις πιο ελπιδοφόρες περιοχές που περιγράφονται πιο κάτω καθώς επίσης και μερικά προϊόντα που είναι ήδη διαθέσιμα, (NanoForum, 2006).

1. Το διοξείδιο του τιτανίου ( $TiO_2$ ) χρησιμοποιείται με μορφή νανο σωματιδίων για την επένδυση των υαλοπινάκων δεδομένου ότι έχει τις αποστειρωτικές και αντιρρυπαντικές ιδιότητες. Τα μόρια καταλύουν τις ισχυρές αντιδράσεις με οργανικούς ρύπους τις

πτητικές οργανικές ενώσεις και τις βακτηριακές μεμβράνες. Επιπλέον, το  $TiO_2$  είναι υδρόφιλο και αυτή η έλξη στο νερό διαμορφώνει τα φύλλα από τις πτώσεις βροχής που πλένουν έπειτα από τα μόρια ρύπου που χωρίζονται στην προηγούμενη διαδικασία. Το γυαλί που ενσωματώνει αυτήν την τεχνολογία καθαρισμού είναι διαθέσιμο στην αγορά σήμερα.

2. Το προστατευτικό έναντι της πυρκαγιάς γυαλί είναι μια άλλη εφαρμογή της нанοτεχνολογίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση ενός σαφούς μονωτικού στρώματος διοξειδίου του πυριτίου ( $SiO_2$ ), (ένα ενδιάμεσο στρώμα νανο σωματιδίου), που στριμώνεται μεταξύ των στρωμάτων γυαλιού και μετατρέπεται σε άκαμπτη και αδιαφανή ασπίδα πυρκαγιάς όταν θερμαίνεται.
3. Το μεγαλύτερο μέρος του γυαλιού στην οικοδόμηση είναι, φυσικά, στην εξωτερική επιφάνεια των κτηρίων για τον έλεγχο του φωτός και της θερμότητας που εισάγεται μέσω της οικοδόμησης. Η τοποθέτηση των υαλοπινάκων είναι ένα σημαντικό ζήτημα αυτής της ικανότητας. Η έρευνα στις нанοτεχνολογικές λύσεις για αυτό οριοθετούν περίπου τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές για να εμποδίσουν το φως και τη θερμότητα που μπαίνουν μέσω των παραθύρων.
4. Αρχικά, τα επιστρώματα λεπτών ταινιών αναπτύσσονται όπου έχουμε ευαίσθητες εφαρμογές επιφάνειας για το γυαλί παραθύρων. Αυτοί έχουν τη δυνατότητα να φιλτράρουν και να αποκλείσουν έξω τις ανεπιθύμητες υπέρυθρες συχνότητες του φωτός (που θερμαίνουν επάνω ένα δωμάτιο) και να μειώσουν το κέρδος θερμότητας στα κτήρια, εντούτοις, αυτά είναι αποτελεσματικά μόνο ως παθητική λύση, σήμα 3.6.
5. Σαν ενεργό λύση, οι θερμοχρωμικές τεχνολογίες μελετώνται ώστε να αντιδρούν στη θερμοκρασία και να παρέχουν θερμική μόνωση για να δώσουν την προστασία από τη θέρμανση ταυτόχρονα διατηρώντας τον επαρκή φωτισμό.



**Σχήμα 3.6** Αναστρέψιμη μετατροπή μιας χημικής ουσίας μεταξύ δύο μορφών απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπου οι δύο μορφές έχουν διαφορετικά φάσματα απορρόφησης τα νανοσωματίδια.  $WO_3$  (οξειδίο του βολφραμίου) μπορούν να αναστρέψουν τις οπτικές ιδιότητες με την εφαρμογή μιας εξωτερικής τάσης, (Bakker, 2008)

85

6. Μια τρίτη στρατηγική, που παράγει μια παρόμοια έκβαση με μια διαφορετική διαδικασία, περιλαμβάνει τις φωτοχρωμικές τεχνολογίες που μελετώνται για να αντιδράσουν στις αλλαγές στην ελαφριά ένταση από την αυξανόμενη απορρόφηση.
7. Και τελικά, τα ηλεκτροχρωμικά επιστρώματα που αναπτύσσονται και αντιδρούν στις αλλαγές μιας εφαρμοσμένης ηλεκτρικής τάσης με τη χρησιμοποίηση ενός στρώματος οξειδίων βολφραμίου. Με αυτόν τον τρόπο γίνονται πιο αδιαφανής με την αφή ενός κουμπιού, σχήμα 3.7.

Όλες αυτές οι εφαρμογές προορίζονται να μειώσουν την ενεργειακή χρήση στην ψύξη των κτηρίων και θα μπορούσαν να συμβάλουν σε μια σημαντική μείωση στα τεράστια ποσά που χρησιμοποιούνται στο χτισμένο περιβάλλον.



Φωτοχρωματικό  
γυαλί: η  
διαπερατότητα αυτού  
του γυαλιού ελέγχεται  
από την τάση - για τον  
κλιματισμό γραφείων  
στο μέλλον.

**Σχήμα 3.7** Φωτοχρωματικό γυαλί που ελέγχεται από τάση.

### **3.5 Νανοτεχνολογία και Ξύλο**

Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι μια νέα ανακάλυψη, ενώ το ξύλο είναι ένα αρχαίο υλικό το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί από την αυγή του πολιτισμού. Ωστόσο, ίσως δεν αποτελεί έκπληξη το δεδομένο ότι στην εξελικτική διαδικασία της φύσης, το ξύλο αποτελείται επίσης από νανοσωλήνες ή νανο-ινίδια, (nanofibrils), δηλαδή, λιγνοκυτταρινική, (lignocellulosic), (ξυλώδης ιστός), στοιχείο που είναι δύο φορές πιο ισχυρό από τον χάλυβα. Συλλέγοντας αυτά τα νανο-ινίδια θα οδηγούσε σε ένα νέο πρότυπο για αειφόρο δόμηση καθώς τόσο η παραγωγή όσο και η χρήση θα είναι μέρος ενός ανανεώσιμου κύκλου. Ορισμένοι προγραμματιστές έχουν σκεφτεί ότι η λειτουργικότητα του κτιρίου με λιγνοκυτταρινικές επιφάνειες στη νανοκλίμακα θα μπορούσε να ανοίξει νέες ευκαιρίες όπως οι αυτό-αποστειρούμενες επιφάνειες, η εσωτερική αυτο-επιδιόρθωση, και η κατασκευή των ηλεκτρονικών λιγνοκυτταρινικών συσκευών. Αυτές οι μη ενεργητικής ή παθητικής νανοκλίμακας αισθητήρες θα παράσχουν πληροφορίες σχετικά με τις επιδόσεις του προϊόντος και τις περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της υπηρεσίας από την παρακολούθηση των διαρθρωτικών φορτίων, τις θερμοκρασίες, την υγρασία, τους μύκητες αποσύνθεση, θερμικές απώλειες ή τα κέρδη, και την απώλεια του κλιματισμού. Επί του παρόντος, ωστόσο, η έρευνα στους τομείς αυτούς εμφανίζεται περιορισμένη. Λόγω της φυσικής ύπαρξης του,

το ξύλο είναι πρωτοπόρος στην διεπιστημονική έρευνα και τεχνικών μοντελοποίησης που έχουν ήδη αποφέρει καρπούς σε δύο τουλάχιστον τομείς, (Moon et. al., 2006). Πρώτον, η BASF έχει αναπτύξει μια πολύ αδιάβροχη επίστρωση που βασίζεται στις ενέργειες του φύλλου του λωτού ως αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης του πυριτίου και των νανοσωματιδίων αλουμίνας και υδρόφοβων πολυμερών. Και, Δεύτερον, οι μηχανικές μελέτες των οστών έχουν προσαρμοστεί με το μοντέλο από ξύλο, για παράδειγμα στην διαδικασία ξήρανσης. Με την ευρύτερη έννοια, η νανοτεχνολογία αντιπροσωπεύει μια σημαντική ευκαιρία για τη βιομηχανία ξύλου για την ανάπτυξη νέων προϊόντων, και για να μειώσει σημαντικά το κόστος επεξεργασίας, θα ανοίξει δε νέες αγορές για βιολογικά καθοριζόμενα, (Biobased), υλικά. Στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ξύλου που το κατέστησε μια μοναδική και ενδιαφέρουσα ύλη για τη νανοτεχνολογία περιλαμβάνονται, (Wegner, 2005) τα ακόλουθα:

1. Το ξύλο είναι ένα από τα πιο άφθονη και πανταχού παρούσα βιολογικές πρώτες ύλες.
2. Το ξύλο έχει μια νανο-ινώδη κυψελοειδή αρχιτεκτονική που βασίζεται στην κυτταρίνη των νανοϊνών.
3. Το ξύλο είναι αυτό-συναρμολογούμενο μέσω της ελεγχόμενης και επαναλαμβανόμενης βιο-ελεγχόμενης διεργασίας σύνθεσης από το επίπεδο νανοκλίμακας στο επίπεδο μακροχωροθέτησης.
4. Η λιγνοκυτταρίνη ως νανοϋλικό και οι αλληλεπιδράσεις της με άλλα νανοϋλικά είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητη.
5. Το ξύλο έχει την ικανότητα να γίνει πολύ-λειτουργικό και
6. Το ξύλο αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο για την προώθηση της βιομάζας με βάση τις ανανεώσιμες πηγές και την αειφόρο οικονομία.

Επιπλέον, τα υλικά με βάση το ξύλο μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν.

Η Χρησιμοποίηση της νανοτεχνολογίας στα υλικά με βάση το ξύλο θα μπορούσε να οδηγήσει στο μέλλον σε πέρα από κάθε φαντασία ευκαιρίες ανάπτυξης για τα βιολογικά προϊόντα. Η νανοτεχνολογία θα οδηγήσει σε μια μοναδική επόμενη γενιά βιολογικών προϊόντων που θα έχουν υπέρ-απόδοση και αυτό-συντήρηση. Τα προϊόντα αυτά θα έχουν ιδιότητες

αντοχής που τώρα μπορεί κανείς δει μόνο στα σύνθετα υλικά με βάση τον άνθρακα. Αυτά τα νέα Βιολογικά προϊόντα με τις βελτιωμένες ιδιότητες, θα είναι σε θέση να αντέχουν σε περιβάλλοντα με πολύ υγρασία. Βελτιώσεις για τις υφιστάμενες χρήσεις θα περιλαμβάνουν την ανάπτυξη χωρίς ρητίνης των βιο-σύνθετων ή ξύλο-πλαστικών ενισχυμένων σύνθετων υλικών σε αντοχής και λειτουργικότητα, λόγω της νανο-ενισχυμένης ίνας και χρησιμοποίησής της έως πλαστικό συγκόλλησης. Η νανοτεχνολογία θα επιτρέψει την ανάπτυξη των ευφυών ξύλων και των βιο-σύνθετων προϊόντων με μια σειρά από νανο-αισθητήρες για την μετρήσει τις δυνάμεις, των φορτίων, του επίπεδου υγρασίας, της θερμοκρασία, την πίεση, και των εκπομπών χημικών προϊόντων. Η νανοτεχνολογία μπορεί επίσης να αναπτυχθεί στην ανίχνευση προειδοποίησης για επιθέσεις στο ξύλο από μύκητες και τερμίτες που το καταστρέφουν. Η κατασκευή κτιρίων που φέρουν λιγνοκυτταρινικές επιφάνειες στη ναοκλίμακα θα μπορούσε να ανοίξει νέες ευκαιρίες για πράγματα όπως αυτό-αποστείρωσης επιφανειών, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και των ηλεκτρονικών συσκευών με λιγνοκυτταρινική. Η μεγάλη δύναμη της κυτταρίνης προσφέρει την ευκαιρία για ελαφρύτερα, ισχυρότερα υλικά με μεγαλύτερη αντοχή. Αυτά τα νέα υλικά θα έχουν μεγάλες επιπτώσεις στην χρήση του ξύλου σε όλες τις φάσεις της κατασκευής, βοηθώντας το ξύλο και υλικά με βάση αυτό στην αντιμετώπιση των υφιστάμενων ελλείψεων.

Νέα προϊόντα νανοτεχνολογίας -που είναι διασπορές πολυμερών-αδιαβροχοποιούν τις ξύλινες επιφάνειες διεισδύοντας βαθιά στους πόρους των επιφανειών και επιτυγχάνουν χημική τροποποίηση αντιδρώντας με τα δομικά συστατικά (κυτταρίνη, λιγνίνη, ημικυτταρίνες), καθώς και επικαλύπτοντας τα μικροϊνίδια του ξύλου, (Moon et. al., 2006) Έτσι, βελτιώνονται τόσο οι μηχανικές ιδιότητες, όσο κυρίως η διαστασιακή σταθερότητα (βλ. ρίκνωση-διόγκωση) του ξύλου. Κατά συνέπεια, τα απείρως μικρά νανοσωματίδια «ντύνουν» την πολύ μεγάλη εσωτερική επιφάνεια του ξύλου εξασφαλίζοντας την απώθηση του νερού, σχήμα 3.8, ή την απομάκρυνση παραγόντων διάβρωσης με χημικές δυνάμεις. Έτσι επιτυγχάνεται σημαντική προστασία του ξύλου. Η προστασία αυτή φαίνεται ότι δεν επηρεάζεται από τριβή, μηχανική καταπόνηση, ηλιακή επίδραση ή άλλη φθορά.



**Σχήμα 3.8** Nano-προστασία του ξύλου, (Moon et. al., 2006).

Επίσης, εξασφαλίζει και βελτιωμένη αντοχή στη γήρανση, δηλ. με απλά λόγια εξασφαλίζεται μεγάλη αντοχή (φυσική διάρκεια) στο χρόνο, που μπορεί να φτάσει και τα 10 χρόνια. Για τις κλιματικές συνθήκες της χώρας μας - οι οποίες είναι «πολύ δύσκολες» για το ξύλο - φαίνεται ότι η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία δεν επηρεάζει την εν λόγω προστασία, ούτε προκαλεί μεταχρωματισμούς (π.χ. κίτρινο χρώμα). Τα σκευάσματα αυτά δεν δημιουργούν φιλμ (coating) στην επιφάνεια και συνεπώς δεν αλλοιώνουν την όλη εμφάνιση των επιφανειών, ωστόσο, σε παρατηρήσεις ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σε μακρομοριακό επίπεδο έχουν καταγραφεί μεταβολές στην αρχιτεκτονική υποδομή (μικροδομή) του ξύλου.

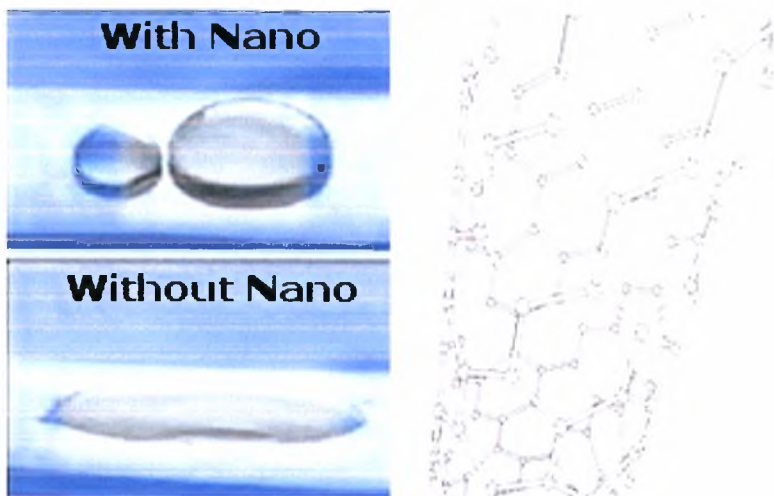
89

### **3.6 Νανοτεχνολογία και Επικαλύψεις**

Τα επιχρίσματα είναι μια περιοχή σημαντικής έρευνας στη нанοτεχνολογία και διεξάγονται εργασίες πάνω στο σκυρόδεμα και στο γυαλί, καθώς και στο χάλυβα. Μεγάλο μέρος των εργασιών συνεπάγεται Χημική Εναπόθεση ατμού (CVD). Η επικάλυψη έχει σκοπό την παραγωγή ενός στρώματος το οποίο είναι κατάλληλο υλικό βάσης για την παραγωγή μιας επιφάνειας με τις επιθυμητές προστατευτικές ή λειτουργικές ιδιότητες. Έρευνα διεξάγεται μέσω του πειράματος και της μοντελοποίησης επιχρισμάτων και ο ένας από τους στόχους είναι η ανάπτυξη δυνατοτήτων επούλωσης μέσω μιας διαδικασίας «αυτό-συναρμολόγησης». Η нанοτεχνολογία εφαρμόζεται στα



χρώματα και αποκτούν μονωτικές ιδιότητες, όταν παράγονται με την προσθήκη κύτταρων νανο-μεγέθους στους πόρους και τα σωματίδια, δίνοντας πολύ περιορισμένες διαδρομές για θερμική αγωγιμότητα (οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας,  $R$ , είναι διπλάσιες από αυτές για μονωτικού αφρού που είναι σήμερα διαθέσιμος). Αυτό το είδος της βαφής είναι που χρησιμοποιείται, προς το παρόν, για την προστασία κατά της διάβρωσης αφού είναι υδρόφοβο και απωθεί το νερό από το μεταλλικό σωλήνα και μπορεί επίσης να προστατεύει το μέταλλο από το αλμυρό νερό, σχήμα 3.9. Επίσης, υπάρχουν και πιθανές χρήσεις στην πέτρα με βάση τα ίδια υλικά. Σε αυτά τα υλικά είναι συνήθης η χρήση ρητινών για σκοπούς ενίσχυσης προκειμένου να αποφεύγονται τα προβλήματα θραύσης, ωστόσο, αυτές οι θεραπείες με ρητίνη μπορεί να επηρεάσουν την αισθητική και την πρόσφυση στα υποστρώματα.



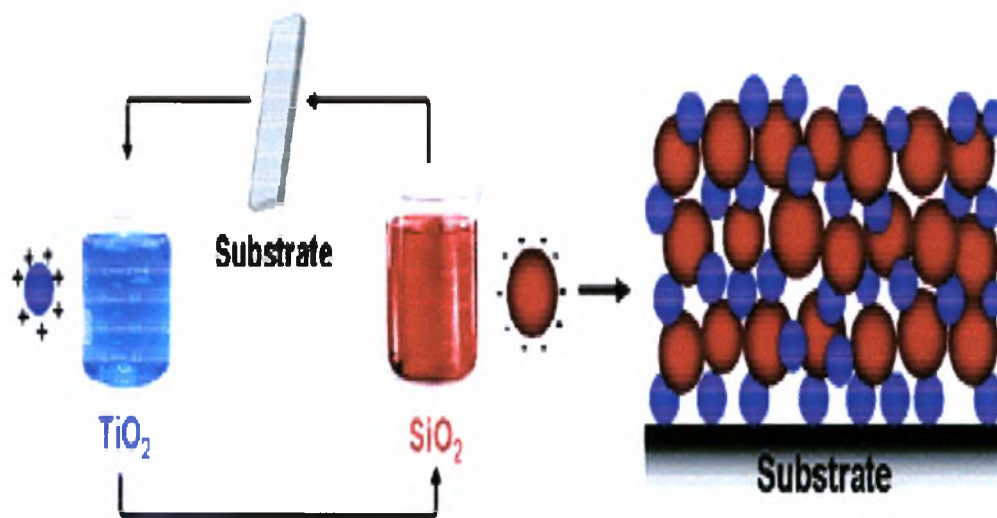
**Σχήμα 3.9** Νανο επίστρωση υδρόφοβη

Με βάση τα συστήματα νανოსωματιδίων μπορεί να δημιουργηθεί καλύτερη πρόσφυση και διαφάνεια σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές. Εκτός από την επίστρωση αυτο-καθαρισμού που αναφέρεται ανωτέρω για τους υαλοπίνακες, οι αξιόλογες ιδιότητες των νανοςωματιδίων  $TiO_2$  οι οποίες υπάρχουν σήμερα σε χρήση ως υλικό επίστρωσης για δρόμους δοκιμάζονται σε εφαρμογές σε όλο τον κόσμο.

Το  $TiO_2$  ως επίστρωσης συλλαμβάνει και διασπά οργανικούς και ανόργανους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Σε μια φωτοκαταλυτική διαδικασία

(επίστρωση του δρόμου 7000m<sup>2</sup> στο Μιλάνο έδωσε μια μείωση κατά 60% οξειδίων του αζώτου). Η έρευνα αυτή ανοίγει μια ενδιαφέρουσα δυνατότητα θέτοντας δρόμους για καλή περιβαλλοντική χρήση, (NanoForum, 2006).

Όλα τα επιχρίσματα νανοσωματιδίων λεπτών φιλμ έχουν αυτοκαθαριζόμενες ιδιότητες έχουν κατασκευαστεί με απόθεση σε στρώματα νανοσωματιδίων του TiO<sub>2</sub> και του SiO<sub>2</sub>, σχήμα 3.10. Το πορώδες και η χημική σύσταση των επικαλύψεων προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας μια απλή μέθοδος που βασίζεται στη Ελλειφομετρία και δεν απαιτεί οποιεσδήποτε υποθέσεις σχετικά με το δείκτη διάθλασης του στοιχείου νανοσωματιδίων.



91

**Σχήμα 3.10** Απόθεση σε στρώματα νανοσωματιδίων του TiO<sub>2</sub> και του SiO<sub>2</sub> για την κατασκευή λεπτών αυτό-καθοριζόμενων φιλμ.

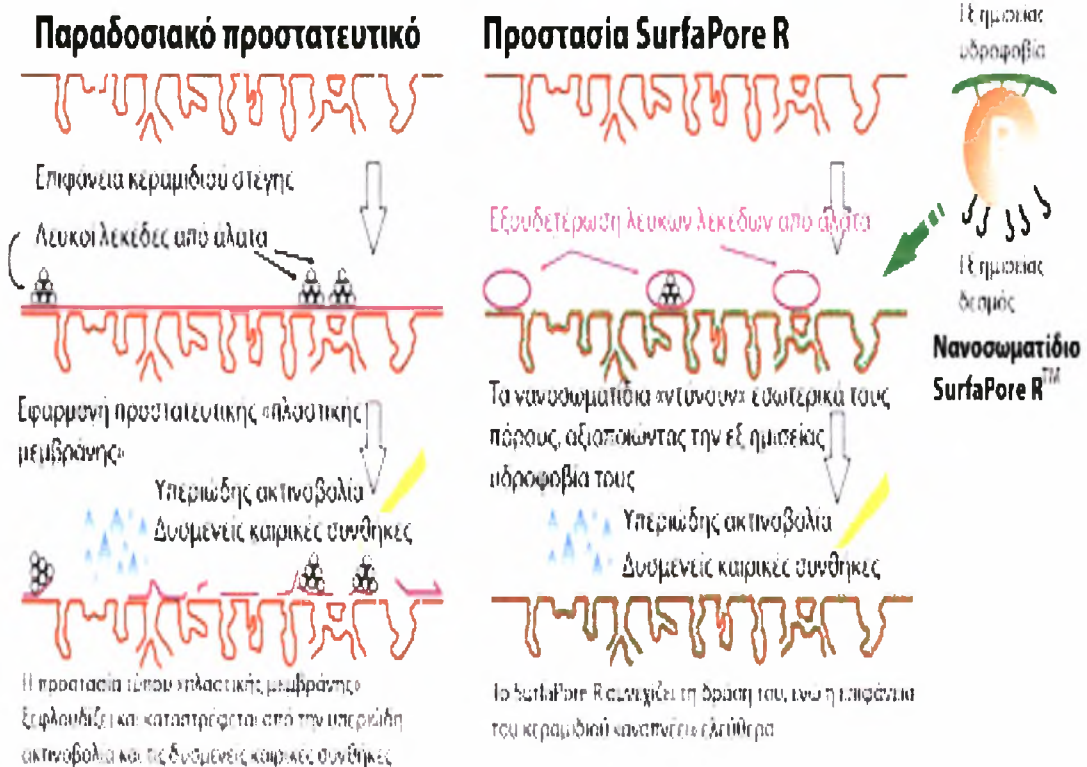
Η παρουσία των νανο-πόρων στα νανοσωματίδια του TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> έχει σαν αποτελέσματα οι επιστρώσεις να έχουν υψηλή υδροφιλικότητα καθώς και οι ιδιότητές μη ανακλάστηκες. Η υψηλή υδροφιλικότητα των μολυσμένων επιχρισμάτων θα μπορούσε εύκολα να ανακτηθεί και να διατηρηθεί με την υπεριώδη ακτινοβολία.

Υπάρχει μια σειρά «έξυπνων» υλικών με πρωτοποριακές δυνατότητες, που αξιοποιούν τη δύναμη της нанοτεχνολογίας. Τι κάνουν; Μετατρέπουν τις απλές κεραμικές ή γυάλινες επιφάνειες σε αυτοκαθαριζόμενες και αυτοαποστειρούμενες μόνο με τη βοήθεια του ηλιακού φωτός και

προστατεύουν κάθε λογής οικοδομικά υλικά (τσιμέντο, χάλυβα, πέτρα, μάρμαρο, κεραμίδι, αλλά και ξύλο) από το νερό κι όλες τις γνωστές αρνητικές επιπτώσεις από τη δράση του.

Τα νανοϋλικά απωθούν το νερό -που περιορίζεται να σχηματίσει «μπτίλιες», σχήμα 3.11 στην επιφάνειά των παραπάνω υλικών και βαθμιαία να εξατμιστεί- χωρίς να επηρεάζουν τη φυσική εμφάνιση τους.

Νεότερα νανοϋλικά εμφανίζουν αντιδιαβρωτικές ιδιότητες στις επικαλύψεις για μεταλλικές επιφάνειες, με κύρια εφαρμογή στο χώρο της ναυτιλίας, αλλά και οι επικαλύψεις anti-graffiti, που ίσως μπορέσουν τελικά να δώσουν λύση στο τεράστιο πρόβλημα των βανδαλισμών από τους «καλλιτέχνες» του σπρέι, σχήμα 3.12.



Τρόπος δράσης των νανοσωματιδίων της σειράς SurfaPore R

Σχήμα 3.11 Εφαρμογή υδρόφοβου νανοϋλικού



Μέσα σε 24 ώρες, το μελάνι που έχει λεκιάσει ένα λευκό τπλακάκι αρχίζει να διασπάται και να «σβήνει». Το ειδικό νανουλικό, το οποίο σχηματίζει ένα λεπτό υμένιο στην επιφάνειά του, έχει ήδη ξεκινήσει την αυτο-καθαριστική και την αυτό-αποστειρωτική δράση του, με τη βοήθεια του φωτός, χωρίς τη χρεία άλλων χημικών ουσιών.

93

### **Σχήμα 3.12** Νανο-επικαλύψεις για anti-graffiti

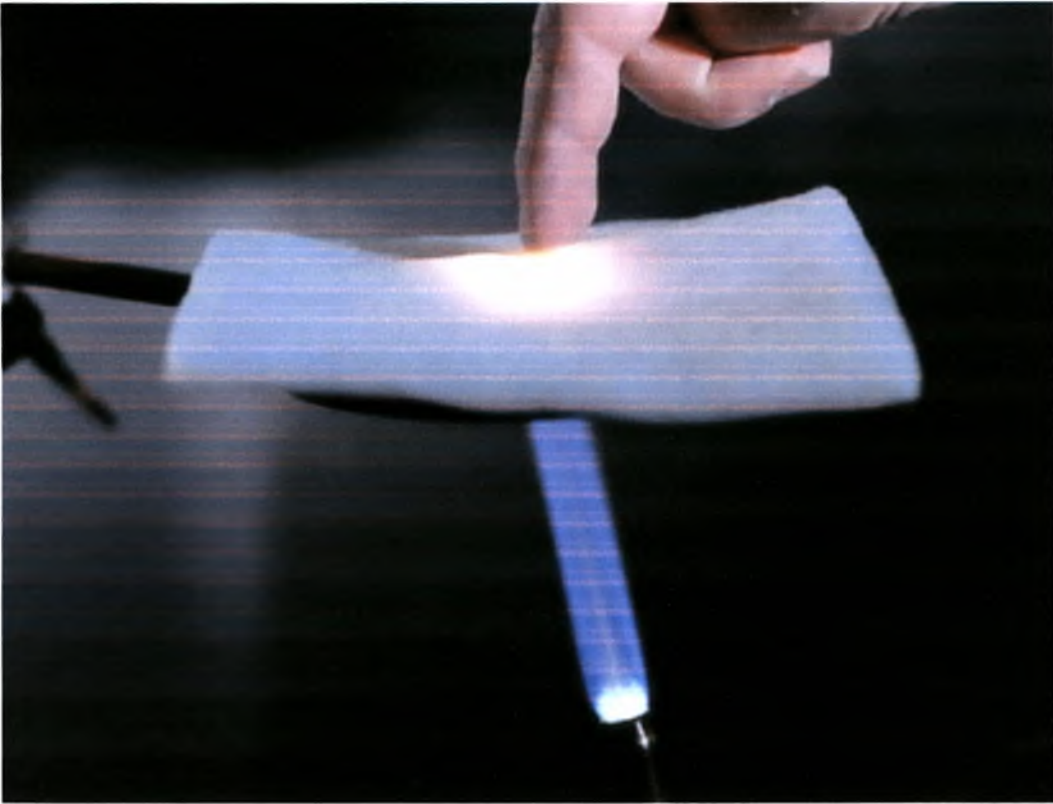
## **3.7 Νανοτεχνολογία και Πυροπροστασία**

Η αντίσταση στη φωτιά των κατασκευών από χάλυβα παρέχεται συχνά από μια επίστρωση που παράγεται με ψεκασμός με ένα τσιμεντοειδές. Τα συνηθισμένα επιχρίσματα που βασίζονται στο τσιμέντο portland δεν είναι δημοφιλή, επειδή πρέπει να είναι παχιά, τείνουν να είναι εύθραυστα και οι προσθήκες πολυμερών είναι απαραίτητες για τη βελτίωση της πρόσφυσης. Ωστόσο, η έρευνα στο νανο-τσιμέντο (από νανο-ταξινομημένα μόρια) έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα νέο πρότυπο σε αυτόν τον τομέα εφαρμογής, διότι το παραγόμενο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σκληρό, ανθεκτικό και κατάλληλο για επίστρωση για υψηλές θερμοκρασίες. σχήμα 3.13 Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάμειξη νανοσωλήνων άνθρακα (CNT), με τσιμεντένιο υλικό για την κατασκευή ινών από σύνθετα υλικά που μπορεί να κληρονομήσουν ορισμένες ωφέλιμες ιδιότητες των

νανοσωλήνων όπως η ισχύς των ινών πολυπροπυλενίου, (Zhi and Zhili, 2008).

Επίσης, εξετάζονται ως μέθοδος αύξησης της αντίστασης στη φωτιά και αυτό είναι μια φθηνότερη επιλογή από τις συμβατικές μονώσεις. Η χρήση των επεξεργαστών στα συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς που είναι χτισμένα μέσα σε κάθε ανιχνευτή είναι αρκετά καλά εδραιωμένα σήμερα. Αυτές βελτιώνουν την αξιοπιστία με την καλύτερη προσβασιμότητα και την ικανότητα για τον εντοπισμό ψευδών συναγερμών. Η χρήση της νανοτεχνολογίας στο μέλλον μέσω της ανάπτυξης των νανοηλεκτρομηχανικών συστημάτων, Nanoelectromechanical systems, (NEMs), θα μπορούσε να δει ολόκληρο το κτίριο να γίνεται ένα δίκτυο ανιχνευτών, καθώς οι συσκευές αυτές ενσωματώνονται σε στοιχεία ή επιφάνειες, (NanoForum, 2006).

Η πυροπροστασία για ξύλο με διάφορα προϊόντα είναι μια προστατευτική επικάλυψη για το σχετικό υλικό σε περίπτωση πυρκαγιάς – που βασίζεται σχεδόν στη φύση, έχοντας ως κύριο συστατικό το νερό – δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο επάνω του ένα μονωτικό στρώμα. Το προστατευόμενο υλικό μπορεί να αποτελείται εντελώς από ξύλο, τάβλες από μελαμίνη ή καπλαντισμένο κόντρα-πλακέ για στεγνούς εσωτερικούς χώρους. Το προϊόν αυτό για την πυροπροστασία του ξύλου είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον (άοσμο και δεν περιέχει αλογόνα, βαρέα μέταλλα ή διαλυτικά μέσα). Μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα (βαφή με πινέλο, ρολό ή ψεκαστήρα) και εντελώς διαφανές. Το προϊόν για πυροπροστασία ξύλου περιέχει, ως κύριο συστατικό, έναν υδρογονάνθρακα από άμυλο αραβοσίτου ή πατάτας. Το προστατευτικό στρώμα που θα δημιουργηθεί, αναπτύσσει – σε περίπτωση φωτιάς και εκπεμπόμενης θερμότητας – αέρια που δεν καίγονται (με αμελητέα παραγωγή καπνού). Προστατεύει έτσι το ξύλο από την επίδραση της φωτιάς, σχηματίζοντας ένα μονωτικό αφρώδες στρώμα, κατά της θερμότητας, από άνθρακα,.



**Σχήμα 3.13** Νανο-πορώδες μονωτική κουβέρτες: Πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Πυρίτιο αεροζέλ με νανοσωματίδια σε συνδυασμό με ενίσχυση ινών, (Bakker, 2008).

## ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

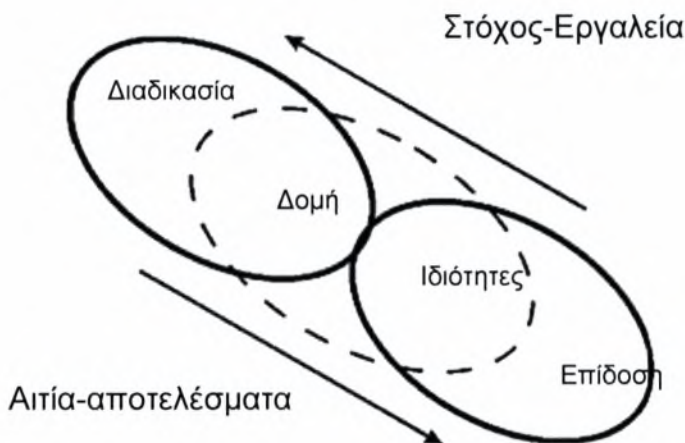
### 4.1 Μέθοδοι Σχεδιασμού Υλικών Πολλαπλών διαστάσεων.

Οι νέες τεχνολογικές εξελίξεις οδήγησαν σε μια σειρά προηγμένων υλικών, συμπεριλαμβανομένων σύνθετων υλικών όπως δέσμες με νανοϊνες, μικροδομημένα και πολυστρωματικά υλικά. Το φάσμα των εφαρμογών για αυτό το είδος της βελτιστοποίησης των υλικών είναι εξαιρετικά ευρύ, και υπόσχεται νέα υλικά για χρήσεις σε ελαφριά οχήματα, στρατιωτικές θωρακίσεις, στην σύντηξη, στην αποθήκευση του υδρογόνου και σχεδόν σε κάθε εφαρμογή που απαιτεί υλικά που να λειτουργούν κάτω από ακραίες συνθήκες. Σχεδιάζοντας την εσωτερική δομή των υλικών έξυπνα, μπορούμε να ελπίζουμε για τη δημιουργία νέων υλικών με επιθυμητούς συνδυασμούς ιδιοτήτων όπως η αντοχή, η σκληρότητα και η πυκνότητα. Η δυνατότητα για την επίτευξη αυτού του στόχου θα απαιτήσει νέες υπολογιστικές μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν με ακρίβεια την μακροχωροθέτηση των ιδιοτήτων, με βάση την εσωτερική δομή του υλικού και των πολύ μικρών νανοδομών.

Έτσι, το επίκεντρο της παραγράφου αυτής είναι να παρουσιάσει εφαρμογές των ιεραρχικών συστατικών μοντέλων πολλαπλών κλιμάκων και υπολογιστικών μεθόδων, σε προβλήματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στο σχεδιασμό και στη μοντελοποίηση των υλικών. Ιεραρχικά μοντέλα είναι εκείνα στα οποία τα συστατικά τους ανταποκρίνονται σε πολύ μικρές κλίμακες μήκους και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για τα προβλήματα συντοριακών τιμών σε μεγαλύτερες κλίμακες μήκους. Η είσοδος γίνεται συνήθως με τη μορφή μιας αρχικής κατάστασης, με μια συστατική παράμετρο ή οριακή συνθήκη. Τα ιεραρχικά μοντέλα είχαν επιτυχία για ορισμένους λόγους. Ο ένας είναι η ικανότητά τους να ενσωματώσουν τις κλίμακες μήκους του υλικού στα ομογενοποιημένα μοντέλα, αυτό μπορεί, για παράδειγμα, να παρέχει δυνατότητα ρύθμισης στις αριθμητικές εφαρμογές. Γενικότερα, τα ιεραρχικά μοντέλα προσφέρουν ένα φυσικό τρόπο για την ενσωμάτωση μικρής κλίμακας φυσικής ύλης, στην συμπεριφορά μεγάλης κλίμακας, τέτοια που η σύζευξη

των συστατικών να πραγματοποιείται μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων μήκους. Αυτή η σύζευξη παρέχει τη δυνατότητα να προσδιορίζονται, κατά μέσο όρο, τα αποτελέσματα των παραμέτρων και των ιδιοτήτων των υλικών σε πολλές κλίμακες μήκους, και καλύπτει μια κρίσιμη ανάγκη για το σχεδιασμό και την ανάλυση των υλικών, (Wing Kam Liu et al, 2006).

Η σχέση μεταξύ της μικροδομής και των ιδιοτήτων των υλικών είναι το κλειδί για την βελτιστοποίηση και τον σχεδιασμό ελαφριών, ισχυρών και σκληρών υλικών. Οι Ιδιότητες των υλικών είναι εγγενώς μια συνάρτηση σε σχέση με την μικροσκοπική αλληλεπίδραση κάθε ξεχωριστής κλίμακας παραμόρφωσης σε όλο το υλικό. Επί του παρόντος, οι ερευνητές στηρίζονται σε εμπειρικά δεδομένα για τον καθορισμό των ιδιοτήτων της κατασκευής στην αλυσίδα σχεδιασμού του υλικού Ένα μοντέλο που προτείνεται εδώ είναι αυτό, με το οποίο το υλικό αποσυντίθεται με φυσικούς και μαθηματικούς τρόπους σε κάθε κλίμακα ενδιαφέροντος.



**Σχήμα 4.1** Μια γενική τεχνική για τον καθορισμό των ιδιοτήτων μιας σύνθετης δομής υλικού, (Wing Kam Liu et al, 2006).

Η παραμόρφωση του υλικού μπορεί στη συνέχεια να υπολογισθεί σε κάθε μία από αυτές τις κλίμακες. Η συμπεριφορά του συστατικού σε κάθε επίπεδο μπορεί επίσης να προσδιορίζεται αναλυτικά ή υπολογιστικά με την εξέταση της μικρομηχανικής σε κάθε κλίμακα..

Το σχήμα 4.1 παρουσιάζει την ζωή ενός συστατικού από την αρχική επεξεργασία των πρώτων υλών, με αποτέλεσμα την μικροδομή του υλικού, τις παραγόμενες ιδιότητες και τις τελικές επιδόσεις του προϊόντος. Οι



επιστήμονες των υλικών εστιάζουν την προσοχή τους στη σχέση μεταξύ της επεξεργασίας και των αποτελεσμάτων στην μικροδομή. Οι εξειδικευμένες τεχνικές απεικόνισης, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν την μικροδομή. Κατά τη διάρκεια των ετών, οι σχεδιαστές έχουν αποκτήσει πολύ μεγάλα ποσά πειραματικών δεδομένων που αφορούν την επεξεργασία των παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία επεξεργασίας και ο ρυθμός παραμόρφωσης, στην τελική μικροδομή. Διαγράμματα μεταποίησης και εμπειριστικά μαθηματικά μοντέλα είναι ευρέως διαθέσιμα. Συνεπώς, είναι δυνατόν να σχεδιαστεί μια μικροδομή με τον έλεγχο των παραμέτρων μεταποίησης.

Η σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων και της απόδοσης είναι επίσης κατανοητή. Οι μηχανικοί είναι αυτοί που σχεδιάζουν και επιλέγουν τα υλικά με βάση τις απαιτούμενες επιδόσεις. Τα υλικά επιλέγονται ανάλογα με τις μηχανικές τους ιδιότητες όπως η πυκνότητά τους, η χημική αντοχή και άλλα χρήσιμα φυσικά χαρακτηριστικά. Η καταλληλότητα ενός υλικού για συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να προσδιορίζεται άμεσα με τη χρήση χαρτών σχεδιασμού ή υπολογισμού μέσω αριθμητικών τεχνικών όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

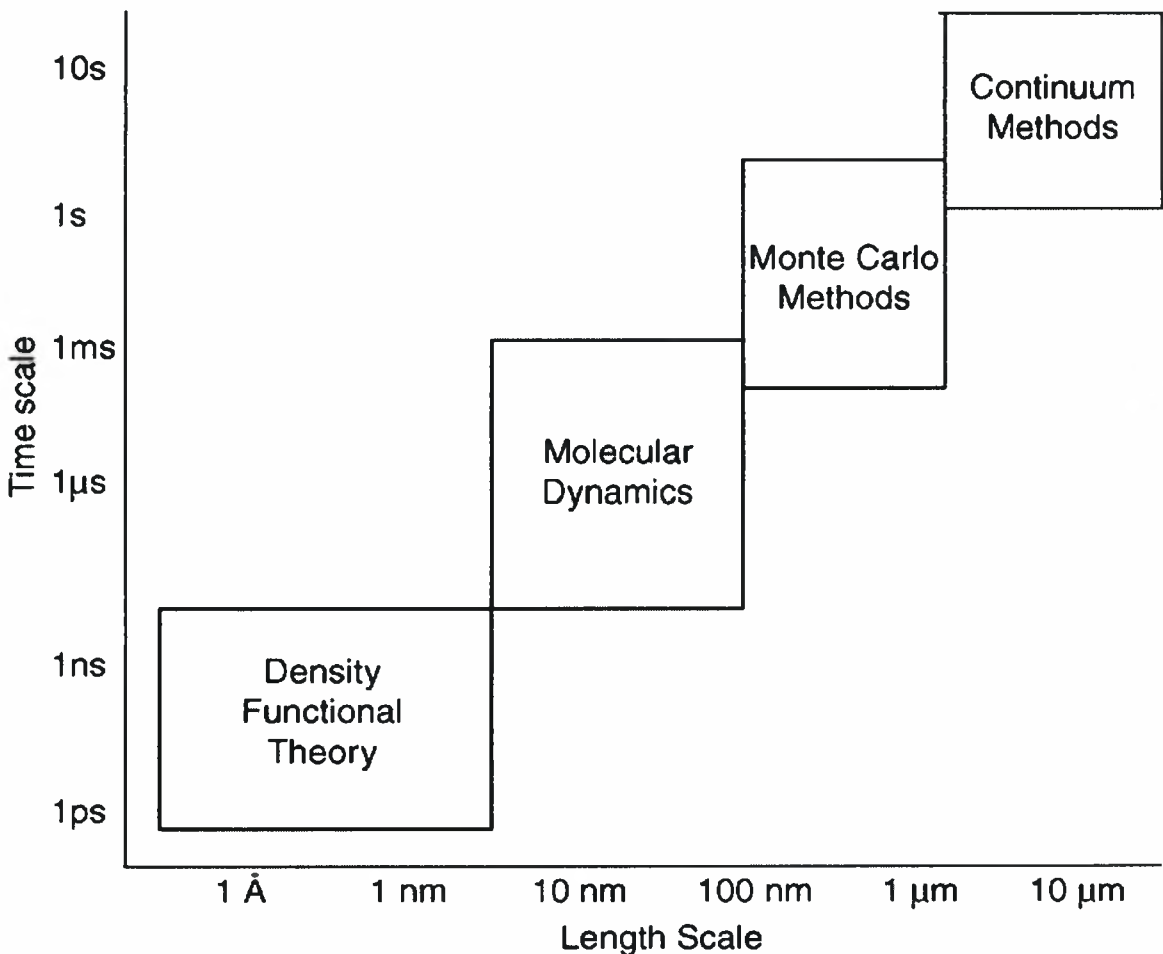
Σε ένα στοιχειώδες επίπεδο, ο σχεδιασμός του υλικού είναι μια μέθοδος που συνδέει την επεξεργασία του υλικού με την απόδοση του υλικού. Υπάρχει μια σχέση αιτίας-αποτελέσματος που συνδέει τη μετάβαση από την επεξεργασία στην απόδοση, αυτό σημαίνει ότι αλλάζοντας μια παράμετρος μεταποίησης θα έχουμε επιδράσεις στην μικροδομή στις ιδιότητες και τις επιδόσεις του υλικού. Βλέποντας προς την αντίθετη κατεύθυνση, ο στόχος είναι να επιτευχθεί η επιθυμητή ικανότητα λειτουργίας με τον καθορισμό των αναγκαίων ιδιοτήτων, σχετικά με την απαιτούμενη μικροδομή και τελικά με την επιλογή της σωστής τεχνικής επεξεργασίας.

Η συζήτηση σε αυτό το κεφάλαιο ξεκινά με την πολλαπλή συνεχή διακριτή ανάλυση των υλικών με τη σύνθετη εσωτερική δομή τους, που διαθέτουν σημαντικά συστατικά στοιχεία σε διάφορες χωρικές κλίμακες. Ως αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης, είναι η απόδειξη των πολύπλοκων σχέσεων μεταξύ της εσωτερικής μικροδομής και των επιδόσεων του

υλικού.

Μία παρόμοια μέθοδος κατάλληλη για συγκεκριμένες κλίμακες μήκους και χρόνου που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση φαινομένων στα υλικά που λειτουργούν μόνο σε σχέση με αυτές τις κλίμακες, (Karakasidis Charitidis, 2007)

Διάφορες κατάλληλες μεθόδους για την συγκεκριμένη διάρκεια των χρονοδιαγραμμάτων χρησιμοποιούνται για τα φαινόμενα των υλικών τα οποία λειτουργούν μόνο σε σχέση με αυτές κλίμακες σχήμα 4.2.



99

**Σχήμα 4.2** Χαρακτηριστικές κλίμακες χρόνου και μήκους για διάφορες μεθόδους προσομοιώσεις υλικών, (Karakasidis Charitidis, 2007).

Οι μέθοδοι, θεωρίες, που φαίνονται στο σχήμα 4.2 είναι:

1. Η **θεωρία συναρτησιακής πυκνότητας**, (**Density functional theory, DFT**) είναι μια κβαντική μηχανική θεωρία που χρησιμοποιείται στην φυσική και στην χημεία για την διερεύνηση

της ηλεκτρονική δομή, (κυρίως της θεμελιώδους κατάστασης), σε πολλά μέρη του υλικού ιδιαίτερα στα άτομα, μόρια, και στις συμπυκνωμένες φάσεις, με αυτή την θεωρία οι ιδιότητες πολλών συστημάτων ηλεκτρονίων μπορούν να προσδιοριστούν.

2. Η **Κλασική μοριακή δυναμική, molecular dynamics, (MD)**, Η προσομοίωση της κβαντικής μοριακής δυναμικής μπορεί να αντιμετωπίσει ένα πρόβλημα που περιέχει μερικές εκατοντάδες άτομα και σε πραγματικό χρόνο μερικών pS. Ένα πρώτο βήμα της απλούστευσης είναι η άρση του βαθμού ελευθερίας των ηλεκτρονίων με τη χρήση της προσέγγισης Born-Oppenheimer, (BO). Η συνολική ενέργεια υπολογίζεται ως συνάρτηση των θέσεων των πυρήνων και της δυναμικής ενέργεια,  $U(r_1, r_2, \dots, r_N)$ , δηλαδή τα άτομα αντιμετωπίζονται ως κλασικά σωματίδια που κινούνται στην επιφάνεια BO, και η κβαντική μηχανική κίνηση που διέπεται από την εξίσωση του Schrodinger αντικαθίσταται από την εξίσωση του Νεύτωνα για την κλασική μηχανική: (Karakasidis Charitidis, 2007)

$$F_i = m_i a_i \quad (3.1)$$

όπου:  $m_i$  είναι η μάζα του  $i$ -ατόμου και η δύναμη  $F_i$  που ενεργεί σε αυτό υπολογίζεται από το ενεργειακό δυναμικό στο εσωτερικό του ατόμου, σύμφωνα με τις εξισώσεις της μεθόδου MD, (Rapaport, 1995).

$$F_i = \nabla_i U \quad (3.2)$$

Υπάρχουν δύο βασικές πτυχές για την πρακτική εφαρμογή της μοριακής δυναμικής:

- η αριθμητική ολοκλήρωση των εξισώσεων της κίνησης σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες, καθώς και κάθε περιορισμός του δικτύου και
- η επιλογή του δυναμικού στο εσωτερικό του ατόμου.

Για ένα μόνο συστατικό στοιχείο του συστήματος, το ενεργειακό δυναμικό  $U$  μπορεί να γραφτεί ως επέκταση του δυναμικού των  $n$ -

σωμάτων:

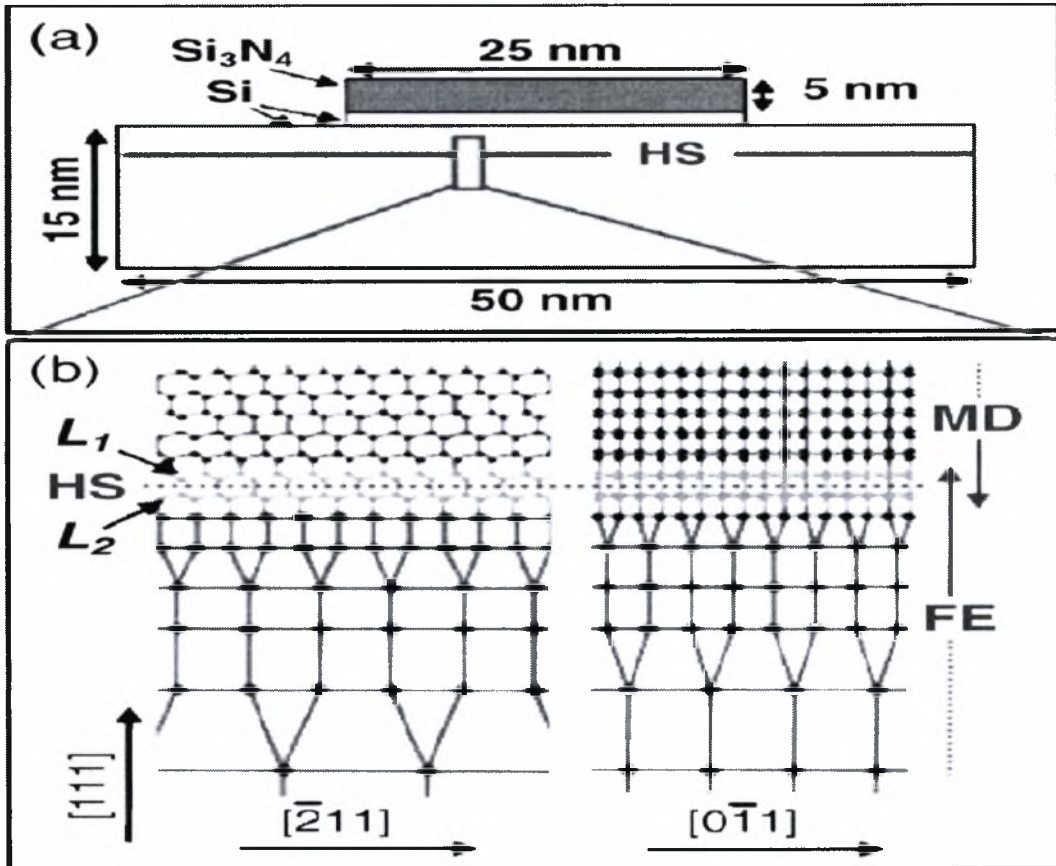
$$U(R_i) = \frac{1}{2!} \sum_{i \neq j}^n U_2(R_{ij}) + \frac{1}{3!} \sum_{i \neq j \neq k}^n U_3(R_{ij}, R_{ik}, R_{jk}) + \dots \quad (3.3)$$

Όπου:  $R_{ij} = R_i - R_j$  είναι η απόσταση διαχωρισμού στο εσωτερικό των ατόμων και το  $U_2$  αντιπροσωπεύει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ζευγαριών των ατόμων, το  $U_3$  εξαρτάται από το συσχετισμό προσανατολισμούς των τριδύμων ατόμων, κτλ. Η επιλογή των δυνατοτήτων καθορίζεται από το είδος δεσμών, την επιθυμητή ακρίβεια, τη δυνατότητα μεταφοράς και τους υπολογιστικούς πόρους.

Ο βασικός περιορισμός της μεθόδου MD εμφανίζεται όταν οι διαδικασίες όπως η ατομική διάχυση έχει φαινόμενα με πολλαπλές κλίμακες. Το χρονικό βήμα πρέπει να είναι αρκετά μικρό (της τάξεως του  $10^{-15}$  s) για να υπολογίσει τη δυναμική των τρόπων δόνησης, (της τάξης των  $10^{13}$  s<sup>-1</sup>). Πάντως, οι χρόνοι παραμονής μεταξύ των μετακινήσεων είναι της τάξης των μικρο-δευτερολέπτων, καθώς και οι υπεύθυνες αλληλεπιδράσεις για τα φαινόμενα συγκέντρωσης γίνονται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου σε κάθε λεπτό, (Karakasidis Charitidis, 2007).

3. Η **κινητική Monte Carlo (KMC)** μέθοδος είναι μια μέθοδος που προορίζονται για υπολογιστική προσομοίωση για να προσομοιώσουν την χρονική εξέλιξη ορισμένων διεργασιών που υπάρχουν στη φύση. Συνήθως αυτές οι διεργασίες που συμβαίνουν με έναν συγκεκριμένο ρυθμό είναι γνωστές. Είναι σημαντικό να καταλάβουμε ότι αυτά τα ποσοστά είναι οι συντελεστές για τον αλγόριθμο KMC.
4. Οι **μακροσκοπικές ή συνεχείς μέθοδοι** χρησιμοποιούν συνεχείς εξισώσεις, συνήθως με τη μορφή των ντετερμινιστικών ή στοχαστικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, είναι στην κορυφή της ιεραρχίας. Οι διαφορικές εξισώσεις αυτές διατυπώνονται από τις βασικές αρχές της φυσικής, όπως η διατήρηση της ενέργειας ή η

ορμή, κλπ. Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν την εξέταση μακροσκοπική περιοχές στο διάστημα κατά τη διάρκεια παρατεταμένων χρονικών περιόδων, σχήμα 4.3.



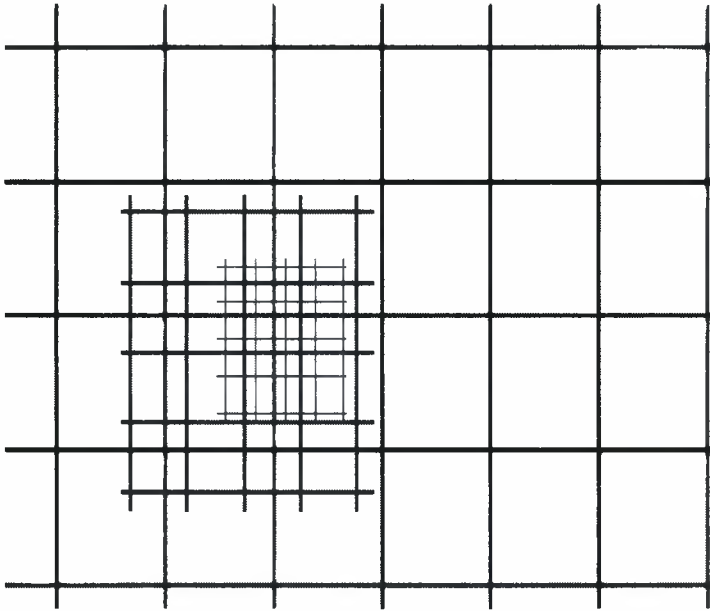
**Σχήμα 4.3** Σχηματική άποψη της Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanopixel, (Karakasidis Charitidis, 2007)

#### 4.2 Πολλαπλή συνεχής διακριτή ανάλυση των υλικών

Η σύγχρονη επιστήμη των υλικών και οι εφαρμογές της νανομηχανικής απαιτούν προσεγγίσεις που επιτρέπουν προσαρμοστική ανάλυση πολλαπλής διακριτικής ικανότητας στον τομέα των πεδίων συνεχούς μέσους, σχήμα 4.4, όπου κάθε υπολογιστικό πλέγμα αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη χωρική κλίμακα του συστήματος βάσει της ανάλυσης.

Κατά το σχεδιασμό ενός υλικού για συγκεκριμένη εφαρμογή, μια επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης εφαρμόζεται για την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων: ένα υλικό με ειδική μικροδομή παράγεται με

συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως η αντοχή και η συμπεριφορά σε θραύση που υπολογίζονται πειραματικά.



**Σχήμα 4.4** Σχηματική απεικόνιση μιας προσέγγισης πολυπλέγματος.

103

Μια νέα μικροδομή επινοείται στη συνέχεια, ώστε να έχει τις πιο βελτιωμένες ιδιότητες. Το ερώτημα παραμένει: ποια μικροδομή θα επιφέρει τις επιθυμητές ιδιότητες των υλικών. Για πολλά υλικά, συμπεριλαμβανομένων της επόμενης γενιάς των ελαφρών κραμάτων, τα κοκκώδη υλικά και τα σύνθετα υλικά, η σχέση μεταξύ μικροδομή και των ιδιοτήτων είναι πολύπλοκη. Το γενικό πρόβλημα του υπολογισμού των εγγενών ιδιοτήτων ενός σύνθετου υλικού με πολλά συστατικά στοιχεία από τη γνώση των ιδιοτήτων των συστατικών στοιχείων του «έχει αμφισβητηθεί». Οι κλίμακες μήκους σε ένα υλικό συνήθως συμπεριλαμβάνουν υπο-μικρομετρικές κλίμακες, εγκλείσματα, μικροδομές, και ούτω καθεξής. Μια πολλαπλή επίλυση συνεχούς διαμόρφωσης είναι δυνατόν να επιλύσει τα φυσικά φαινόμενα σε αυτές τις κλίμακες.

Η ιεραρχική μεθοδολογία, γνωστή και ως σειριακή ζεύξη ή παράμετρος που διέρχεται, αντιπροσωπεύει με ένα πιο ευθύ τρόπο για την εισαγωγή της περιοριστικής Φυσικής πολλαπλών διαστάσεων στην

Μακροχωροθέτηση του συστατικού νόμου. Εδώ, η εσωτερική κλίμακα ροής πληροφοριών επιτυγχάνεται συνήθως με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού/ αντιπροσωπευτικού τεχνικού κυτταρικού μοντέλου. Η κατά μέσον όρο συμπεριφορά των συστατικών της μικρότερης κλίμακας, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς στην επόμενη μεγαλύτερη κλίμακα, και ούτω καθεξής, μέχρι το καθορισμό της συμπεριφοράς στην χωροθέτηση της μεγάλης κλίμακας. Οι προκύπτοντες νόμοι των υλικών βελτιώνονται σε σχέση με τις συμβατικές ομογενοποιημένες σχέσεις σύστασης, καθώς περιέχουν κάποια παράμετρο της μικροκλίμακας. Ωστόσο, εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται μέσα σε ένα συμβατικό συνεχές πλαίσιο για τον καθορισμό της συμπεριφοράς ενός δείγματος.

Συμβατικές συνεχείς προσεγγίσεις δεν μπορούν να προσδιορίσουν πεδία παραμορφώσεων εντοπισμένα σε σχέση με το χαρακτηριστικό μήκος της μικροδομής. Επίσης, παρουσιάζεται η συμπεριφορά των συστατικών σε αυτές τις μικρότερες κλίμακες να είναι συνήθως διαφορετική από το μέσο όρο της συμπεριφοράς στην χωροθέτηση μεγάλης κλίμακας. Η σημαντική συμπεριφορά του υλικού δεν δύναται να βρεθεί, όπως η εγγενής ανομοιογένεια της πλαστικής παραμόρφωσης, ο εντοπισμός της πλαστικής ροής των διατμητικών ζωνών και η επίδραση του μεγέθους ρωγμών στην γεωμετρία και τη συμπεριφορά των θραύσεων. Τα φαινόμενα αυτά ελέγχουν σημαντικά την μηχανική συμπεριφορά όπως η αντοχή σε θραύση. Θα πρέπει υπολογισθούν για τη δημιουργία μιας σχέσης μεταξύ της δομής και των ιδιοτήτων.

Ο Vernerey et al. (2005) και ο McVeigh et al. (2005) πρότειναν τις N-διαστάσεων συνεχείς προσεγγίσεις που θα διατηρήσουν την ταυτότητα ενός υλικού σε κάθε κλίμακα ενδιαφέροντος, δηλαδή, θα επιτρέψουν την εγγενή ανάλυση πολλαπλής διακριτικής ικανότητας. Από την ίδια τη φύση της πολλαπλής διακριτικής ανάλυσης, η λεπτή κλίμακα διακύμανσης των μέτρων της τάσης καθώς και της πίεσης κατανέμεται σε μια ακολουθία από τις διακυμάνσεις στις διάφορες κλίμακες μήκους. Η παραμόρφωση και η συστατική συμπεριφορά της κάθε κλίμακας εξετάζεται χωριστά για τον καθορισμό των συνολικών ιδιοτήτων του υλικού. Με τον τρόπο αυτό, οι ιδιότητες διασαφηνίζονται από την άποψη των βασικών παραμέτρων της

μικροδομής που ελέγχει την μικρομηχανική σε κάθε κλίμακα, πράγμα που επιτυγχάνεται αναλυτικά ή μέσω τεχνικών προσομοίωσης.

### 4.3 Γενικευμένη Πίεση και Μέτρα Παραμόρφωσης

Ένα υλικό με πολλαπλές κλίμακες και επίσης με μικρομορφολογία είναι ένα υλικό που περιέχει μια διακριτική μικροδομής συστατικών σε  $N$  κλίμακες ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, ένα υλικό που μπορεί να περιέχει ασθενείς δεσμούς μεταξύ των σωματιδίων στην μικροκλίμακα και στην νανοκλίμακα. Σε αυτό το παράδειγμα, τρεις κλίμακες παρουσιάζουν ενδιαφέρον:

- η μεγάλη κλίμακα χωροθέτησης,
- η μικροκλίμακα και
- η νανοκλίμακα.

Η συμπεριφορά των υλικών σε κάθε κλίμακα, θα διαφέρει σημαντικά. Ένα μοντέλο που ελπίζει στην προσομοίωση της σχέσης μεταξύ της δομής και των ιδιοτήτων του υλικού πρέπει να υπολογίζει τη μικρομηχανική συμπεριφοράς σε κάθε διαφορετική κλίμακα. Ένα πλαίσιο γενικής, πολλαπλής, συνεχής και διακριτής ανάλυσης είναι εκείνο που ορίζεται ως εξής:

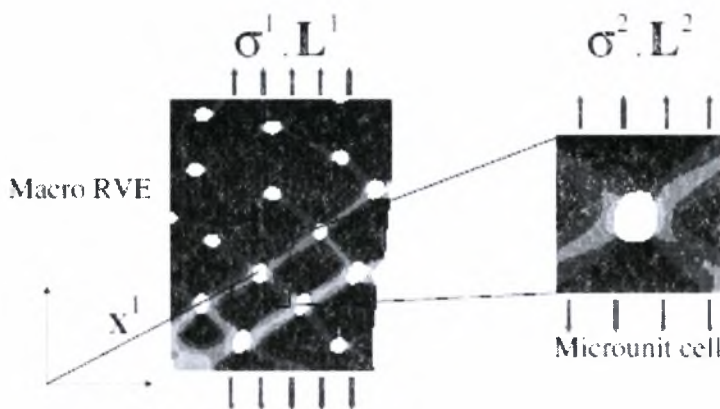
1. η δομή του υλικού και το πεδίο παραμόρφωσης επιλύονται σε κάθε κλίμακα που παρουσιάζει ενδιαφέρον,
2. η προκύπτουσα εσωτερική δύναμη είναι μια πολύπλοκη έκφραση με τις συνεισφορές του μέσου όρου των παραμορφώσεων σε κάθε κλίμακα (δηλαδή, οι συνολικές ιδιότητες εξαρτώνται από τη μέση παραμόρφωση σε κάθε κλίμακα),
3. η συμπεριφορά της παραμόρφωσης σε κάθε κλίμακα βρίσκεται από την εξέταση της μικρομηχανικής σε κάθε κλίμακα,
4. η συστατική σχέση μπορεί να αναπτυχθεί σε κάθε κλίμακα.

Θα ξεκινήσουμε με τον υπολογισμό των εσωτερικών δυνάμεων ενός απλού δύο διαστάσεων υλικού το οποίο περιέχει μια μεταλλική περιοχή με εγκλείσματα ή κενά στην μικροκλίμακα. Ένα παράδειγμα είναι το πορώδες του υλικού που αναφέρεται στο σχήμα 4.5. Σε ένα τέτοιο υλικό, η μικροσκοπική παραμόρφωση ελέγχεται με την αύξηση των κενών. Η



ανάπτυξη των κενών είναι μια ογκομετρική διαδικασία και βρίσκεται σε συνάρτηση με την υδροστατική πίεση μόνο. Είναι λογικό να υποτεθεί ότι το ογκομετρικό μέρος της μικρο παραμόρφωσης κατέχει σημαντικό ρόλο στη μικροσκοπική παραμόρφωση αυτών των υλικών. Εδώ, η συμπεριφορά στη μεγάλη και στην μικροκλίμακα παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Ως εκ τούτου, ο στόχος είναι ο υπολογισμός της δομής του υλικού και της παραμόρφωσης του στην μακρο και μικρο κλίμακα. Οι γενικές εξισώσεις για τις  $N$  κλίμακες θα συζητηθούν παρακάτω.

Σε μια συνεχή συμβατική προσομοίωση, η ομογενοποιημένη συστατική συμπεριφορά σε ένα σημείο είναι προκαθορισμένη και βρίσκεται στη μέση της συμπεριφοράς ενός δείγματος του υλικού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω πειραματικών μηχανικών δοκιμών. Εναλλακτικά, για ένα υλικό με πολλαπλά συστατικά με γνωστές τις επιμέρους ιδιότητες των κατασκευαστικών στοιχείων,



106

**Σχήμα 4.5** Ένα μακρο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου RVE και μία κυψελίδα με τις αντίστοιχες πιέσεις τους και τους ρυθμούς των μέτρων παραμόρφωσης.

η υπολογιστική προσομοίωση μπορεί να εκτελεσθεί σε ένα δείγμα που ονομάζεται αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου, *representative volume element* (RVE). Αυτό είναι άμεσα ανάλογο με την πειραματική δοκιμή.

Για να προσδιοριστεί η επίδραση των υποκλιμάκων, πρόσθετα πεδία παραμόρφωσης που αντιστοιχούν σε κάθε κλίμακα, έχουν εισαχθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με μαθηματική ανάλυση της θέσης και ταχύτητας μέσα σε ένα RVE των συστατικών στοιχείων που συνδέονται με την κάθε κλίμακα. Το σχήμα 4.5 δείχνει την μαθηματική ανάλυση για ένα απλό δύο

διαστάσεων μικρο μορφικό υλικό μαζί με μια φυσική ερμηνεία. Για μια τέτοια περίπτωση, η θέση και η ταχύτητα ενός σημείου του υλικού γίνονται:

$$x = x^1 + x^2, \quad v = v^1 + v^2 \quad (4.1)$$

όπου  $V^1$  είναι η μακρο ταχύτητα και  $V^2$  είναι η σχετική μακρο ταχύτητα. Η μακρο RVE ενσωματώνει ένα χαρακτηριστικό μικροδομής ως σύμπλεγμα. Έτσι, η μονάδα κύτταρου ορίζεται σε κάθε κλίμακα έτσι ώστε η κλίση της σχετικής μακρο ταχύτητα να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή μέσα στο κύτταρο, αυτό δείχνει ότι η σχετική μακρο ταχύτητα διαφοροποιείται γραμμικά,

$$v^2(x^2) = L^2 \cdot x^2 \quad (4.2)$$

Το σχήμα 4.4 αποτελεί ένα μακρο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου, RVE με μέσο όρο της μακρο πίεσης,  $\sigma^1$  και μακρο τιμή της παραμόρφωσης,  $L^1$ . Αυτές είναι οι μέσες μακρο πιέσεις και το ποσοστό της παραμόρφωσης σε ένα μακροσκοπικό, RVE του υλικού, τα οποία είναι σταθερά μέσα στην μικρο κυψελίδα. Με ζουμ σε μια μικρο κυψελίδα στην RVE, μπορούμε να εξετάσουμε τη συνολική μικρο πίεση,  $\sigma^2$  και ποσοστό παραμόρφωση,  $L^2$  που συνδέονται με μία μικρο κυψελίδα. Αυτά θα διαφέρουν από τα αντίστοιχα μεγάλα μέτρα εφόσον το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου, RVE δεν είναι ομοιογενής. Το σχετικό ποσοστό μικροπαραμόρφωσης που σχετίζεται με μια μικρο κυψελίδα ορίζεται ως  $(L^2-L^1)$ . Οι μικρο πιέσεις που σχετίζονται με μια μικρο κυψελίδα συμβολίζεται με το  $\beta^2$ .

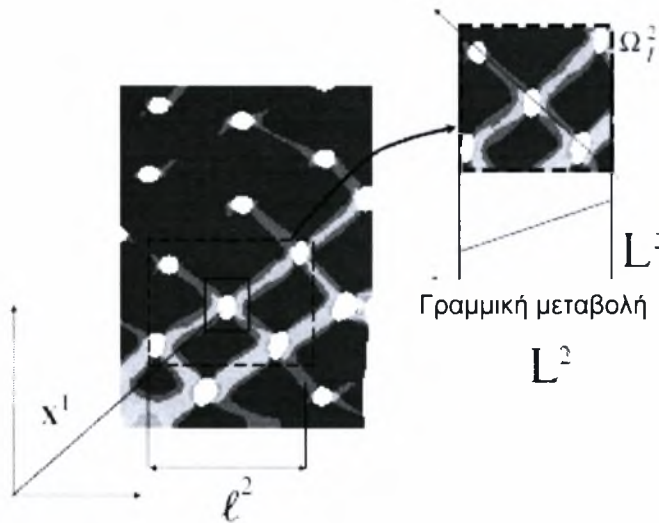
Η εσωτερική δύναμη μιας κυψελίδας μπορεί να υπολογιστεί ως αποτέλεσμα της συνεισφοράς του μακροσκοπικού ποσοστού παραμόρφωσης,  $L^1$ , και του ποσοστού της σχετικής μικρο παραμόρφωσης,  $(L^2-L^1)$ ,

$$p_{int} = \sigma^1 : L^1 + \beta^2 : (L^2 - L^1) \quad (4.3)$$

Η μικρο πίεση που συνδέεται με μια κυψελίδα,  $\beta^2$ , ορίζεται ως η σχέση της δύναμης με το σχετικό ποσοστό της μικρο παραμόρφωσης. Η μικρο πίεση είναι σταθερή εντός της μικρής κυψελίδας.

Η τιμή του  $\beta^2$  είναι το μέτρο της τάσης ενός πεδίου πίεσης και παραγάγει την κλίση της τάσης στο μέσο της περιοχής. Μια μέση τιμή της εσωτερικής ενέργειας (σε μια διακριτή θέση  $x$ ) είναι απαραίτητη για τη χρήση εντός του μαθηματικού πλαισίου της πολύ κλίμακας.

Αυτό καθορίζεται αριθμητικά ως ο μέσος όρος της εσωτερικής δύναμης στην μικρο θέση επιρροής. Αυτή η θέση επιλέγεται έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτική του φάσματος των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των χαρακτηριστικών της μικροδομής σε μικροσκοπική κλίμακα. Στο σχήμα 4.6, ο μικρο τομέας της επιρροής, (domain of influence, DOI), έχει επιλέξει για να περιλαμβάνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πλησιέστερων γειτονικών κενών.



**Σχήμα 4.6** Τομείς επιρροής που επιλέγονται στην μικροκλίμακα, όπου το ποσοστό των μικροπαραμορφώσεων ποικίλλει γραμμικά στο διάστημα.

Η μέση εσωτερική δύναμη είναι ίση με το μέσο όρο του μικρο τομέα της επιρροής, DOI:

$$\square p_{int}(x) = (1/v^2) \int_{\Omega^2} p_{int}(x+y) d\Omega^2_1 \quad (4.4)$$

Μια έκφραση για την μεταβολή του ποσοστού της μικρο παραμόρφωσης εντός του DOI μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας σειράς Taylor. Ο όρος πρώτης τάξης δεν λαμβάνεται υπόψη, και έχουμε:

$$L^2(x + y) = \bar{L}^2(x) + y \cdot \nabla \bar{L}^2(x) \quad (4.5)$$

όπου  $\bar{L}^2(x)$  είναι η μέση τιμή της μικρο παραμόρφωσης του DOI και  $\nabla \bar{L}^2(x)$  είναι η μέση κλίση του ποσοστού της μικρο παραμόρφωσης μέσα στον πολύ μικρό DOI. Η γραμμική προσέγγιση της (4.5) δικαιολογείται στο σχήμα 4.6 το οποίο δείχνει τη διακύμανση του συνόλου των μικρο μακρο παραμορφώσεων κατά μήκος ενός μικρο DOI. Η μέση εσωτερική δύναμη για δύο κλίμακες μικρο μορφικού υλικού δίνει :

$$\bar{p}_{int} = \sigma^1: \bar{L}^1 + \beta^2: (\bar{L}^2 - \bar{L}^1) + \bar{\beta}^2 \cdot \nabla \bar{L}^2 \quad (4.6)$$

όπου  $\bar{\beta}$  είναι ο μέσος όρος της σχετικής μικρο πίεσης πάνω στον τομέα της επιρροής και  $\beta$  είναι ο μέσος όρος την πρώτη στιγμή της μικρο πίεσης, δηλαδή,  $y * \beta$ , πάνω στον τομέα της επιρροή. Η εξίσωση (4.6) περιλαμβάνει τις συνεισφορές της πυκνότητας ισχύος από τις τιμές μακρο και μικρο παραμορφώσεις. Περιλαμβάνει, επίσης, την κλίση των ποσοστών αυτών. Αυτός ο όρος της κλίσης απορρέει από τη διακύμανση της μικρο παραμόρφωσης στο πεδίο της επιρροής. Πράγματι, το DOI θα πρέπει να επιλέγεται κατά τρόπο ώστε η διαφορά αυτή μπορεί να θεωρηθεί γραμμική και πρώτης τάξης προσέγγιση της (4.5) που ισχύει εντός της μικρο DOI. Φυσικά, η κλίση προκύπτει λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των χαρακτηριστικών της μικροδομής όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Η απλότητα των επιπέδων της χρήσης ενός DOI με μια κλίμακα μήκους στο μαθηματικό πλαίσιο σε μικροσκοπική κλίμακα συνδέεται στενά με το μέγεθος του μικρότερου χαρακτηριστικού της μικροδομής σε αυτήν την κλίμακα. Όχι μόνο κάνει αυτό το μοντέλο πιο φυσικό και ρεαλιστικό αλλά καταργεί επίσης την άποψη για τη ύπαρξη σημαντικών προβλημάτων που συνδέονται με τις συμβατικές συνεχείς προσεγγίσεις.

Σημειώστε ότι σε μια συμβατική συνεχής προσέγγιση, όπου μόνο η

ομογενοποιημένη χωροθέτηση της μακρο συμπεριφοράς θεωρείται, η μακρο περιοχή επιρροής, συμπίπτει με την αναγραφόμενη μακρο RVE στο σχήμα 4.6. Το συνολικό μικρο ποσοστό της  $L^2$  παραμόρφωσης είναι ίσο με το σύνολο μικρο ποσοστό της παραμόρφωσης  $L^1$  και της έκφρασης (4.6) που μειώνει για να δώσει τον μέσον όρο της εσωτερική δύναμης ενός συμβατικού συνεχούς ομογενοποιημένου υλικού,

$$\overline{p}_{int} = \sigma^1 : L^1 \quad (4.7)$$

Η εξωτερική δύναμη μπορεί ομοίως να συναχθεί σε σχέση με τους μέσους όρους των μέτρων. Με την εφαρμογή στην αρχή της εικονικής δύναμης και χρησιμοποιώντας το θεώρημα της απόκλισης, η προκύπτουσα ισχυρή μορφή δημιουργεί ένα σύστημα συζευγμένων πολλαπλών τομέων των διαφορικών εξισώσεων που τις διέπουν. Αυτό αποτελεί τη βάση του μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση πολλαπλών κλιμάκων στην μικρο μορφική πεπερασμένων στοιχείων. Η γενικευμένη πίεση και οι τανυστές παραμόρφωσης μπορεί να οριστούν ως:

$$\Sigma = [\sigma^1 \overline{\beta^2} \overline{\beta^2}], \quad \Upsilon = [L^1 [\overline{L^2} - \overline{L^1}] \nabla \overline{L^2}] \quad (4.8)$$

Αυτές είναι συνδεδεμένες μέσω ενός ελαστο-πλαστικού μικρο μορφικού, πολλαπλών κλιμάκων συστατικού νόμου.

#### 4.4 N-διαστάσεων υλικό

Η πολλαπλή ανάλυση της εσωτερικής δύναμης, τάσης και των τανυστών πίεσης έχει αναπτυχθεί και γενικευτεί με τις N κλίμακες του υλικού από την (Vernerey et al. (2005). Η N-διαστάσεων εσωτερική πυκνότητα της δύναμης δίνεται από τον τύπο :

$$p_{int} = \sigma^1 : L^1 + \sum_{\alpha=2}^N (\overline{\beta^\alpha} : (\overline{L^\alpha} - \overline{L^1}) + \overline{\beta^\alpha} : \nabla \overline{L^\alpha}) \quad (4.9)$$

όπου δηλώνει τις χονδροειδείς καλύτερες κλίμακες μήκους, όπως την πρώτη και την Nιοστή, αντίστοιχα. Η γενικευμένη πίεση και τα μέτρα

παραμόρφωσης μπορεί να οριστούν ως :

$$\bar{\Sigma} = [ \bar{\sigma}^1 \quad \bar{\beta}^2 \quad \bar{\beta}^2 \quad \bar{\beta}^3 \quad \bar{\beta}^3 \dots \beta^N \quad \beta^N ] \quad (4.10)$$

$$Y = [L^1 [ \bar{L}^2 - \bar{L}^1 ] \nabla \bar{L}^2 [ \bar{L}^3 - \bar{L}^1 ] \nabla \bar{L}^3 \dots [ \bar{L}^N - \bar{L}^1 ] \nabla \bar{L}^N ] \quad (4.11)$$

Σε συντομία με συμβολισμούς, η εσωτερική πυκνότητα ισχύος (4.9) μπορεί να γραφτεί ως :

$$\bar{p}_{int} = \bar{\Sigma} \cdot Y \quad (4.12)$$

Για τον υπολογισμό με πεπερασμένα στοιχεία, η αρχή της εικονικής και διακριτοποιημένης δύναμης μπορεί να εφαρμοστεί. Η γενικευμένη πίεση  $\Sigma$ , και το γενικευμένο ποσοστό παραμόρφωσης  $Y$  είναι τανυστές αντικατάστασης της πρότυπης πίεσης και του τανυστή τάσης. Εξου και η προσέγγιση της πολλαπλής διακριτικής ικανότητας μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα πρότυπο πεπερασμένων στοιχείων με αυξημένους βαθμούς ελευθερίας.

111

#### 4.5 Πολλαπλή ανάλυση των συστατικών νόμων

Σε μια πολλαπλή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, μια γενικευμένη συστατική σχέση απαιτείται για τη σύνδεση της γενικευμένης πίεσης με τη γενικευμένη παραμόρφωση. Το πρώτο βήμα είναι να αντλήσει τα επιμέρους συστατικά των σχέσεων σε κάθε επίπεδο με την εξέταση της μικρομηχανικής σε κάθε κλίμακα. Τα επιμέρους συστατικά στοιχεία των σχέσεων σε κάθε κλίμακα μπορεί στη συνέχεια να συνδυαστούν για να δημιουργήσουν μια γενικευμένη συστατική σχέση,

$$\Sigma = C^{ep} : Y \quad (4.13)$$

όπου  $C^{ep}$  είναι η εφαπτομένη του γενικευμένου ελαστικού-πλαστικού συντελεστή. Αναλυτική εξαγωγή μιας γενικευμένης συστατικής σχέσης και, επομένως, καθορισμός του  $C^{EP}$ , μπορεί να είναι δυνατή αν ο μηχανισμός

είναι απλός και κατανοητός. Αυτή η προσέγγιση καταδείχθηκε για ένα πολύ κρυσταλλικό και κοκκώδες υλικό από τον (Mc Veigh et al., 2005). Επισημαίνουμε ότι κάποιος μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις τεχνικές για να επιλύσει το αντίστροφο πρόβλημα - να βρει το δρόμο για το σχεδιασμό της μικροδομής των υλικών, με βάση τις επιθυμητές μακροσκοπικές ιδιότητες.

#### **4.6 Η αλληλεπίδραση μεταξύ των κλιμάκων**

Η χρήση μιας μικρο μορφικής προσέγγισης πολλαπλών κλιμάκων επιτρέπει σε κάποιον να εξετάσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κλιμάκων. Θεωρήστε ένα δείγμα του υλικού που περιέχει δύο μικρού μεγέθους σωματίδια σε μια περιοχή. Στα πλαίσια μιας καθαρής κατάστασης διατμητικών τάσεων, συμβατικά ιεραρχικά μοντέλα δεν μπορούν να προβλέψουν τη σωστή τοπική τάση και επομένως τη σωστή συμπεριφορά της σκληρότητας. Στην πραγματικότητα, το υλικό που αποτυγχάνει συχνά με αυτόν τον τρόπο λόγω της πυρήνωσης των κάτω από τα μικρο κενών στο εσωτερικό της ζώνη που καταπονείται σε εφελκυσμό και εμφανίζεται μεταξύ των μεγάλων κενών, ακόμη και υπό συνθήκες καθαρής διάτμησης.

Ένα πολλαπλών κλιμάκων μικρο μορφικό μοντέλο υλικού μπορεί να υπολογίσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων σε διαφορετικές κλίμακες που προκαλούν αυτό το μηχανισμό των κενών τύπου φύλλων. Περιοχή κάτω από εφελκυστικές τάσεις μεταξύ των δύο μικρο σωματιδίων θα προκαλέσει μια απόκριση στο κάτω από το μικρο μέγεθος του δυναμικού, και θα οδηγήσει σε σοβαρή μεταβολή της σκλήρυνσης του υλικού. Κάθε κλίμακα θα υποστεί μεταβολή των επιπέδων σκληρότητας, ανάλογα με το μέσο ποσό των ζημιών στη συγκεκριμένη κλίμακα. Ωστόσο, υπάρχει επίσης ένας βαθμός αλληλεπίδρασης μεταξύ των κλιμάκων. Για παράδειγμα, ακόμη και αν η μακρο παραμόρφωση  $\bar{L}^1$  είναι μηδέν και η μέση τιμή μικρο παραμόρφωσης  $\bar{L}^2$  είναι μια καθαρή ποσότητα διάτμησης, η συνολική συστατική απόκριση θα δείξει ακόμα ένα μαλακτικό αποτέλεσμα. Τα μαλάκωμα εμφανίζεται γενικά μόνο υπό υδροστατική φόρτιση. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την εξέταση των κάτω από τη

μικροκλίμακα περιοχών. Κατά μέσο όρο η υδροστατική πίεση στον τομέα που εμφανίζεται στη κάτω από τη μικροκλίμακα περιοχή λόγω του εντοπισμού των σωματιδίων στην μικρο κλίμακα. Αυτό οδηγεί σε ακυρότητα της πυρηνοποίησης και ανάπτυξη των κάτω από τη μικροκλίμακα περιοχών. Το εντατικό πεδίο μεταξύ των δύο μικρο κλιμάκων έχει υδροστατική συνιστώσα. Το υλικό στο εσωτερικό πεδίο της τοπικής πίεσης περιέχει σωματίδια στην κάτω από τη μικροκλίμακα περιοχή που καθίσταται ενισχυμένα. Το υλικό αυτό παρουσιάστηκε από τον (Gurson, 1977).

Από μια υπολογιστική άποψη, οι προσομοιώσεις συνεχούς μέσου με λεπτομέρεια μόνο σε μικρές περιοχές, όπως ένας βρόχος ανάλυσης θα πρέπει να τελειοποιηθεί ώστε να περιλαμβάνει την εγγενή κλίμακα μήκους, κατά μέσο όρο πάνω από την περιοχή της επιρροής. Σε περίπτωση μεγάλης κλίμακας προσομοίωσης απαιτείται μαζί με μια λεπτή κλίμακα ανάλυση, και οι προσεγγίσεις με συνεχή πολλαπλή διακριτική ικανότητα που μπορεί να παράσχουν ακριβή περιγραφή της απόκρισης των επιμέρους κλιμάκων, ενώ επιλύεται το πρόβλημα μεγάλης κλίμακας συνεχούς μέσου.

#### **4.7 Μοντελοποίηση πολλαπλών κλιμάκων Υλικών**

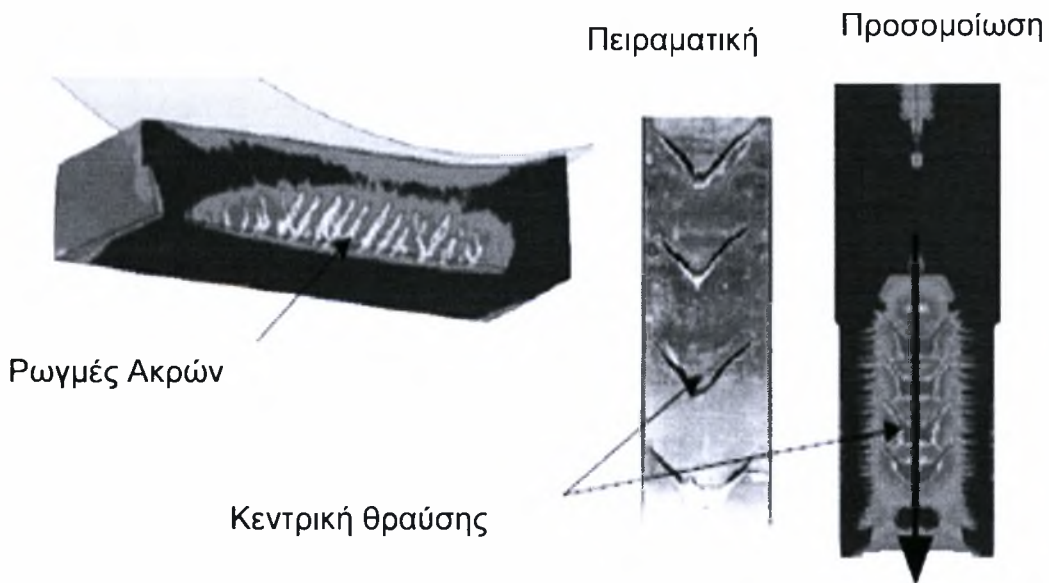
Κατά την τελευταία δεκαετία, έχουν χρησιμοποιηθεί προσεγγίσεις πολλαπλών κλιμάκων συνεχούς μέσου για την επιτυχή πρόβλεψη της συμπεριφοράς των διαφόρων μικρο μορφικών υλικών. Εκτός αυτού, οι ερευνητές έχουν επίσης κάνει προσπάθειες στην μοντελοποίηση και προσομοίωση συνεχούς μέσου των παραγωγικών διεργασιών πολλαπλών κλιμάκων. Στο παρακάτω κείμενο, περιγράφονται αρκετές ενδιαφέρουσες εφαρμογές.

Μια μικρο μηχανική προσέγγιση μοντελοποίησης στοιχείων, παρόμοια με εκείνη που περιγράφεται στην παράγραφο 4.3, έχει χρησιμοποιηθεί από τους (McVeigh και Liu, 2005), για να προβλέψουν τη συστατική συμπεριφορά του κράματος Αλουμινίου – Χαλκού, Al-Cu, με δύο κλίμακες ασθενώς συνδεδεμένων μικρών ιζημάτων. Ένα αποκλειστικό κριτήριο για τα κενά της πυρήνωσης χρησιμοποιήθηκε μαζί με την μοντελοποίηση των



στοιχείων για τον καθορισμό του μακρο συστατικού νόμο. Στο μοντέλο ενσωματώθηκαν τα μέτρα των μικρο βλαβών και χρησιμοποίησαν ένα συμβατικό συνεχές πλαίσιο για την προσομοίωση των θραύσεων κατά τη διάρκεια των διαδικασιών παραγωγής (σχήμα 3.6).

Η παραπάνω προσέγγιση εφαρμόζει την τεχνική μοντελοποίησης στην πολλαπλή ανάλυση των στοιχείων για τη μελέτη του κοκκώδες υλικού. Ένα κοκκώδες υλικό αποτελεί μια μεγάλη συγκέντρωση διακριτών στερεών κόκκων, όπως άμμο, χώμα, χαλίκι, κόκκους καφέ, και ούτω καθεξής. Αν και η συμπεριφορά των μεμονωμένων κόκκων είναι πολύ απλή, η συνολική συμπεριφορά του συστήματος είναι πολύπλοκη. Η σημασία της κατανόησης των με κοκκώδη υλικών έγκειται στη χρήση τους στις βιομηχανικές διεργασίες και στις επιβλαβείς συνέπειες τους σε φυσικά φαινόμενα όπως κατολισθήσεις εδάφους. Η διάχυση της ενέργειας και η μεταφορά της ορμής είναι περίπλοκη επειδή συμβαίνει λόγω της άμεσης αλληλεπίδρασης μεταξύ των γειτονικών κόκκων. Ως εκ τούτου, τα χαρακτηριστικά της ροής αυτών των υλικών συνδέονται άμεσα με την κοκκώδη δομή. Βιομηχανική, βελτίωση της κατανόησης των κοκκωδών υλικών μας παρέχει τη δυνατότητα για τεράστια οικονομία χρημάτων, (Knowlton et al, 1994).



**Σχήμα 3.6** Έλασης και διέλασης χρησιμοποιώντας μια μικρο μηχανική προσέγγιση μοντελοποίησης στοιχείων.

Οι (Kadowaki και Liu (2004, 2005), χρησιμοποίησαν μια πολλαπλών κλιμάκων προσέγγιση του συνεχούς μέσου για την μελέτη του εύρους της πλαστικότητας διάτμησης, καθώς και τη μελέτη της σύνθετης συμπεριφοράς αστοχίας ενός κοκκώδους υλικού. Ο ελαστο - πλαστικός συστατικό νόμος της ύλης χαρακτηρίζεται από την εξαγωγή των σχέσεων μεταξύ των μικρο τάσεων και της τριβής μεταξύ των κόκκων, (Hao et al., 2003, 2004a), που χρησιμοποιείται σε ατομιστικές προσομοιώσεις σε μοντέλα πολλαπλών κλιμάκων και για την προσέγγιση δύο διαστάσεων μικρο μορφικών υλικών γνωστών ως cybersteel, χάλυβας στον κυβερνοχώρο. Αυτή η επόμενη γενιά χάλυβα περιέχει σωματίδια σε πολύ μικρές και τις υπό μικρές κλίμακες. Το μοντέλο αντιστοιχεί στις διεπιφανειακές δυνάμεις και στα ελαττωματικά κενά σε κάθε κλίμακα. Η αναπτυσσόμενη θεωρία της πλαστικότητας προτείνει την δημιουργία γεωμετρικά αναγκαίων εξαρθώσεων που ελέγχονται από την κλίση της τάσης. Ο εσωτερική εργασία έχει μια συνεισφορά από την κλίση της τάσης. Αυτό είναι σύμφωνο με των δύο διαστάσεων μικρο μορφικού υλικού όταν η μικρο πίεση είναι μηδενική και η επιρροή της μικρο περιοχής έχει επιλεγεί για να αποτελέσει το ίδιο με το μικρο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου. Μία τρέχουσα έρευνα στο θέμα είναι η επέκταση των παραπάνω, στην γενική περίπτωση N-διαστάσεων, έτσι ώστε να επιλυθεί πλήρως το πλαίσιο που θα μπορούσε να αναπτυχθεί.

Εν ολίγοις, η προσέγγιση πολλαπλών κλιμάκων συνεχούς μέσου είναι σε θέση να συνδέει τις ιδιότητες του συνολικού υλικού με την υποκείμενη μικροδομή μέσω της μικρομηχανικής σε κάθε κλίμακα ενδιαφέροντος, υπό την προϋπόθεση ότι οι λεπτομερείς της χημείας, της κινητικής και της φάσης μετάβασης σε πολύπλοκα συστήματα υλικών μπορεί να θεωρηθούν η μέση τιμή του συνεχούς μέσου. Τα μικρής κλίμακας φαινόμενα παραμόρφωσης που έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην μακροχωροθέτηση των ιδιοτήτων μπορούν να υπολογιστούν. Η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα υλικά που εμφανίζουν διαφορετικά συστατικά στη συμπεριφορά κάθε κλίμακα, και μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα γενικό πλαίσιο πεπερασμένων στοιχείων. Η προσέγγιση πολλαπλών κλιμάκων συνεχούς μέσου έχει τη δυνατότητα να διευκρινίσει τις συνακόλουθες μακροσκοπικές ιδιότητες των ιεραρχιών υλικών μέσω των υπολογιστικών

μοντέλων των κυττάρων.

Όσον αφορά το σχεδιασμό του υλικού, η προσέγγιση της πολλαπλής διακριτικής ικανότητας είναι μια μέθοδος που περιγράφει την κρίσιμη σχέση μεταξύ της μικροδομής υλικών και των ιδιοτήτων. Προσφέρει την προοπτική να εξαλειφθεί η ανάγκη για δαπανηρές και χρονοβόρες μηχανικές δοκιμές και την προτυποποίηση. Καθώς η βιομηχανία πιέζει για ελαφρύτερα και ισχυρότερα υλικά, η θεωρία της προσέγγισης των πολλαπλών κλιμάκων προσφέρει μια ευκαιρία για βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων όσον αφορά την αρχιτεκτονική της μικροδομής. Οι δυνατότητες πρόβλεψης της θεωρίας μπορεί να βοηθήσουν επίσης την ταχεία πρόοδο των βιο-εμπνευσμένων και αυτο-ιάσιμων σύνθετων υλικών, τα οποία επί του παρόντος βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο. Η εκ των προτέρων γνώση της βέλτιστης μικροδομής των εν λόγω σύνθετων υλικών νέας γενιάς μπορεί να βοηθήσει την αναζήτηση μιας διαδικασίας κατασκευής.

#### **4.8 Πολλαπλών κλιμάκων συστατική Μοντελοποίηση του Χάλυβα**

116

Ένας από τους κύριους στόχους της μελέτης της νανομηχανικής των υλικών είναι ο υπολογισμός των παρατηρούμενων φαινομένων και ιδιοτήτων των μακροσκοπικών στερεών σωμάτων, όπως είναι τα μεγέθη της σκληρότητας και της αντοχής σε θραύση του χάλυβα, στη βάση της κβαντικής μηχανικής θεωρίας και της συμπεριφοράς των ατομικών σωματιδίων. Η επιτυχία θα έχει επιτευχθεί όταν καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των ποσοτήτων που περιγράφουν τη σύσταση των υλικών και των αντιδράσεων τους με τις μακροσκοπικές μηχανικές οριακές συνθήκες, από τις γνώσεις των συστατικών στοιχείων και των ιεραρχικών δομών τους από την ατομική κλίμακα στις πολύ μικρές και μεγάλες κλίμακες. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον σχεδιασμό του χάλυβα των κατασκευών.

Η σκληρότητα και η αντοχή σε θραύση είναι βασικές ιδιότητες-δείκτες για τους χάλυβες. Παρόλο που η προηγμένη τεχνολογία παρέχει σήμερα πολλούς τρόπους για να επιτευχθεί είτε υψηλής αντοχής είτε υψηλή σκληρότητα του χάλυβα μέσω των διαδικασιών παραγωγής, παραμένει μια πρόκληση για την επίτευξη και των δύο αυτών ιδιοτήτων ταυτόχρονα. Αυτό

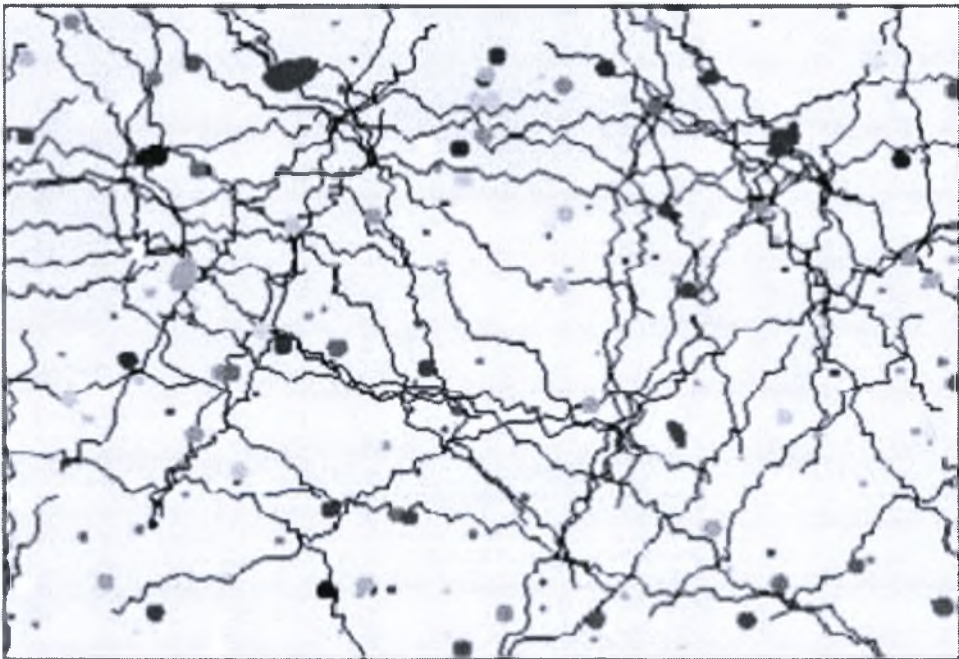
οφείλεται στο γεγονός ότι η αντοχή χαρακτηρίζει την αντίσταση ενός υλικού στη θραύση σε μια οριακή τιμή. Η διαφορά μεταξύ της τοπικής και της γενικής ιδιότητας αντανάκλα την φυσική ετερογένεια της μικροδομής των χαλύβων. Με το σχεδιασμό του χάλυβα επιδιώκουμε την επίτευξη των επιθυμητών μικρο / νανο δομών με βελτιστοποιημένες ιδιότητες μέσω των στοιχείων του κράματος, της επιλογής της φάσης και των μεταλλουργικών διεργασιών με βάση την ποσοτική κατανόηση των βασικών μηχανισμών παραμόρφωσης και τις σχέσεις μεταξύ αυτών στις διάφορες κλίμακες.

Σε αυτή την ενότητα, θα περιγραφεί η από κάτω προς τα πάνω υπολογιστική μεθοδολογία που προτείνει τη θέσπιση ενός ιεραρχικού μοντέλου συστατικών πολλαπλών κλιμάκων που ενισχύει τις σχέσεις μεταξύ των διαφόρων κλιμάκων, Hao et al. . (2003, 2004a). Οι καινοτομίες που παρουσιάζονται εδώ μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Ένα ατομιστικό μοντέλο προσδιορισμού που υπολογίζει και τις δύο εξαρθρώσεις: τον διαχωρισμό των πρόσφατων νεοδημιουργηθέντων εξαρθρώσεων και των πλαγίως προκαλούμενων εξαρθρώσεων. Ο κανονικός διαχωρισμός περιγράφεται ως η δημιουργία των κενών χώρων, η οποία μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση και οφείλεται στις εξαρθρώσεις και μετατρέπει δε τις βραχυπρόθεσμες κυμαινόμενες ομοιοπολικές δυνάμεις σε ένα μακρά κυμαινόμενο νόμο συνοχής. Το κριτήριο του Rice (1992) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό αυτών των δύο ανταγωνιστικών μηχανισμών. Το υπολογιζόμενο αποτελέσματα παρέχει μια ποσοτική εξήγηση, για πιο λόγο δηλαδή η πρακτική αντοχής του χάλυβα είναι πολύ χαμηλότερη από το μέγεθος που προβλέπεται βάσει του ατομικού διαχωρισμού και της πλαστικότητας που εμφανίζεται στον χάλυβα.
2. Μια εξ αρχής, *ab initio*, τεχνική για τον υπολογισμό της γενικευμένης ενέργειας σφάλματος σε σχέση με την προκαλούμενη αποδιάρθρωση ολίσθησης σε ένα κρύσταλλο BCC-Fe.
3. Μια «δυναμική προσέγγιση ημι σωματιδίων », η οποία μετατρέπει ένα ατομιστικό σύστημα σε ένα "σύστημα σωματιδίων", διατηρώντας παράλληλα τις εγγενείς διαρθρωτικές ιδιότητες όπως τις κρυσταλλικές ελαστικές σταθερές και την μοριακή κινητικότητα. Κάθε σωματίδιο μπορεί να περιέχει τυχαία πολλά άτομα, ή να αποτελείται από

σωματίδια που εξαρτώνται από τις κλίμακες τους. Δεδομένου ότι το σύστημα με τα σωματίδια μπορεί να έχει λιγότερους βαθμούς ελευθερίας από το ατομικό σύστημα, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη γεφύρωση των ατομικών και των συνεχών κλιμάκων.

4. Ένα ιεραρχικό καταστατικό υπολογιστικό μοντέλο που βασίζεται σε ένα ενιαίο θερμοδυναμικό πλαίσιο. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται σε μια υπολογιστική διαδικασία που ονομάζεται «όλκιμος προσομοιωτής θραύσης», για την υποστήριξη της ανάλυσης των ποσοτικών ανταλλαγών της μικροδομής και για την βελτιστοποίηση της αντοχής σε θραύση.
5. Ένα διάγραμμα σκληρότητας-αντοχής-πρόσφυσης που προκύπτει για το σχεδιασμό του χάλυβα. Αυτό το διάγραμμα καθορίζει τη σχέση μεταξύ της σκληρότητας του κράματος, της διεπιφανειακής ενέργειας προσκόλλησης λόγω πρόσφυσης και της αντοχής σε θραύση.



**Σχήμα 3.7** Σχηματική εσωτερικής δομής του χάλυβα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

#### 5.1 Εισαγωγή

Τα προϊόντα нанοτεχνολογίας πρέπει να πληρούν τα υψηλά επίπεδα προστασίας των καταναλωτών, των εργαζόμενων και του περιβάλλοντος που καθορίζει η κοινοτική νομοθεσία. Τα εν λόγω προϊόντα θα γίνουν αποδεκτά από το κοινό μόνο εάν οι υπόψη νομοθετικές πράξεις καλύπτουν επαρκώς τις νέες προκλήσεις από τις τεχνολογίες και εφόσον οι κατασκευαστές μπορούν να αποδείξουν την ασφάλειά τους και οι καταναλωτές να τις θεωρήσουν ασφαλείς.

#### 4.2 Νομοθεσία στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Τον Ιούνιο του 2008 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε μια ανακοίνωση με τίτλο «Ρυθμιστικές πτυχές των νανοϋλικών» (COM(2008)366,) τηρώντας τη δέσμευση του σχεδίου δράσης. Η ανακοίνωση συνοδεύεται από έγγραφο εργασίας των υπηρεσιών της Επιτροπής που περιείχε περίληψη της νομοθεσίας σχετικά με πτυχές των νανοϋλικών που αφορούν την υγεία, την ασφάλεια και το περιβάλλον και σκιαγραφούσε τις ερευνητικές ανάγκες σχετικά με τις κανονιστικές ρυθμίσεις και τα σχετικά μέτρα, (SEC(2008)2036).

Από την εν λόγω ανασκόπηση της νομοθεσίας προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα κοινοτικά πλαίσια κανόνων κατ' αρχήν τους δυνητικούς κινδύνους για την υγεία, την ασφάλεια και το περιβάλλον που συνδέονται με τα νανοϋλικά. Χωρίς να αποκλείονται αλλαγές του κανονισμού βάσει νέων πληροφοριών, η Επιτροπή τόνισε ότι η προστασία της υγείας, της ασφάλειας και του περιβάλλοντος απαιτείται να ενισχυθεί κυρίως μέσω της βελτίωσης της εφαρμογής της ισχύουσας νομοθεσίας. Εκτός από τη στήριξη των ερευνών με αντικείμενο την εκτίμηση του κινδύνου, η Επιτροπή καταβάλλει προσπάθειες σε σειρά κανονιστικών τομέων για να βελτιώσει την εφαρμογή, να αξιολογήσει την επάρκεια της ισχύουσας

νομοθεσίας και να εξετάσει κατά πόσο απαιτούνται αλλαγές των κανονισμών σε συγκεκριμένες πτυχές.

Την ανακοίνωση εξέδωσαν το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, με ψήφισμα της 24ης Απριλίου 2009 σχετικά με τις ρυθμιστικές πτυχές των νανοϋλικών, (2008/2208(INI)), και η Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, ειδικότερα, θέτει το ερώτημα κατά πόσο, ελλείψει ρητών διατάξεων για την νανοτεχνολογία στο κοινοτικό δίκαιο, είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι η νομοθεσία επαρκεί για να καλύψει τους κινδύνους που συνδέονται με τα νανοϋλικά. Με δεδομένη την έλλειψη κατάλληλων στοιχείων και μεθόδων εκτίμησης, το Κοινοβούλιο ζητά προσεκτική επανεξέταση της υφιστάμενης νομοθεσίας. Κατόπιν αιτήματος του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, προστέθηκαν ή εξετάζεται το ενδεχόμενο να προστεθούν συγκεκριμένες διατάξεις περί νανοϋλικών στη νομοθεσία για τα καλλυντικά, τα νέα τρόφιμα και τα πρόσθετα τροφίμων. Βάσει του προγράμματος, η Επιτροπή θα υποβάλει επικαιροποιημένη επανεξέταση των ρυθμίσεων το 2011, αποδίδοντας ιδιαίτερη προσοχή στα σημεία που ήγειραν το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και η Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή. Ανάλογα με τις ανάγκες η Επιτροπή είναι δυνατόν να προτείνει αλλαγές στην νομοθεσία.

Από πλευράς νομοθεσίας υφίστανται σειρά αναγκών που χαρακτηρίζονται επείγουσες:

- Η χρηματοδότηση της έρευνας πρέπει να αυξηθεί και να εδραιωθεί για να μπορέσει να συμβαδίσει με την ανάπτυξη και την εμπορία νέων εφαρμογών.
- Προκειμένω να συλλέγουν συναφή δεδομένα, οι διαθέσιμες σήμερα μέθοδοι εκτίμησης κινδύνου πρέπει να προσαρμοστούν, να επικυρωθούν και να εναρμονιστούν για τα νανοϋλικά.
- Ιδιαίτερως, πρέπει να βελτιωθούν, να αναπτυχθούν και να επικυρωθούν μέθοδοι στα πεδία του χαρακτηρισμού, της εκτίμησης της έκθεσης, του προσδιορισμού των απειλών, της εκτίμησης του κύκλου ζωής και της προσομοίωσης. Προς το σκοπό αυτό θα απαιτηθεί επίσης έρευνα σχετικά με βασικά ζητήματα που αφορούν την αλληλεπίδραση των νανοϋλικών με τους ζώντες οργανισμούς.

–Απαιτούνται κατάλληλα νανοϋλικά αναφοράς για την ανάπτυξη και επικύρωση μεθόδων καθώς και για τη διασφάλιση της ποιότητας.

–Πρέπει να αναπτυχθούν δημόσιες βάσεις δεδομένων που θα χρησιμεύσουν για την εκτίμηση της ασφάλειας των νανοϋλικών.

–Το ενδιαφέρον πρέπει να εστιαστεί στις έρευνες οι οποίες επιταχύνουν την κατάρτιση κατευθυντηρίων γραμμών και προτύπων για δοκιμές στο πλαίσιο του ΟΟΣΑ\* , του ISO\*\* και της CEN\*\*\*.

Αν και οι γνώσεις σχετικά με την παρουσία νανοϋλικών στην αγορά διευρύνονται, η Επιτροπή έχει επίγνωση της ανάγκης να σχηματιστεί καλύτερη και ακριβέστερη εικόνα. Το 2011 η Επιτροπή προτίθεται να παρουσιάσει πληροφορίες σχετικά με τους τύπους και τις χρήσεις των νανοϋλικών, συμπεριλαμβανομένων και πτυχών που αφορούν την ασφάλεια, (ανακοίνωση της επιτροπής των ευρωπαϊκών κοινοτήτων, 2009).

### **5.3 Γεφύρωση του χάσματος των γνώσεων**

121

Ιδιαίτερο εμπόδιο που πρέπει να αρθεί είναι η ανάγκη για καλύτερη γνώση σε πεδία όπως ο χαρακτηρισμός των νανοϋλικών, η τοξικότητα, η οίκοτοξικότητα, η ασφάλεια και η εκτίμηση της έκθεσης σε αυτά. Αυτό θα επιτρέψει την προσαρμογή των εργαλείων εφαρμογής, όπως οι ενοποιημένες στρατηγικές δοκιμών και τα καθοδηγητικά έγγραφα, προκειμένου να ληφθούν πλήρως υπόψη στα νανοϋλικά. Τα έργα που είχαν σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση ζητημάτων ασφάλειας του περιβάλλοντος και της υγείας είχαν ως αποτέλεσμα καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης των νανοϋλικών με βιολογικά συστήματα και οδήγησαν στην ανάπτυξη μεθόδων δοκιμών, για παράδειγμα για την εκτίμηση της έκθεσης σε αυτά. Η διεθνής συνεργασία στον τομέα αυτό είναι ισχυρή.

---

\*Ο.Ο.Σ.Α., Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης, (Organization for Economic Co-operation and Development - OECD).

\*\*ISO International Organization for Standardization, Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης.

\*\*\*CEN European Committee for Standardization, Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης.



Η Επιτροπή συμμετέχει ενεργά στις τρέχουσες εργασίες της ομάδας εργασίας για τα βιομηχανικά νανοϋλικά του ΟΟΣΑ, που αναπτύσσει μεθόδους δοκιμών και κατευθυντήριες γραμμές για την εκτίμηση κινδύνου. Επιπλέον, οι εργασίες τυποποίησης του ISO θα συμβάλουν στη γενική σύγκλιση των προτύπων για την εφαρμογή της νομοθεσίας.

Κατά την τελευταία πενταετία οι ανεξάρτητες επιστημονικές επιτροπές της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν καταθέσει έξη γνωμοδοτήσεις σχετικά με την εκτίμηση του κινδύνου των νανοϋλικών. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραμένοντα κενά στις γνώσεις, στις γνωμοδοτήσεις τονίζεται ότι οι δυνητικοί κίνδυνοι των νανοϋλικών πρέπει να εκτιμώνται κατά περίπτωση και διατυπώνονται συστάσεις για περαιτέρω έρευνες στον τομέα της ασφάλειας.

#### **5.4 Διεθνής συνεργασία**

Βάσει της εντολής που έλαβε από το Συμβούλιο τον Σεπτέμβριο του 2004, η Επιτροπή ξεκίνησε διεθνή διάλογο στον τομέα της νανοτεχνολογίας. Έκτοτε, η διεθνής συνεργασία κατέστη αναπόσπαστο μέρος της πολιτικής της Επιτροπής σε όλα σχεδόν τα πεδία του σχεδίου δράσης. Οι παρελθούσες και οι εν εξελίξει δράσεις της Επιτροπής στο διεθνές μέτωπο περιλαμβάνουν:

- Συνεργασία σε ερευνητικά έργα, συμπεριλαμβανομένων και έργων με αντικείμενο την εκτίμηση κινδύνου.
- Παροχή στήριξης για τη συμμετοχή ερευνητών από τρίτες χώρες σε έργα που χρηματοδοτούνται από την ΕΕ, καθώς και για δικτύωση ερευνητών από τρίτες χώρες στον τομέα της νανοτεχνολογίας.
- Οργάνωση, το 2008, του τρίτου διεθνούς διαλόγου σχετικά με την υπεύθυνη ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας. Η εκδήλωση αυτή κάλυψε τη διακυβέρνηση, τους κώδικες πρακτικής, την ασφάλεια, τη νομοθεσία και τη συνεργασία. (η Σύνοδος του Συμβουλίου Ανταγωνιστικότητας).
- Η σύγκλιση των νομοθεσιών αποτελεί ζήτημα που εκκρεμεί στον διάλογο με τους κύριους εμπορικούς εταίρους της ΕΕ.

– Συμμετοχή στις εργασίες της WPN\* του ΟΟΣΑ σχετικά με την διακυβέρνηση της νανοτεχνολογίας.

– Ενεργός συμμετοχή στην WPMN\*\* του ΟΟΣΑ που είναι το κύριο διεθνές φόρουμ για την περαιτέρω χάραξη των κατευθυντήριων γραμμών και των στρατηγικών όσον αφορά τις δοκιμές, που απαιτούνται για την ορθή εφαρμογή της νομοθεσίας.

– Στον ISO και τη CEN η Επιτροπή συμβάλλει στην κατάρτιση διεθνώς αποδεκτών προτύπων στα πεδία της ορολογίας και του φυσικοχημικού χαρακτηρισμού των νανοϋλικών, με σκοπό τη δημιουργία βάσης για συγκλίνουσα προσέγγιση των δοκιμών των νανοϋλικών.

#### **4.5. Οι κίνδυνοι της νανοτεχνολογίας**

Η εμπορευματοποίηση της νανοτεχνολογίας είναι κυριολεκτικά κάτω από το μικροσκόπιο. Πολυάριθμες μη κυβερνητικές οργανώσεις εστιάζουν το ενδιαφέρον τους στα περιβαλλοντικά ζητήματα και τη υγεία των καταναλωτών. Οι οργανώσεις αυτές ζητούν να ισχύσει ένα μορατόριουμ για όλα τα προϊόντα που σχετίζονται με τη νανοτεχνολογία μέχρις ότου οι κίνδυνοι και η ασφάλεια της χρήσης των παραγόμενων προϊόντων να είναι πλήρως γνωστή. Οι ρυθμιστικοί οργανισμοί καλούνται να αναπτύξουν πρότυπα, αλλά τα στοιχεία δεν είναι διαθέσιμα για να εξακριβώσουν τα ασφαλή επίπεδα σε πολλά νέα υλικά. Πολλοί από τους διεθνείς οργανισμούς εργάζονται προς την κατεύθυνση εθελοντικών προτύπων για την υγεία και το περιβάλλον σε σχέση με την ασφάλεια της νανοτεχνολογίας.

Το αιτήματα για την κατανόηση και την αντιμετώπιση των κινδύνων σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή, κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, πρόσθεσε μια ακόμη δύσκολη διάσταση στην ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας.

---

\*WPN, Working Party on Nanotechnology, Ομάδα εργασίας για την νανοτεχνολογία του ΟΟΣΑ.

\*\*WPMN Working Party on Manufactured Nanomaterials. Ομάδα εργασίας για την Κατασκευή νανοϋλικών του ΟΟΣΑ

Η κατανόηση της συμπεριφοράς στη νανοκλίμακα είναι σε πολύ πρώιμα στάδια, και είναι πρόωρο να παρθούν μακροχρόνιες αποφάσεις για την νανοτεχνολογία χωρίς αυτή την κατανόηση. Ωστόσο, τώρα είναι η στιγμή για να ξεκινήσει η ανάλυση, ενώ οι πραγματικοί κίνδυνοι από τα νανοϋλικά είναι μικρή γιατί παράγονται σε χαμηλά επίπεδα και πολύ λίγοι άνθρωποι είναι εκτεθειμένοι σε πολύ μικρές ποσότητες, για να καθοδηγήσουν τη λήψη των αποφάσεων όταν η χρήση τους γίνει ευρέως διαδεδομένη. Η αντιμετώπιση των πιθανών εκθέσεων είναι ο καλύτερος τρόπος για να μετριαστούν οι μακροπρόθεσμοι κίνδυνοι των νανοϋλικών και της νανοτεχνολογίας που είναι σήμερα άγνωστοι, (Shatkin, 2008).

## **5.6 Περιβαλλοντικές πτυχές της νανοτεχνολογίας**

Πολλές από τις εφαρμογές της νανοτεχνολογίας θα ωφελήσουν το περιβάλλον, για παράδειγμα, η επεξεργασία του πόσιμου νερού, η εξάλειψη των τοξικών χημικών ουσιών, η μείωση της κατανάλωσης νερού και ενέργειας με την αξιοποίηση καθαρών ενεργειακών τεχνολογιών. Πως μπορούν οι εφαρμογές των νανοεπιστημών να επηρεάσουν το περιβάλλον; Δεν είναι σαφές σήμερα ποιες είναι πιθανές επιπτώσεις από τα υλικά νανοκλίμακας στον αέρα, στο νερό και στο έδαφος. Δεν είναι κατανοητό αν τα νανοϋλικά ενδέχεται να εισέλθουν στην παραγωγή των τροφίμων και να γίνουν μέρος της ανθρώπινης διατροφής, ή εάν και πώς μπορεί να επηρεάσουν τα δάση, τους κοραλλιογενείς ύφαλους, ή την ποιότητα του αέρα, για παράδειγμα.

Θα υπάρξει μια νανο-περιβαλλοντική κληρονομιά; Έχουν τα νανοϋλικά ήδη εισέλθει στο περιβάλλον με τρόπους που θα τους επιτρέψει να συνεχίσουν την εισβολή και να διαταράξουν την τροφική αλυσίδα; Θα ακολουθήσουν τα νανοϋλικά το δρόμο των άλλων ρύπων, όπως ο μόλυβδος; Πώς θα πρέπει να καθοριστεί αν τα δεδομένα δεν συλλέγονται για αυτό; Θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει ότι τα ποσά θα είναι μικρά, και στο εγγύς μέλλον, είναι αλήθεια ότι υπάρχουν λίγες εφαρμογές της νανοτεχνολογίας που μπορούν να επιτρέψουν την ελεύθερη είσοδο των νανοσωματιδίων στο περιβάλλον σε σημαντικές ποσότητες. Ωστόσο, καθώς όλο και περισσότερες εφαρμογές υιοθετούνται από την

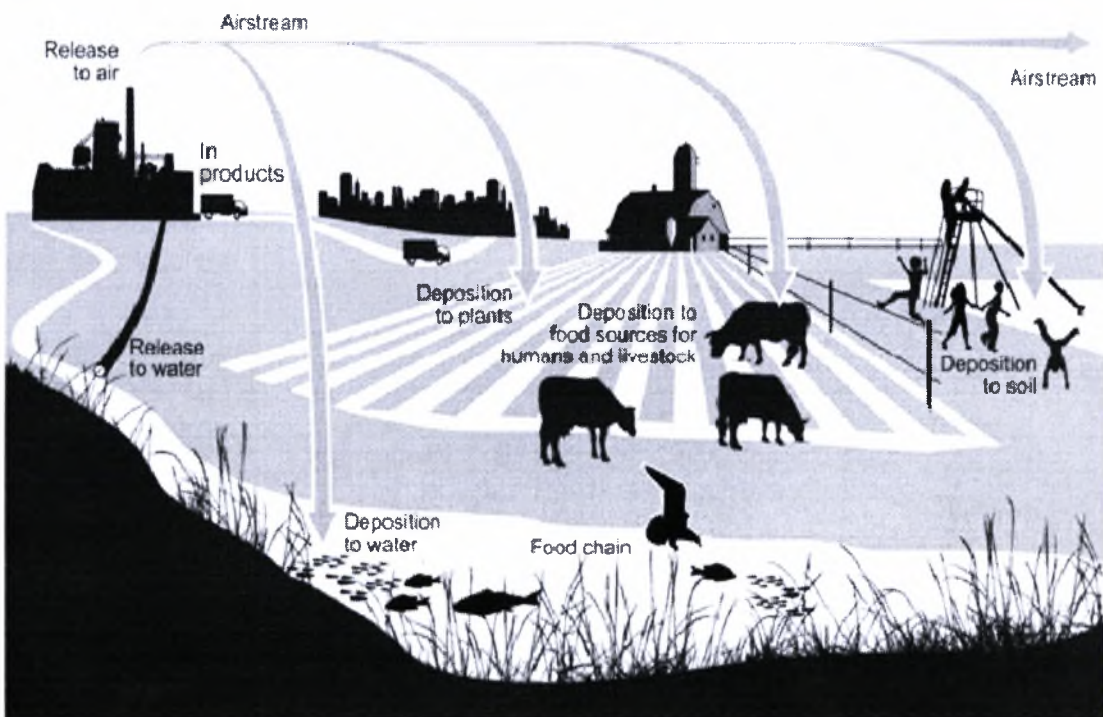
νανοτεχνολογία, η παραγωγή, οι χρήσεις και η έκλυση των νανοσωματιδίων θα αυξηθούν σημαντικά.

Ως παράδειγμα, στα νοσοκομεία, είναι πολύ σημαντικό να διατηρήσουμε τις επιφάνειες υγιεινής απαλλαγμένες από μολύνσεις, και πολλές καθαριστικές και απολυμαντικές χημικές ουσίες χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό του εξοπλισμού για το πλύσιμο των δαπέδων και των επιφανειών για να αποτραπεί η εξάπλωση των μικροβίων. Χρησιμοποιώντας ένα προϊόν που περιέχει ένα νανοϋλικό ως απολυμαντικό μπορεί να σημαίνει ότι θα πρέπει να ψεκάζονται, σκουπίζονται και να χύνονται στις αποχετεύσεις. Ένα προφανές ερώτημα τίθεται: πού θα μπορούσαν τα νανοϋλικά να καταλήξουν; Οποιαδήποτε χημικό που πλένεται με το νερό καταλήγει στο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να τα οδηγήσει στο έδαφος, στο νερό και τελικά μπορεί να μετακινηθούν στα πλησιέστερα ποτάμια και ρέματα. Φυσικά, αυτό μπορεί να επηρεάσει τις πηγές πόσιμου νερού και τους ωκεανούς. Ερευνητές έχουν ανιχνεύσει χημικές ουσίες, όπως το triclosan, (είναι μια χλωριωμένη αρωματική ένωση η οποία έχει λειτουργικές ομάδες της τόσο αιθέρων όσο και φαινολών), που βρέθηκε στα αντιμικροβιακά σαπούνια και τα προϊόντα καθαρισμού, στα ποτάμια και στις πόσιμες πηγές νερού. Ορισμένοι πληθυσμοί βακτηρίων συνήθως εκτίθενται σε ουσίες που αποβλέπουν στην εξάλειψή τους (π.χ., τα φυτοφάρμακα και τα ιατρικά αντιβιοτικά) και τώρα βρίσκονται στο περιβάλλον και έχουν γίνει ανθεκτικά στα αντιβιοτικά που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες της γεωργίας και για τις ανθρώπινες ασθένειες. Η μικροβιακή αντοχή αποτελεί ένα μεγάλο πρόβλημα επειδή τα βακτήρια δεν είναι πλέον ευαίσθητα στις θεραπείες που αναπτύσσονται για να τα σκοτώσουν. Περισσότερα ερωτήματα αναδεικνύονται όπως: αν τα νανοϋλικά χρησιμοποιηθούν στην αντιμικροβιακή θεραπεία, μπορεί να προκαλέσουν αύξηση της μικροβιακής αντοχής του περιβάλλοντος; Τι άλλες ακούσιες συνέπειες θα μπορούσε μια ουσία η οποία απελευθερώνεται στο νερό να προκαλέσει;

Ένα από τα πολλά μονοπάτια από τα οποία τα νανοϋλικά μπορούν να εισέλθουν στο περιβάλλον είναι μέσα από τους σωλήνες αποχέτευσης των νοσοκομείων. Η πιο ενδεδειγμένη λύση θα ήταν αυτή όπου το νερό επεξεργάζεται και στη συνέχεια απελευθερώνεται στο περιβάλλον. Το

σχήμα 5.1 δείχνει τις οδούς από τις οποίες τα νανοϋλικά μπορούν να κινηθούν προς το περιβάλλον. Τα νανοϋλικά μπορούν να μολύνουν το νερό και αυτό στη συνέχεια τα φυτά και τα ζώα με τελικό αποτέλεσμα να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα. Δεν είναι πάντα εύκολο να προβλέψουμε τι θα συμβεί κατά την εισαγωγή υλικών σε ένα οικοσύστημα. Δεδομένου ότι όλοι οι οργανισμοί χρειάζονται νερό για να επιβιώσουν, αυτή η συζήτηση επικεντρώνεται στο υδάτινο οικοσύστημα, αλλά υπάρχουν πολλά άλλα περιβάλλοντα και ειδικότερα πρέπει να εξεταστούν τα περιβάλλοντα των δασών, ερήμων, βουνών και τα ευρύτερα θαλάσσια συστήματα καθώς και τα οικοσύστημα του δομημένου περιβάλλοντος, κτίρια και πόλεις.

Η μαζική παραγωγή των νανοϋλικών αποτελεί απειλή για την ανθρώπινη υγεία, για πολλούς λόγους. Πρώτον, μεγάλα ποσά νανοϋλικών θα μπορούσαν να συσσωρευτούν στον άνθρωπο. Νανοϋλικά θα μπορούσαν να απορροφηθούν από τα βακτήρια και να περάσουν στην διατροφική αλυσίδα.

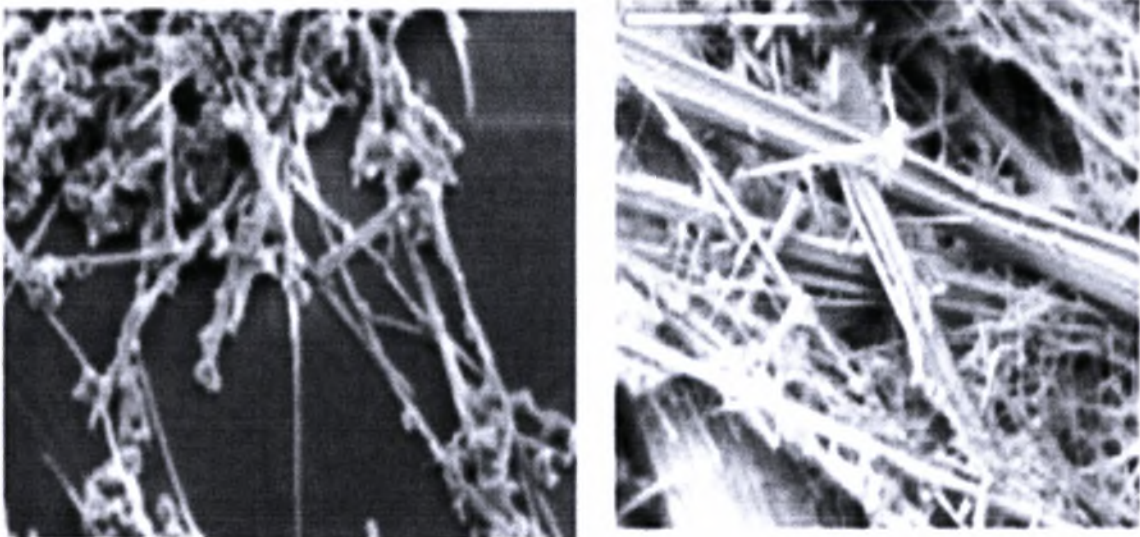


**Σχήμα 5.1** Οδοί δια μέσω των οποίων τα νανοϋλικά μπορεί να κινηθούν προς το περιβάλλον.

Δεύτερον, οι ουσίες μπορεί να συνδεθούν με προσμείξεις, όπως παρασιτοκτόνα. Δεδομένου ότι ορισμένα σωματίδια της νανοκλίμακας μπορούν να εισέλθουν στα κύτταρα χωρίς μια άνοση απάντηση, μπορεί να

επιτρέψουν στις τοξίνες μια αποτελεσματικότερη διείσδυση στην άμυνα του σώματος. Τρίτον, ίνες νανοσωλήνων άνθρακα ενδέχεται να προκαλέσουν σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα. Λόγω της μοναδικής, βελονοειδούς δομής τους, θα μπορούσαν να "σπείρουν τον όλεθρο" και να γίνουν «ο επόμενο αμιάντος». Μια γρήγορη ματιά στο σχήμα 5.2 δίνει την εντύπωση ότι νανοσωλήνες μοιάζουν με ίνες αμιάντου, όπως προβάλλονται με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). (Με πιο προσεκτική εξέταση, ωστόσο, το μέγεθος των φωτογραφιών αποκαλύπτει ότι οι νανοσωλήνες που εμφανίζονται είναι πάνω από 60 φορές μικρότερες από τις ίνες αμιάντου.)

Τέλος, όταν πρωτεΐνες περιβάλλονται από νανοσωματίδια ελεύθερης ροής στην κυκλοφορία του αίματος, το σχήμα και η λειτουργία των πρωτεϊνών μπορεί να αλλάξει. Τροποποιημένες πρωτεΐνες μπορεί να προκαλέσουν ανεπιθύμητες και επικίνδυνες συνέπειες, όπως αλλαγή στη ροή του αίματος. Πράγματι, οι ανησυχίες κυμαίνονται από τον καρκίνο ή την γενετική μετάλλαξη μέχρι τον κίνδυνο ότι τα υλικά θα μπορούσαν να περάσουν στα υπόγεια ύδατα και να καταστρέψουν ολόκληρα οικοσυστήματα.



**Σχήμα 5.2** Ομοιότητα των νανοσωλήνων άνθρακα (αριστερά) σε ίνες αμιάντου (δεξιά).

Κάθε νέα τεχνολογία φέρνει μαζί της νέες προκλήσεις και νέες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Τα δυνητικά προβλήματα που αφορούν τη

νανοτεχνολογία είναι πολυάριθμα. Το μικρό μέγεθος των υλικών της νανοκλίμακας και των συσκευών αυξάνει την πιθανότητα έκθεσης σε αυτά τα υλικά, κάνει τον καθαρισμό δύσκολο, και επιδεινώνει το πρόβλημα των τοξικών υλικών που διέρχονται από τη μεμβράνη των κυττάρων. Αυτό θα μπορούσε να διαταράξει την ηλεκτρονική διαμόρφωση του ιστού, επίσης η δημιουργία ομάδων επιφάνειας θα μπορούσαν να αντιδράσουν με περίεργο τρόπο με το περιβάλλον. Επίσης, τα νανοϋλικά είναι συχνά ενεργά με χημικές ομάδες που τα καθιστούν καταλυτικά στο να γίνουν ή υδρόφοβα, (απωθούν το νερό), ή υδρόφιλα (έλκουν το νερό). Οι αλλαγές αυτές της χημείας που μπορεί να προκαλέσουν τα νανο-υλικά θα έχουν σαν αποτέλεσμα την τροποποίηση της επιφάνειας των κυττάρων. Δεν περιοριζόμαστε μόνο σε προβλήματα που προκαλούν από μόνα τους, τα νανοσωματίδια μπορούν να λειτουργήσουν ως φορείς για τις προσμείξεις, όπως μεταλλικά σωματίδια. Αυτά τα μεταλλικά σωματίδια μπορεί να ενισχύσουν τις χημικές αλλαγές στα κύτταρα, που ενεργούν ως σωματίδια καταλύτη.

Το μοναδικό χαρακτηριστικό μειονέκτημα των επεξεργασμένων νανοϋλικών, είναι η **έλλειψη εμπειρίας** με αυτά τα υλικά η οποία εμποδίζει την αξιολόγηση του κινδύνου, που είναι απαραίτητη για τις έγκαιρες και σωστές αποφάσεις για την πρόληψη της ρύπανσης, την περιβαλλοντική εξυγίανση και την υιοθέτηση μέτρων ελέγχου της ρύπανσης.

128

#### **4.7 Συμπεράσματα**

Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται κατά τα επόμενα χρόνια να γίνουν τα ακόλουθα:

–Εμβάθυνση των ερευνητικών προσπαθειών και των χαρτών πορείας για βασικούς τομείς της νανοτεχνολογίας προκειμένου να ενισχυθούν η καινοτομία και η ανταγωνιστικότητα. Αυτό θεωρείται αναπόσπαστο από την προώθηση της θεμελιώδους κατανόησης του τρόπου αλληλεπίδρασης με τους ζώντες οργανισμούς των νανοϋλικών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, για να εξασφαλιστεί υψηλό επίπεδο ασφάλειας και προστασίας της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος.

- Περαιτέρω ανάπτυξη των υποδομών και του εκπαιδευτικού συστήματος, σε συνάρτηση με τον πολυκλαδικό χαρακτήρα της νανοτεχνολογίας.
- Ενίσχυση των μηχανισμών που διατίθενται για βιομηχανική καινοτομία, υπογραμμίζοντας την έννοια της ανοικτής καινοτομίας και διευκολύνοντας τη μεταφορά τεχνολογίας.
- Υλοποίηση αμεσότερου, εστιασμένου και συνεχούς διαλόγου με την κοινωνία και παρακολούθηση της κοινής γνώμης και ζητημάτων που σχετίζονται με την προστασία των καταναλωτών, του περιβάλλοντος και των εργαζόμενων.
- Συνέχιση της εξέτασης της επάρκειας της νομοθεσίας, με κατάλληλη προσαρμογή των πράξεων εφαρμογής, πρόταση νομοθετικών αλλαγών όπου απαιτείται και συσχέτιση όπου είναι δυνατόν με τις διεθνείς εξελίξεις.
- Επιτήρηση της αγοράς για τα προϊόντα νανοτεχνολογίας, συμπεριλαμβανομένων και των χαρακτηριστικών ασφαλείας τους και των πιθανών εξελίξεων.
- Αναβάθμιση της ερευνητικής προσπάθειας στον τομέα της εκτίμησης της ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένης και της διαχείρισης του κινδύνου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής των προϊόντων. Στήριξη της περαιτέρω ανάπτυξης και επικύρωσης του χαρακτηρισμού και των μεθόδων δοκιμών των νανοϋλικών.
- Ενίσχυση του συντονισμού και της ανταλλαγής πληροφοριών των διαφόρων κρατών. Με βάση τα μέχρι τώρα επιτεύγματα και λαμβανομένων υπόψη αυτών των αναγκών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

#### 6.1 Εισαγωγή

Η νανοτεχνολογία έχει τη δυνατότητα να καταστεί η πλέον πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για αυτόν τον αιώνα. Προσφέρει ένα τεράστιο δυναμικό εφαρμογών και οικονομικών ωφελειών και συμβάλλει σημαντικά στην ευρωπαϊκή οικονομία. Οι τεχνολογικές πρόοδοι γίνονται στην παγκόσμια κούρσα για την πρόοδο. Η Ευρωπαϊκή αρχική θέση για την εν λόγω διεπιστημονική τεχνολογία που βασίζεται στη γνώση υπόσχεται επίσης πολλά. Αλλά πολλά πρέπει να γίνουν ώστε να μετασχηματιστεί η άριστη επιστημονική και τεχνολογική ανάπτυξη στην Ευρώπη σε οικονομική απόδοση, με τη μορφή νέων προϊόντων, διεργασιών παραγωγής και των επιχειρήσεων έντασης τεχνολογίας. Αυτό φαίνεται και στην ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής: «Νανοεπιστήμες και νανοτεχνολογίες: σχέδιο δράσης για την Ευρώπη 2005-2009 » (COM (2005) 243). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αποσκοπεί στην εξασφάλιση ευνοϊκών συνθηκών για τη βιομηχανική καινοτομία στον τομέα της νανοτεχνολογίας προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η έρευνα και η τεχνολογική ανάπτυξη μεταφράζεται σε προσιτά, ασφαλή και άξια παραγωγής προϊόντα και διεργασίες. Για να γίνει αυτό, είναι σημαντικό να έχουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα της εξέλιξης της τεχνολογίας των αγορών, των επιχειρήσεων, της χρηματοδότησης και των επιδοτήσεων του ευρωπαϊκού ταμείου με την προοπτική της ανάπτυξης. Οι παρούσες αναλύσεις βασίζονται σε δείκτες της οικονομικής ανάπτυξης της νανοτεχνολογίας. Η έμφαση έχει δοθεί στην ανάλυση της Ευρωπαϊκής κατάστασης σε σύγκριση με τους κύριους ανταγωνιστές της.

Η νανοτεχνολογία έχει σημαντικό αντίκτυπο στον κόσμο της οικονομίας γιατί οι νανοτεχνολογικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται σε όλους σχεδόν τους τομείς. Οι επιστήμονες, ερευνητές, διαχειριστές, επενδυτές και φορείς χάραξης πολιτικής σε όλο τον κόσμο αναγνωρίζουν αυτό το τεράστιο δυναμικό και έχουν αρχίσει ένα είδος νανο-αγώνων. Στη συνέχεια γίνεται μια ανάλυση της κατάστασης της τέχνης της νανοτεχνολογίας από

οικονομικής άποψης, με την παρουσίαση στοιχείων σχετικά με τις αγορές, τη χρηματοδότηση, τις εταιρείες, των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας και των δημοσιεύσεων. Επικεντρώνεται στην σύγκριση μεταξύ των περιφερειών του κόσμου, και συγκεκριμένα της Ευρώπης και της Ευρωπαϊκής Ένωσης σε σχέση με τους κύριους ανταγωνιστές τους όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ιαπωνία και οι αναδυόμενες «νανο - δυνάμεις», η Κίνα, η Ινδία και η Ρωσία.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλυθεί και θα παρουσιαστεί η οικονομική εξέλιξη της νανοτεχνολογίας, τα διαθέσιμα στοιχεία σχετικά με τις αγορές της νανοτεχνολογίας και οι προβλέψεις γι αυτές τις αγορές, για την απασχόληση, τις επιχειρήσεις και όλους τους οργανισμούς που δραστηριοποιούνται στον τομέα της νανοτεχνολογίας, για την δημόσια και ιδιωτική χρηματοδότηση, συμπεριλαμβανομένης της χρηματοδότησης επιχειρηματικών κεφαλαίων, για τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας, και τις επιστημονικές δημοσιεύσεις. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί από τις δημόσιες διαθέσιμες πηγές και θα αναφερθούν αναλόγως. Ειδικά στην περίπτωση των δεδομένων της αγοράς, τα οποία μπορεί να είναι μόνο εκτιμήσεις, τα στοιχεία διαφέρουν πολύ μεταξύ τους ανάλογα με τον ορισμό, την πηγή, τη μεθοδολογία και το σκοπό της συλλογής και της παρουσίασης.

Ο σκοπός των αναλύσεων είναι διττός: Από τη μια πλευρά, η νανοτεχνολογία και οι περιοχές εφαρμογών της θα αναλυθούν για την παρουσίαση της υπάρχουσας κατάστασης, για τον προσδιορισμό των πλέον ελπιδοφόρων τομέων και της πρόβλεψης των μελλοντικών εξελίξεων. Από την άλλη πλευρά, οι αναλύσεις θα ρίξουν φως σχετικά με τη συμβολή της νανοτεχνολογίας στους οικονομικούς και κοινωνικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως η ανταγωνιστικότητα, η οικονομική ανάπτυξη και η απασχόληση, εστιάζοντας στην Ευρώπη σε σύγκριση με τους ανταγωνιστές της, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ιαπωνία και τις αναδυόμενες νανο-δυνάμεις, όπως η Κίνα, η Ινδία και η Ρωσία.

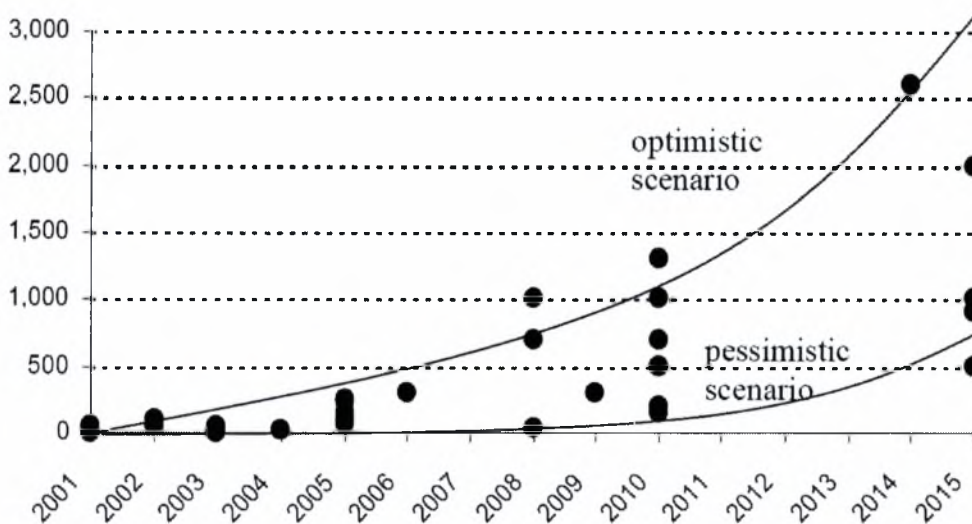
## **6.2 Εμπορευματοποίηση της νανοτεχνολογίας: οι προοπτικές του όγκου της αγοράς και των μετοχών.**

Επειδή η νανοτεχνολογία αναμένεται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην παγκόσμια οικονομία, η έκταση της αγοράς είναι ένας κατάλληλος σημαντικός οικονομικός δείκτης. Από την άλλη πλευρά, η νανοτεχνολογία δεν αντιστοιχεί σε ένα κλάδο που μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και να ποσοτικοποιηθεί. Η νανοτεχνολογία, εάν επιτύχει, θα συμβάλει σημαντικά αλλά όχι εύκολα μετρήσιμα, στην βελτίωση των προϊόντων και θα επιτρέψει την παραγωγή εντελώς νέων προϊόντων. Οι περισσότερες προβλέψεις της αγοράς για τη νανοτεχνολογία προέρχονται από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, με χρονικό ορίζοντα μέχρι το 2015. Η ίσως πιο γνωστή εικόνα για το μέλλον της νανοτεχνολογία στην αγορά έχει δημοσιευθεί από το Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών, (National Science Foundation, NSF), των Ηνωμένων Πολιτειών το 2001. Η NSF εκτίμησε μια παγκόσμια αγορά για το προϊόντα της νανοτεχνολογίας που ανέρχεται σε ένα τρισεκατομμύριο δολάρια ΗΠΑ για το 2015. Ανάλογα με τον ορισμό της νανοτεχνολογίας και τη συμβολή της στην προστιθέμενη αξία του τελικού προϊόντος καθώς και τον βαθμό αισιοδοξίας, πολλές άλλες προβλέψεις κυμαίνονται μεταξύ των 150 δισεκατομμυρίων το 2010, (ινστιτούτου Mitsubishi, 2002) και των 2,6 τρισεκατομμυρίων το 2014, (Έρευνα Lux, 2004). Το τελευταίο, πιο αισιόδοξο σενάριο θα σήμαινε ότι η αγορά με βάση τα προϊόντα της νανοτεχνολογίας θα είναι μεγαλύτερη από την τεχνολογία της τηλεματικής και θα υπερβεί την μελλοντική αγορά της βιοτεχνολογίας κατά δέκα φορές. Το σχήμα 6.1 δείχνει μερικές προβλέψεις από διαφορετικές πηγές (βλέπε υποσημείωση).

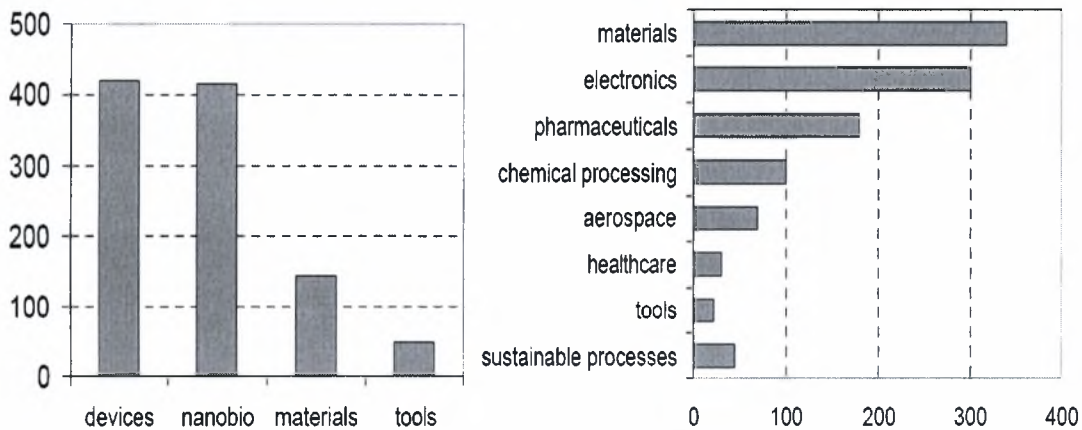
Ο προβλέψεις διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, αλλά έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι προβλέπουν σημαντική αύξηση της αγοράς των προϊόντων νανοτεχνολογίας με μια απογείωση στις αρχές της δεκαετίας του 2010-20. Τα αριθμητικά στοιχεία που παρουσιάστηκαν παραπάνω δείχνουν την πιθανή κατεύθυνση, αλλά δεν είναι επαρκή για βαθύτερη ανάλυση της εξέλιξης της αγοράς της νανοτεχνολογίας.

Στην έρευνα Lux και στην έρευνα του NSF γίνονται κάποιες προσπάθειες για την ανατροπή των στοιχείων ορίζοντας στη νανοτεχνολογία κάποια

υπό πεδία, το πρώτο σε μία ανάλυση των 5 ετών κατά το παρελθόν (1999-2003), το τελευταίο δείχνει την αναμενόμενη κατανομή του ενός τρισεκατομμυρίου του μεριδίου της αγοράς το 2015, σχήμα 6.2. Τα στοιχεία δείχνουν ότι στην αγορά του σήμερα για τα προϊόντα нанοτεχνολογίας, οι νανο-συσκευές και η νανο-βιοτεχνολογία εκτιμάται ότι έχουν μεγαλύτερη μερίδια, της τάξης του 420 και 415 εκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ.



**Σχήμα 6.1** Παγκόσμια πρόβλεψη της αγοράς για τη нанοτεχνολογία σε δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. Πηγές\*



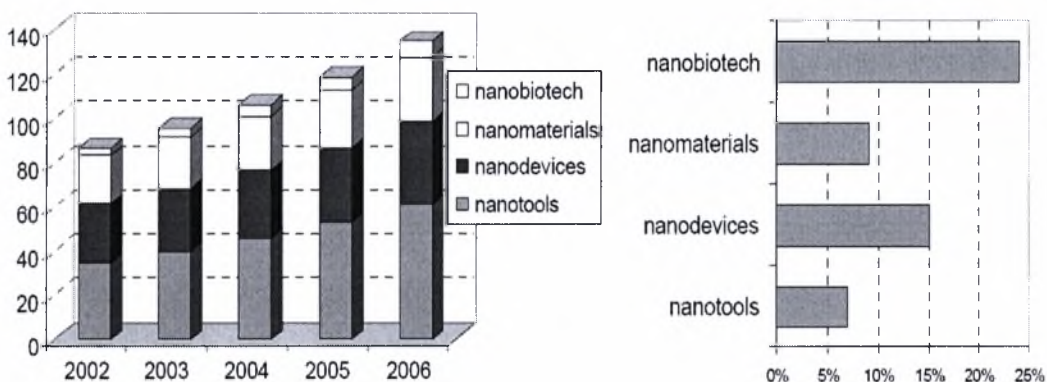
**Σχήμα 6.2** Παγκόσμια αγορά 1999-2003 και οι προβλέψεις για το 2015 σε δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. Πηγές: αριστερά: Έρευνας Lux 2004, δεξιά: NSF, 2001

\*Οι προβλέψεις προέρχονται από τις ακόλουθες πηγές: Γερμανική Κυβέρνηση, Εξέλιξη Capital, NSF2001, Capital Evolution 2001, Sal. Oppenheim 2001, η DG Bank το 2001, Υπουργείο Εμπορίου και Βιομηχανίας το 2001, των ΗΠΑ Συμμαχία Nanobusiness 2001, Cientifica 2002, Το Realis 2002, το Ίδρυμα Ερευνών Mitsubishi 2002, η Deutsche Bank 2003, Nomura Research Ινστιτούτο 2003, BCC 2004, corp GEMZ. Το 2004, Helmut Kaiser Consultancy 2004, Έρευνα Lux 2004.

Τα υλικά και τα εργαλεία παίζουν δευτερεύοντα ρόλο και είναι της τάξης των 145 και 50 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ αντίστοιχα.

Σε σύγκριση με τις προβλέψεις για το 2015, όλοι οι τομείς αναμένεται να υποστούν σημαντικές αυξήσεις, π.χ. για τα υλικά από 145 εκατομμύρια σε 340 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. Η νανο-ηλεκτρονική θα ανέλθει σε 300 δισ. δολάρια ΗΠΑ, ακολουθούμενη από τα φαρμακευτικά προϊόντα, τις χημικές επεξεργασίες και την αεροδιαστημική.

Ωστόσο, οποιαδήποτε σύγκριση των πραγματικών αριθμών με τις προβλέψεις από τις διαφορετικές πηγές και με διαφορετικές αναλύσεις πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από τους (Fecht et. al, 2003) με τις εκθέσεις "Ψάχνοντας κρυμμένα Μαργαριτάρια", (Finding hidden pearls), είναι περισσότερο αξιόπιστες επειδή εστιάζουν περισσότερο στο χρονικό ορίζοντα, δηλαδή 2002 έως 2006, σχήμα 6.3).



**Σχήμα 6.3** Παγκόσμια αγορά στα διάφορα τμήματα της νανοτεχνολογίας, αριστερά: σε δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ, δεξιά: ο μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της περιόδου 2002-2006, σε ποσοστό %. Πηγή: (Fecht et al., 2003).

Σε αυτές τις εκτιμήσεις, τα νανο-εργαλεία διαδραματίζουν τον πλέον σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια αγορά, αν και με μικρότερο ρυθμό ανάπτυξης. Οι νανο-συσσκευές και τα νανοϋλικά ξεκινούν από ένα ελαφρώς χαμηλότερο επίπεδο, αλλά οι νανο-συσσκευές έχουν αυξηθεί σε μεγαλύτερο ποσοστό. Σε αντίθεση προς τις ανωτέρω παρατηρήσεις της έρευνας Lux, η νανο βιοτεχνολογία είναι οριακή, αλλά αυξάνει σημαντικά κατά την περίοδο αναφοράς. Με συνολική αύξηση κατά μέσο όρο 15% ετησίως, η οποία δεν

αντικατοπτρίζει ακόμα την πραγματική επανάσταση. Από τα στοιχεία αυτά, είναι προφανές το συμπέρασμα ότι η нанοτεχνολογία δεν έχει ακόμη φτάσει στο σημείο απογείωσης της παγκόσμιας οικονομίας. Έτσι, οι όποιες εξελίξεις μεταξύ 2006 και 2015 θα οδηγήσουν σε μια αγορά ενός τρισεκατομμυρίου για την нанοτεχνολογία. Πολλές άλλες μελέτες έχουν προσπαθήσει να εμφανίσουν την προοπτική της αγοράς της нанοτεχνολογίας. Ο παρακάτω πίνακας 6.1 συγκεντρώνει τις προβλέψεις

**Πίνακας 6.1** Προβλεπόμενη παγκόσμια δημόσια χρηματοδότηση, σε εκατομμύρια €, για τη нанοτεχνολογία το 2004 από μεμονωμένες χώρες. \*Τα στοιχεία είναι από το 2003. Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2005

A/A	ΧΩΡΑ	ΕΚΑΤΟΜΜΥΡΙΑ €	A/A	ΧΩΡΑ	ΕΚΑΤΟΜΜΥΡΙΑ €
1.	ΗΠΑ (Federal)	910	21.	Φινλανδία	14.5
2.	Ιαπωνία	750	22.	Αυστρία	13.1
3.	Ευρ. Επιτροπή	370	23.	Ισπανία	12.5
4.	ΗΠΑ (μέλη)	333.3	24.	Μεξικό	10.
5.	Γερμανία	293.1	25.	Νέα Ζηλανδία	9.2
6.	Γαλλία	223.9	26.	Δανία	8.6
7.	Νότια Κορέα	173.3	27.	Σιγκαπούρη	8.4
8.	Ηνωμένο Βασίλειο	133	28.	Νορβηγία	7.
9.	Κίνα	83.3	29.	Βραζιλία	5.8
10	Ταϊβάν	75.9	30.	Ταϊλάνδη	4.2
11	Αυστραλία	62.	31.	Ινδία	3.8
12	Βέλγιο*	60.	32.	Μαλαισία	3.8
13	Ιταλία *	60.	33.	Ρουμανία	3.1
14	Ισραήλ	46.	34.	Ν. Αφρική	1.9
15	Ολλανδία	42.3	35.	Ελλάδα*	1.2
16	Καναδάς	37.9	36.	Πολωνία *	1
17	Ιρλανδία	33	37.	Λιθουανία	1
18	Ελβετία	18.5	38.	Άλλες	2.8
19	Ινδονησία	16.7			
20	Σουηδία	15.		Συνολικά	3.85

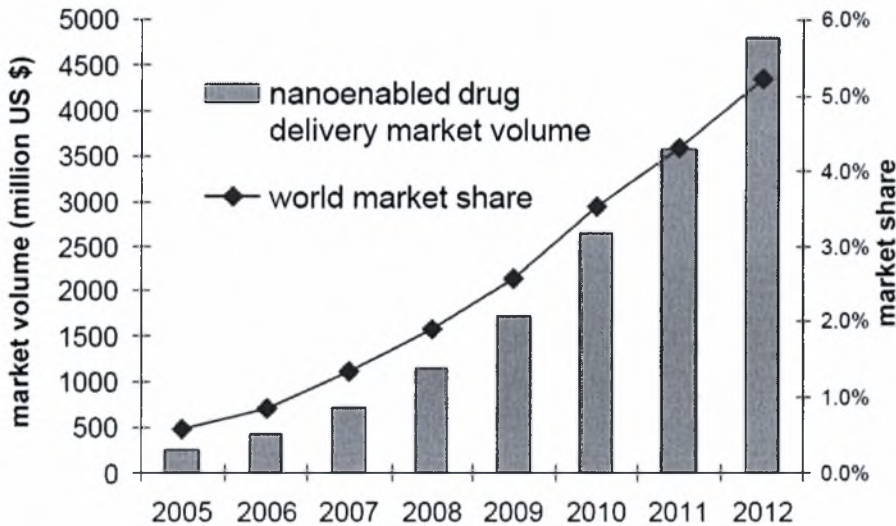
που έχουν γίνει σε διάφορες μελέτες και δίνουν μια συνολική επισκόπηση της αγοράς προσδοκιών και μια πρώτη ένδειξη για ποια τμήματα της αγοράς μπορεί να διαδραματίσουν ένα σημαντικό ρόλο στο μέλλον.

Σε αυτή την συλλογή των διαφόρων νανοτεχνολογικών υπό-ζωνών, εφαρμογών και αγορών, τα νανο ενεργοποιημένα προϊόντα αναμένεται να είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Οι εκτιμήσεις για ολόκληρο τον τομέα της νανο-ηλεκτρονικής είναι περίπου 300 δισ. ευρώ για το 2015, οι οποίες καλύπτουν τους ημιαγωγούς, τους σουπερ-πυκνωτές και τους νανο-αισθητήρες. Οι εκτιμήσεις της αγοράς των νανοϋλικών μπορούν να αναλυθούν σε περισσότερο ή λιγότερο σημαντικές υπό ζώνες, μεταξύ των οποίων και τα νανοσωματίδια, οι νανο-επικαλύψεις και οι πλευρικές νανοδομές που ανέρχονται πάνω από 300 δισ. ευρώ για όλα τα υλικά γύρω στο 2010. Οι αριθμοί αυτοί έρχονται πολύ κοντά στην εκτίμηση του Εθνικού ιδρύματος επιστημών των ΗΠΑ, (National Science Foundation, NSF), για 340 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2015. Τα στοιχεία, αν και αποσπασματικά και εν μέρει, δεν μπορούν να συγκριθούν, εύκολα οδηγούν στην υπόθεση ότι τα νανοϋλικά θα έχουν σημαντική συμβολή στις μελλοντικές αγορές και εφαρμογές. Σε σύγκριση με τα δεδομένα, σχήμα 6.4, θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει ότι οι μέτριες αυξήσεις μέχρι το 2006 θα ολοκληρώνονται με πολύ ισχυρότερη δυναμική στο διάστημα μεταξύ 2006 και 2010, ανάλογα με την περιοχή υλικών.

Οι τρεις φάσεις του μοντέλου Έρευνας της Lux του 2004 παρουσιάζονται μέχρι στιγμής οι περισσότερο ολοκληρωμένες για την προοπτική των εξελίξεων στην αγορά της νανοτεχνολογίας. Από το 2010 και μετά, η νανοτεχνολογία θα καταστεί κοινός τόπος σε μεταποιημένα προϊόντα σχετικά με την υγειονομική περίθαλψη και τις επιστήμες της ζωής, εφαρμογές που εισέρχονται στις αγορές των φαρμακευτικών και ιατρικών συσκευών. Οι νανο-βιοτεχνολογίες θα συμβάλουν σημαντικά στην εξέλιξη της φαρμακευτική βιομηχανίας. Η Έρευνα Lux του 2004 υπολόγισε το μερίδιο της αγοράς για τα προϊόντα της νανοτεχνολογίας στο 4% των γενικών μεταποιημένων προϊόντων το 2014, στο 100% σε νανοτεχνολογίες για προσωπικούς υπολογιστές, στο 85% στα καταναλωτικά ηλεκτρονικά, στο 23% στον τομέα των φαρμακευτικών και στο 21% στα αυτοκίνητα.

Αυτό θα οδηγούσε τη нанοτεχνολογία σε συνολικό μερίδιο του 15% της παγκόσμιας παραγωγής στον μεταποιητικό τομέα το 2014.

Μια ανάλυση της αγοράς στη διακίνηση των φαρμάκων, υποστηρίζει τις εκτιμήσεις για τα νανο-ενεργοποιημένα φάρμακα και τις παραπάνω εμφανιζόμενες προβλέψεις. Το σχήμα 6.4 δείχνει τον όγκο και το μερίδιο της αγοράς των ενεργοποιημένων φαρμάκων σε σύγκριση με την παγκόσμια αγορά διακίνησης φαρμάκων.



137

**Σχήμα 6.4** Όγκος και μερίδιο της αγοράς στον κόσμο των νανο ενεργοποιημένων φαρμάκων. Πηγή: Moradi, 2005.

Η αναμενόμενη ανάπτυξη της αγοράς για την διακίνηση των νανο-ενεργοποιημένων φαρμάκων καταδεικνύει μέση ετήσια αύξηση κατά 50% μεταξύ 2005 και 2012. Η αύξηση στο μερίδιο της αγοράς ακολουθεί την ίδια πορεία, αλλά με ελαφρώς χαμηλότερα ποσοστά. Το 2012, περίπου 4,8 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ θα αποκτηθούν με τη нанοτεχνολογία στον τομέα της αγοράς στην διακίνηση του φάρμακου, η οποία θα είναι ένα μερίδιο της αγοράς στο 5,2%. Εάν η ανάπτυξη συνεχιστεί, αυτό το μερίδιο αγοράς θα αυξηθεί στο 7% το 2015 και 10% το 2020.

Η εμπειρία δείχνει ότι οι πολίτες, οι ανησυχίες καθώς και οι αντιλήψεις για τους κινδύνους και τα οφέλη πρέπει να ληφθούν υπόψη, δεδομένου ότι παρουσιάζουν σημαντικό αντίκτυπο στην αποδοχή των νέων τεχνολογιών στην αγορά και μπορούν να προσδιορίσουν την επιτυχή πορεία στην αγορά ή την αποτυχία. Οι συνεχιζόμενες συζητήσεις για τη нанοτεχνολογία δείχνουν ότι υπάρχουν ορισμένες αντιπαραθέσεις και ότι η επιτυχία της αγοράς θα μπορούσε να τεθεί σε κίνδυνο εάν η δημόσια γνώμη θεωρεί ότι



δεν αντιμετωπίζονται και, κατά συνέπεια, επαναλαμβάνει μια επικριτική στάση σχετικά με τη нанοτεχνολογία κάτι τέτοιο έχει αρχίσει για την υγεία και τους περιβαλλοντικούς κινδύνους των νανοσωματιδίων. Όταν μιλάμε για οικονομικές δυνατότητες της нанοτεχνολογίας, οι εν λόγω συζητήσεις πάντα πρέπει να αντιμετωπιστούν και να ληφθούν σοβαρά υπόψη\*.

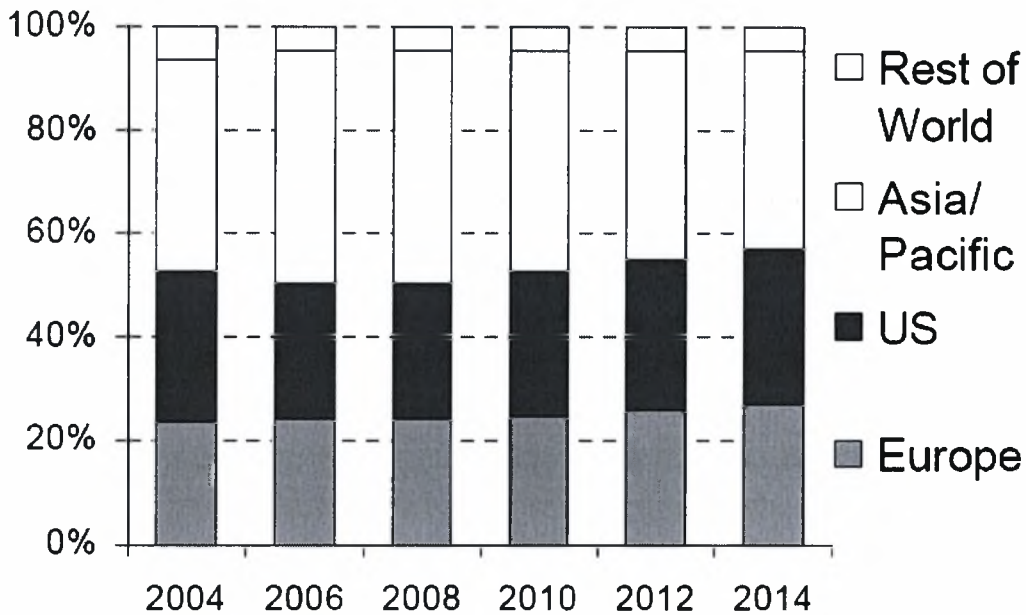
Οι πτυχές αυτές μπορούν επίσης να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην παγκόσμια κατανομή των πωλήσεων και στην οικονομική απόδοση των προϊόντων της нанοτεχνολογίας. Ενώ ορισμένες περιφέρειες του κόσμου μπορεί να είναι περισσότερο διατεθειμένες να αποδεχθούν τους κινδύνους που πιθανώς συνδέονται με τη нанοτεχνολογία, ακόμη και αν δεν είναι πλήρως γνωστοί ή ακόμα και ποσοτικά, ενώ άλλες μπορεί να είναι πιο επιφυλακτικές και πιο διστακτικές στην αποδοχή τους. Η διαφορά μεταξύ της αποδοχής των γενετικά τροποποιημένων καλλιεργειών, μεταξύ του ευρωπαϊκού και του αμερικανικού κοινού απεικονίζει αυτή την περίπτωση επαρκώς. Αυστηρότεροι κανονισμοί και λιγότερο σαφές μάρκετινγκ των στοιχείων των нанοτεχνολογικών προϊόντων μπορεί να έχει συνέπειες για τις πιο κρίσιμες περιοχές. Ανεξάρτητα από αυτές τις πτυχές, η Έρευνα Lux του (2004) έχει καταλήξει στα ποσά των προβλέψεων (2,6 δισεκατομμύρια δολάρια το 2014) ανάλογα με την περιοχή, σχήμα 6.5. Η πιο ενδιαφέρουσα, η πιο σημαντική περιοχή για τις πωλήσεις των προϊόντων της нанοτεχνολογίας είναι η Ασία και η περιοχή του Ειρηνικού, ακολουθούμενη από τις ΗΠΑ και την Ευρώπη σε παρόμοια επίπεδα. Ενώ η Ευρώπη προβλέπεται να έχει μια μικρή αλλά συνεχή αύξηση του μεριδίου του, οι ΗΠΑ παρουσίασαν μια μείωση μέχρι το 2008 και μια

\*Στο ανακοινωθέν "Προς μια ευρωπαϊκή στρατηγική για τη нанοτεχνολογία" (2004) και «Νανοεπιστήμες και нанοτεχνολογίες: ένα σχέδιο δράσης για την Ευρώπη για το 2005 - 2009» (2005), η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπογράμμισε τη σημασία μιας ολοκληρωμένης και υπεύθυνης προσέγγισης σε θέματα нанοτεχνολογίας, προσδιορίζοντας όχι μόνο τις επιστημονικές, τεχνολογικές και οικονομικές συνθήκες, οι οποίες είναι σημαντικές για την περαιτέρω ανάπτυξη της нанοτεχνολογίας, αλλά και την κοινωνική διάσταση, και την αξιολόγηση των κινδύνων.

Βλ. σχετικά <http://cordis.europa.eu/nanotechnology/actionplan.htm>.

αύξηση στη συνέχεια, η Ασία και η περιοχή του Ειρηνικού υφίστανται την

αντίθετη ανάπτυξη. Η Έρευνα Lux δείχνει ότι οι αιτίες για τις εξελίξεις αυτές έχουν σχέση με το μοντέλο των τριών φάσεων της στην ανάπτυξη των νανοτεχνολογιών:



**Σχήμα 6.5** Παγκόσμιες πωλήσεις των προϊόντων που ενσωματώνουν την νανοτεχνολογία ανά περιοχή - προβλέψεις σε εκατοστιαίες μονάδες. Πηγή: Έρευνα Lux, 2004

139

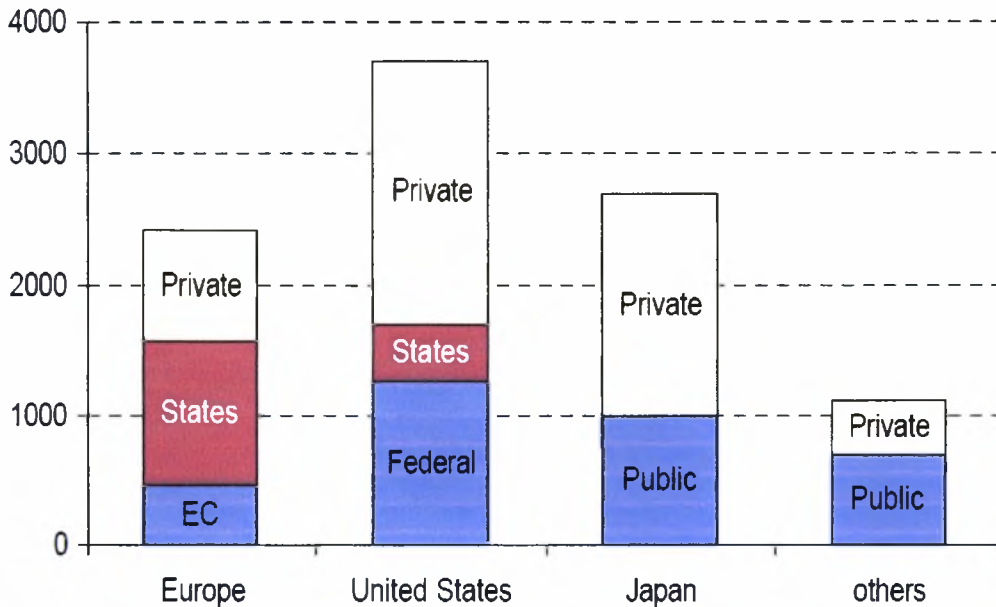
στο προσεχές μέλλον, τα προϊόντα θα κυριαρχούν στην παγκόσμια αγορά που κατά κύριο λόγο προέρχονται από ισχυρές ασιατικές εταιρείες, όπως οι υπολογιστές, φορητές συσκευές ή οχήματα. Μετά το 2008, τα φάρμακα θα καταστούν ισχυρότερα και αυτά κυριαρχούνται από τις αμερικανικές εταιρείες.

### 6.3 Η παγκόσμια κούρσα της δημόσιας και ιδιωτικής χρηματοδότησης της νανοτεχνολογίας.

Ο πίνακας 6.1 παρέχει μια εικόνα της δημόσιας χρηματοδότησης κατά το 2005. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή είναι ο μεγαλύτερος οργανισμός χρηματοδότησης της έρευνας στην νανοτεχνολογία στην Ευρώπη και ως οργανισμός, ακόμα και σε όλο τον κόσμο. Στο 6<sup>ο</sup> και 7<sup>ο</sup> Ευρωπαϊκό Πλαίσιο Προγράμματος για την Έρευνα και την Τεχνολογική Ανάπτυξη (FP6, FP7), η νανοτεχνολογία έχει οριστεί, από κοινού τα υλικά και οι τεχνολογίες παραγωγής, Nanosciences, nanotechnologies, materials &

new production technologies (NMP), ως προτεραιότητα για την ευρωπαϊκή έρευνα. Εκτιμάται ότι 1,3 δισεκατομμύρια ευρώ έχουν αφιερωθεί σε έργα για την нанοτεχνολογία μεταξύ 2004 και 2006 (2004: 370 εκατ. ευρώ, 2005: 470 εκατ. ευρώ, 2006: 500 εκατ. ευρώ), και σε άλλες προτεραιότητες από τις NMP, όπως οι τεχνολογίες της κοινωνίας της πληροφορίας, των υποδομών, της έρευνας ή και τις δραστηριότητες κατάρτισης. Ήδη στα πλαίσια του τετάρτου, FP4, και του πέμπτου, FP5, κοινοτικού πλαισίου στήριξης από το 1994 έως το 2002, σχέδια συναφή με τη нанοτεχνολογία χρηματοδοτήθηκαν με 300 εκατομμύρια Ευρώ συνολικά. Στο 7<sup>ο</sup> κοινοτικό πλαίσιο στήριξης (2007-2013, για περισσότερες πληροφορίες βλ. (<http://cordis.europa.eu/fp7>), η нанοτεχνολογία θα συνεχίσει ως προτεραιότητα στο πλαίσιο του NMP να είναι θέμα και αναμένεται να έχει τουλάχιστον διπλάσιο προϋπολογισμό σε σχέση με τις δραστηριότητες που σχετίζονται με τα άλλα θέματα του 7<sup>ου</sup> κοινοτικού πλαισίου στήριξης όπως, (υγεία, τρόφιμα, πληροφορίες & τεχνολογίες των επικοινωνιών, της ενέργειας, των κοινωνικο-οικονομική έρευνα και ασφάλεια), ή προγράμματα (με τις υποδομές, ΜΜΕ, εκπαίδευση, κοινωνικών πτυχών). Επιπλέον, κάποια έμφαση θα δοθεί στην νανο-ηλεκτρονική, η νανο-ιατρική ως θέμα της ευρωπαϊκής τεχνολογικής πλατφόρμας και της ασφάλειας, το περιβάλλον και η υγεία καθώς και πτυχές όπως νανο-μετεωρολογία, συγκλίνουσες τεχνολογίες και διεθνή συνεργασία. Όσον αφορά τα κράτη μέλη της ΕΕ, τα οποία αντιπροσωπεύουν ένα πολύ μεγάλο μερίδιο των ευρωπαϊκών δημόσιων δαπανών στη нанοτεχνολογία, η Γερμανία είναι στην κορυφή, ακολουθούμενη από τη Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Η Ιαπωνία και η Νότια Κορέα βρίσκονται σε ανάλογο επίπεδο. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία που να αντικατοπτρίζουν την αγοραστική δύναμη και τις προσπάθειες της Κίνας, η ίδια θα πρέπει να θεωρηθεί ότι παρουσιάζει την μεγαλύτερη ανάπτυξη σε σχέση με όλο τον κόσμο. Φαίνεται λοιπόν από τα στοιχεία ότι όλες οι χώρες ακολουθούν τις Ηνωμένες Πολιτείες, οι οποίες έχουν δαπανήσει περισσότερα από 1,2 δισεκατομμύρια ευρώ το 2004 και 1,7 δις ευρώ το 2005. Ωστόσο, στο σύνολό της, και μόνο λαμβάνοντας υπόψη τη δημόσια χρηματοδότηση της нанοτεχνολογίας, η Ευρώπη θα είναι σε παρόμοιο επίπεδο με τις Ηνωμένες Πολιτείες, (σχήμα 6.6).

Προσθέτοντας τα στοιχεία της ιδιωτικής χρηματοδότησης, η εικόνα είναι διαφορετική. Στην Ευρώπη, μόνο το ένα τρίτο της συνολικής χρηματοδότησης προέρχεται από ιδιωτικές πηγές.

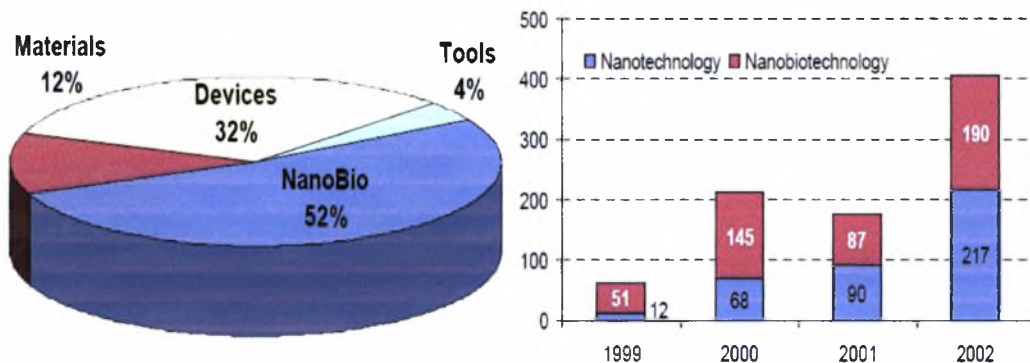


**Σχήμα 6.6** Εκτίμηση δημόσιας και ιδιωτικής χρηματοδότησης για τη νανοτεχνολογία, Research and development R&D, (έρευνα και ανάπτυξη), το 2005 σε όλο τον κόσμο σε εκατ. € (1 € = 1 \$). Πηγή: αριθμητικά στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, 2005.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, οι ιδιωτικές πηγές είναι περίπου 54% και στην Ιαπωνία αντιπροσωπεύουν σχεδόν τα δύο τρίτα. Για όλες τις άλλες, κυρίως τις αναπτυσσόμενες ασιατικές χώρες, το ποσοστό είναι περίπου 36%. Σε απόλυτους αριθμούς, η ερευνητική κοινότητα των ΗΠΑ μπορεί να δαπανήσει περισσότερα από 3,5 δισ. ευρώ για τη νανοτεχνολογία, ενώ το ποσό ανέρχεται στα 2,7 δισ. ευρώ για την Ιαπωνία και λιγότερο από 2,5 δισ. ευρώ για την Ευρώπη. Αυτό δείχνει τη διαφορά μεταξύ της Ευρώπης και των ανταγωνιστών της στην έρευνα της νανοτεχνολογίας: Το επίπεδο δημόσιας χρηματοδότησης είναι ανταγωνιστικό, αλλά η Ευρωπαϊκή βιομηχανία υστερεί.

## 6.4 Επιχειρηματικά κεφάλαια για την έρευνα στην υψηλής τεχνολογίας

Ποιοι τεχνολογικοί τομείς είναι ήδη ιδιαίτερα δυναμικοί και ως εκ τούτου ελκυστικοί για τους επενδυτές; Μια πιο προσεκτική ματιά στην αγορά επιχειρηματικών κεφαλαίων μέχρι το 2002 δίνει μια ένδειξη.



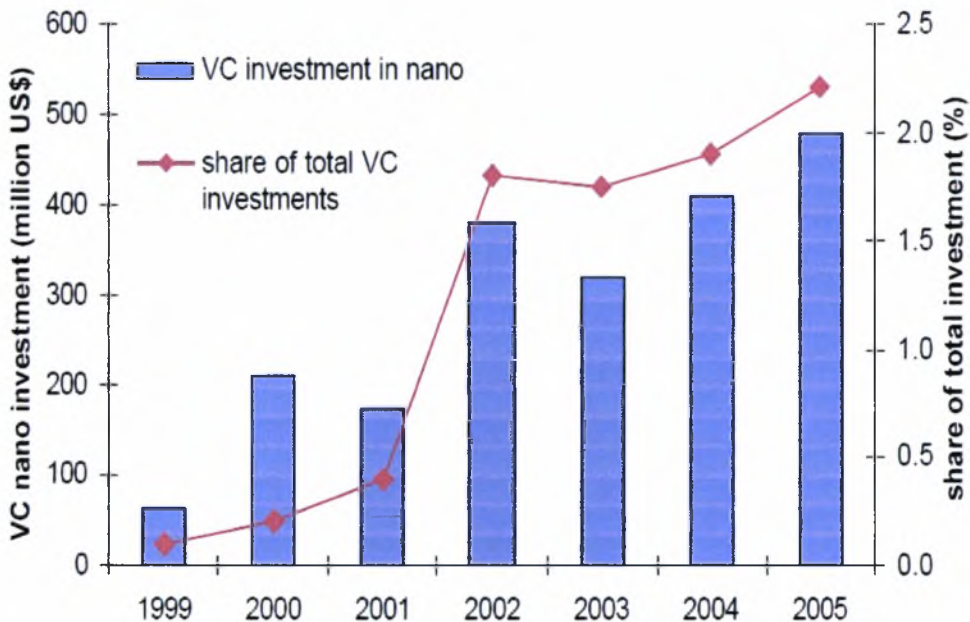
**Σχήμα 6.7** Επιχειρηματικά κεφάλαια σε όλο τον κόσμο ανάλογα με την εφαρμογή (αριστερά) και ανά έτος, σε εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ (δεξιά). Πηγή: (Paull et al., 2003).

142

Το σχήμα 6.7 παρουσιάζει ότι η νανο-βιοτεχνολογία είναι η πιο ελκυστική αγορά για τα επιχειρηματικά κεφάλαια, ακολουθούμενη από τις νανο-συσκευές ενώ τα νανοϋλικά και τα νανο-εργαλεία παίζουν μόνο περιθωριακό ρόλο. Οι αναλογίες έχουν αλλάξει σημαντικά. Ο κυρίαρχος ρόλος της νανο-βιοτεχνολογίας διατηρείται, αλλά με τάσεις μείωσης. Η συνολική χρηματοδότηση αυξήθηκε από 63 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 1999 σε περισσότερο από 400 εκατ. ευρώ το 2002, δηλαδή παρουσιάζεται αύξηση άνω του 500% εντός 3 ετών. Αλλά πάλι, η μείωση κατά τα έτη 2000-2002, κυρίως στη νανο-βιοτεχνολογία, δείχνει ότι η αγορά επιχειρηματικού κεφαλαίου μπορεί να είναι ακόμα σε κατάσταση αναμονής. Η αυξανόμενη ανάπτυξη του επιχειρηματικού κεφαλαίου στην παγκόσμια αγορά για τη νανοτεχνολογία παρουσιάζεται στο σχήμα 6.8. Τα στοιχεία δείχνουν μια στασιμότητα της συνολικής χρηματοδότησης σε αναπτυξιακά επιχειρηματικά κεφάλαια το 2002 και μια μέτρια αλλά σταθερή αύξηση μετά. Το μερίδιο της νανοτεχνολογίας στην παγκόσμια αγορά της χρηματοδότησης επιχειρηματικού κεφαλαίου υποβάλλεται σε μια παρόμοια

εξέλιξη.

Η μείωση κατά τα έτη 2000 – 2002 μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα επιχειρηματικά κεφάλαια συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον τους για την νανοτεχνολογία, ειδικά όσον αφορά τις συζητήσεις που σχετίζονται με τους πιθανούς κινδύνους. Οι συζητήσεις έγιναν πιο έντονες στις αρχές της δεκαετίας του 2000 όταν τα πρώτα αποτελέσματα των αναλύσεων τοξικότητας που είχαν δημοσιευθεί έδειξαν κάποιες δυνατότητες κινδύνου που σχετίζονται με τα νανοσωματίδια. Οι συζητήσεις αυτές βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη και ορισμένοι επενδυτές μπορεί να προτιμούν να περιμένουν για περισσότερο σαφείς ενδείξεις σε αυτά τα αποτελέσματα.



143

**Σχήμα 6.8** Χρηματοδότηση με επιχειρηματικά κεφάλαια σε όλο τον κόσμο στην νανοκλίμακα, σε απόλυτους αριθμούς όσο και ως μετοχές. Πηγές: 1999-2003: Anquetil (2005), 2004/2005: Έρευνα Lux, το 2006, Price Waterhouse Coopers 2006

Από την άλλη πλευρά, ορισμένοι εμπειρογνώμονες πιστεύουν ότι μία μαζική επένδυση σε νανοτεχνολογία μπορεί να οδηγήσει σε προϊόντα τα οποία η κοινωνία δεν χρειάζεται (Nanologue, 2005). Αυτή η έλλειψη συμμετοχής του κοινού σε συνδυασμό με τις τεράστιες επενδύσεις και η δημοσιότητα γύρω από τη νανοτεχνολογία θα οδηγήσει σε μια «φούσκα» που θα μπορούσε τελικά να σκάσει. Επιπλέον, η στασιμότητα του 2002 και η μείωση της ανάπτυξης στη συνέχεια μπορεί επίσης να οφείλεται στο

γεγονός ότι η αγορά έχει ήδη αρχίσει να εμφανίζει σημεία κορεσμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ζήτηση για χρηματοδότηση με επιχειρηματικά κεφάλαια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των νέο ιδρυθέντων εταιρειών. Υπάρχουν αρκετοί επιχειρηματίες που ασχολούνται με την νανοτεχνολογία που μπορούν να απορροφήσουν πάνω από 500 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ ετησίως, ή 2,2% των διαθέσιμων επιχειρηματικών κεφαλαίων σε όλο τον κόσμο.

### **6.5 Ανάλυση του οικονομικού αντίκτυπου στις θέσεις εργασίας και στις επιχειρήσεις της νανοτεχνολογίας**

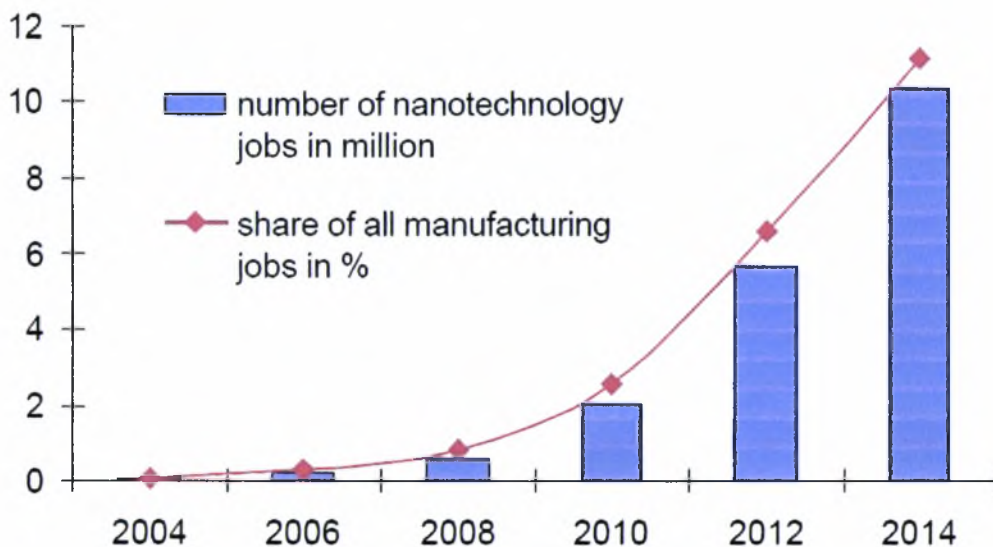
Η δημιουργία των εταιρειών αποτελεί ένα σημαντικό δείκτη για την ανάπτυξη και την οικονομική σημασία μιας νέας τεχνολογίας. Οι νέες εταιρείες συνήθως ξεκινούν με ένα βασικό πλεονέκτημα: το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια νέα τεχνολογία που να μπορούν να αξιοποιήσουν οι ίδιοι ή κατόπιν άδειας με άλλες εταιρείες οι οποίες είναι περισσότερο ικανές σε θέματα παραγωγής ή διανομής. Τα επιχειρηματικά κεφάλαια αποτελούν μια σημαντική πηγή χρηματοδότησης σε αυτούς του τομείς της υψηλής τεχνολογίας και υψηλού κινδύνου. Όταν πρόκειται για τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, τη δημιουργία νέων, μικρών και μεσαίων επιχειρήσεων, (small and mediumsized Enterprises, SMEs), έχει τη μεγαλύτερη συμβολή. Οι εκτιμήσεις της NSF είναι ότι περίπου 2 εκατομμύρια εργαζόμενοι στην νανοτεχνολογία θα χρειαστούν σε όλο τον κόσμο μέχρι το 2015 και θα κατανεμηθούν σε όλες τις περιοχές του κόσμου ως εξής:

- 0,8 - 0.900.000 στις ΗΠΑ,
- 0,5 έως 0.600.000 στην Ιαπωνία,
- 0,3 - 0.400.000 στην Ευρώπη,
- 0,2 εκατομμύρια στην Ασία και στον Ειρηνικό με εξαίρεση την Ιαπωνία και
- 0,1 εκατομμύρια σε άλλες περιοχές.

Επιπλέον, θα δημιουργηθούν 5 εκατομμύρια θέσεις εργασίας που σχετίζονται με την υποστήριξη, ή σε μέσο όρο 2,5 θέσεις εργασίας ανά εργαζόμενο νανοτεχνολογίας, (Roco, 2003). Ακόμη πιο αισιόδοξη, η Έρευνα Lux αναμένει ένα αριθμό 10 εκατομμυρίων θέσεων εργασίας στις

κατασκευές που σχετίζονται με τη νανοτεχνολογία μέχρι το 2014. Το Σχήμα 6.9 δείχνει το συνολικό αριθμό των θέσεων εργασίας στον τομέα της νανοτεχνολογίας και του μεριδίου της επί του συνόλου των θέσεων εργασίας.

Πολλές από αυτές τις θέσεις εργασίας θα δημιουργηθούν στις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις, αλλά όχι αποκλειστικά. Στη διάρκεια των τελευταίων χρόνων, πολλές εταιρείες έχουν επεκτείνει τις δραστηριότητες τους σε θέματα νανοτεχνολογίας, προκειμένου να διατηρήσουν την ανταγωνιστικότητά τους.



145

**Σχήμα 6.9** Αριθμός των θέσεων εργασίας στη νανοτεχνολογία σε εκατομμύρια και το μερίδιο των θέσεων εργασίας της νανοτεχνολογίας σε σχέση με το σύνολο των θέσεων εργασίας στον μεταποιητικό τομέα σε ποσοστό επί τοις εκατό. Πηγή: Έρευνα Lux, 2004.

Αυτό εξηγεί γιατί οι εταιρείες είχαν επισημανθεί ως νανο-τεχνολογικού προσανατολισμού ακόμη και όταν μερικές φορές αυτές υπήρχαν και πριν από 100 χρόνια ή και περισσότερο. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι οι μεγάλες επιχειρήσεις στη χημική και φαρμακευτική βιομηχανία, όπως επίσης και στις βιομηχανίες οπτικής και της ηλεκτρονικής (Bayer, η BASF, η Carl Zeiss, η Agfa-Gevaert, General Electrics, η Philips, όλες δημιουργήθηκαν πριν το 1900), αν και οι καθιερωμένες εταιρείες αποτελούν την μειονότητα στον κατάλογο των υφιστάμενων νανοτεχνολογικών επιχειρήσεων.

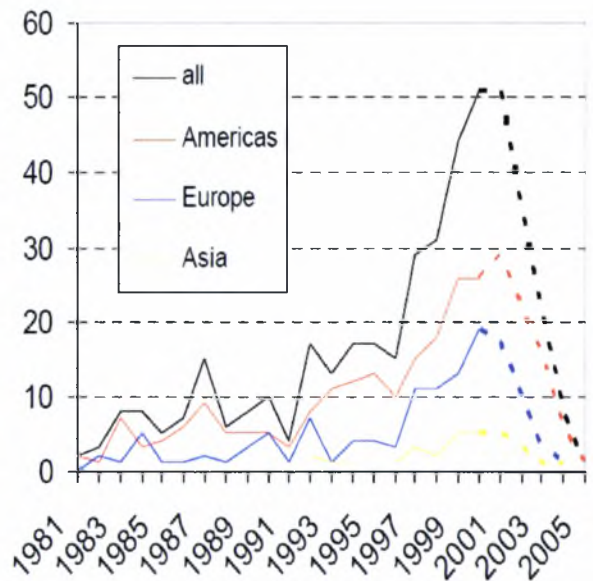
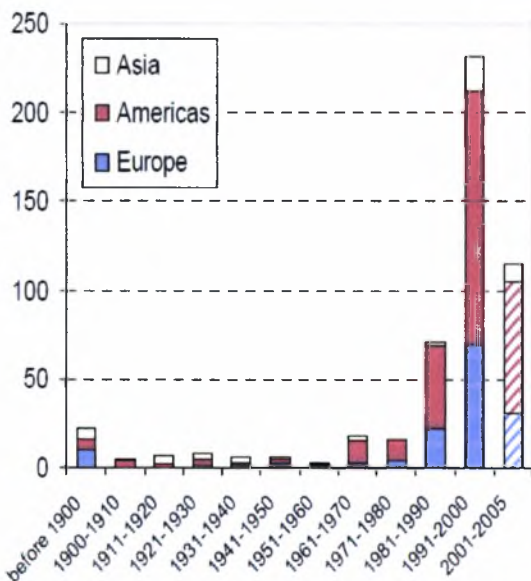
Το σχήμα 6.10 δείχνει τον αριθμό των εταιρειών νανοτεχνολογίας στα



χρόνια και τις δεκαετίες που δημιουργήθηκαν παγκοσμίως και σε κάθε γεωγραφική περιοχή. Τα δεδομένα προέρχονται από τη δημόσια διαθέσιμη βάση δεδομένων των нанοτεχνολογικών επιχειρήσεων και παρέχονται από την ιστοσελίδα:

<http://www.nsti.org/Nanotech2006/mediasponsor.html?id=21>.

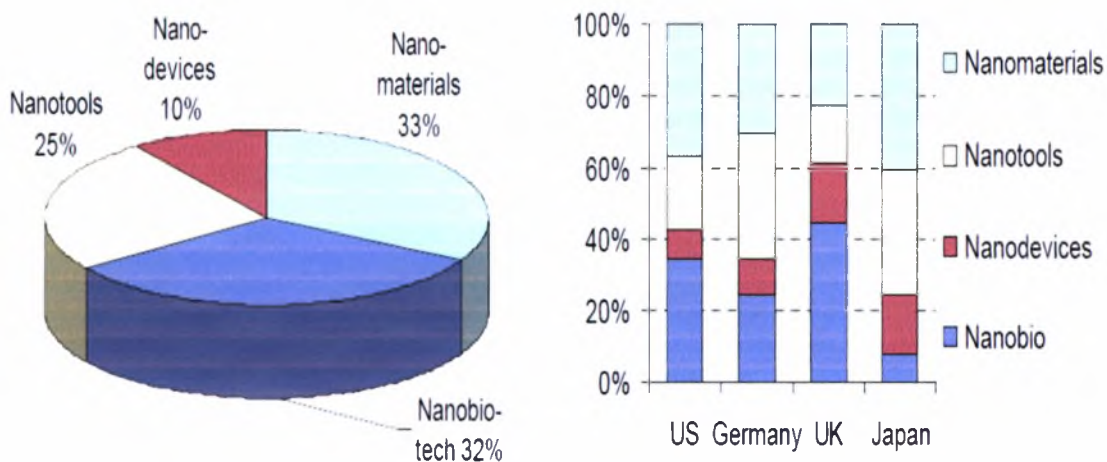
Μόνο για τις 522 εταιρείες από ένα σύνολο των 1000 εταιρειών δόθηκε το έτος δημιουργίας από την εν λόγω βάση δεδομένων. Οι περιοχές του κόσμου είναι κυρίως η Γερμανία, η Ελβετία και το Ηνωμένο Βασίλειο για την Ευρώπη, οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδά για την Αμερική και η Ιαπωνία, η Νότιος Κορέα και η Κίνα για την Ασία. Μόνο λίγες εκ των ενεργών σημερινών εταιρειών της нанοτεχνολογίας είχαν δημιουργηθεί στις οκτώ πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, με μέσο όρο δέκα εταιρείες κάθε δεκαετία.



**Σχήμα 6.10** Εταιρείες που σχετίζονται με την нанοτεχνολογία σε όλο τον κόσμο: εδώ και δεκαετίες για τα χρόνια που δημιουργήθηκαν (1981-2005). Σημειώστε ότι ορισμένες εταιρείες που ιδρύθηκαν πρόσφατα, (2001 ή αργότερα), δεν έχουν συμπεριληφθεί πλήρως. Πηγή: NanoInvestorNews

Στη δεκαετία του 1980, ο αριθμός τους αυξήθηκε σημαντικά, αλλά η πραγματική απογείωση δεν πραγματοποιήθηκε παρά μετά το 1996. Εκείνη τη χρονιά 30 περίπου нанοτεχνολογικές επιχειρήσεις δημιουργήθηκαν και ο αριθμός αυτός έφτασε τις 50 εταιρείες το 2000. Αυτό συνεχίζεται με

αυξανόμενη τάση, η οποία δεν αντικατοπτρίζεται στους αριθμούς γεγονόσ που οφείλεται στα ελλιπή στοιχεία που υπάρχουν για τα τελευταία χρόνια. Υπάρχει κάποια διαφορά μεταξύ των διαφόρων περιοχών του κόσμου για τον αριθμό και το έτος της δημιουργίας των нанοτεχνολογικών επιχειρήσεων. Οι αριθμοί μέχρι και τη δεκαετία του 1990 δεν θα πρέπει να θεωρηθούν υπερτιμημένοι, λόγω της στατιστικής στρέβλωσης που οφείλεται στην ύπαρξη μικρών αριθμών. Εντούτοις, αντανακλούν τις ίδιες αναλογίες μεταξύ των χωρών με τον ίδιο σταθερό τρόπο: Η Αμερική είναι στην πρωτοπορία, ακολουθούμενη από την Ευρώπη και την Ασία. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η Ευρώπη μειώνει το χάσμα με την Αμερική κατά το ήμισυ έως τα δύο τρίτα. Η χρονιά που πραγματικά Αμερική και Ευρώπη απογειώνονται είναι το 1996, ενώ το 2000 η Ευρώπη παρουσιάζει ένα άλμα επιτυχιών και οι ρόλοι αντιστρέφονται το 2001 για την Αμερική. Το σχήμα 6.11 δείχνει το αποτέλεσμα από μια έρευνα από την Fecht et al, η οποία κάλυψε 357 επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο.

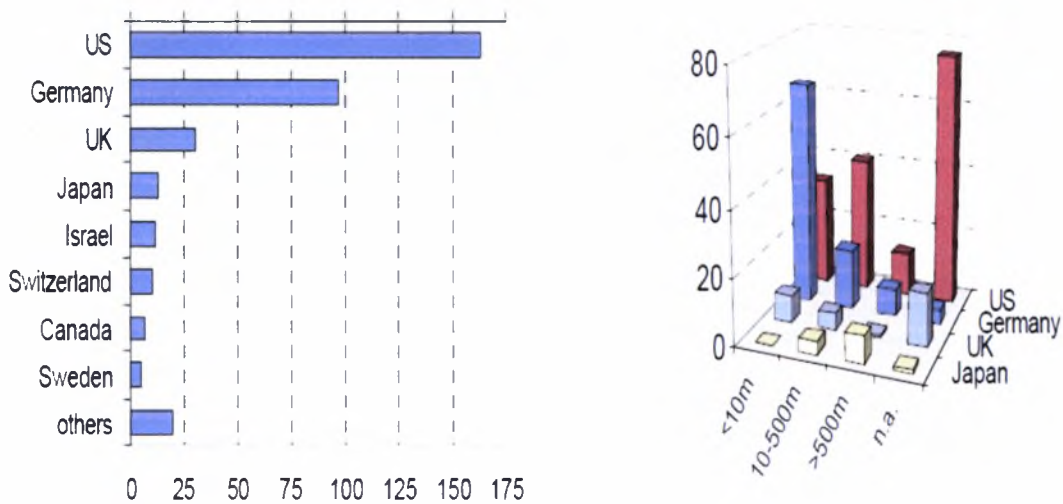


**Σχήμα 6.11** Οι εταιρείες σε όλο τον κόσμο σε διαφορετικά τμήματα της нанοτεχνολογίας (αριστερά) και στις πιο δραστήριες χώρες (δεξιά). Τα στοιχεία αναφέρονται σε ένα δείγμα των 357 εταιρειών από μια έρευνα της, (Fecht et al., 2003).

Το ένα τρίτο των εταιρειών που παρατηρήθηκαν δραστηριοποιούνται στα νανοϋλικά, το άλλο ένα τρίτο στη νανο-βιοτεχνολογία. Νανο-εργαλεία και νανο-συσσκευές παίζουν μικρότερο ρόλο. Υπάρχουν όμως σημαντικές

διαφορές μεταξύ των τεσσάρων πιο δραστήριων χωρών στον κόσμο: ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες είναι λίγο πολύ στον μέσο όρο όλων των κατηγοριών, η Γερμανία είναι ισχυρότερη στα νανο-εργαλεία, το Ηνωμένο Βασίλειο, στην νανο-βιοτεχνολογία και η Ιαπωνία είναι εξίσου ισχυρή στα νανοϋλικά και τα νανο-εργαλεία, άνω του μέσου όρου στις νανο συσκευές και πολύ χαμηλή στη νανο-βιοτεχνολογία.

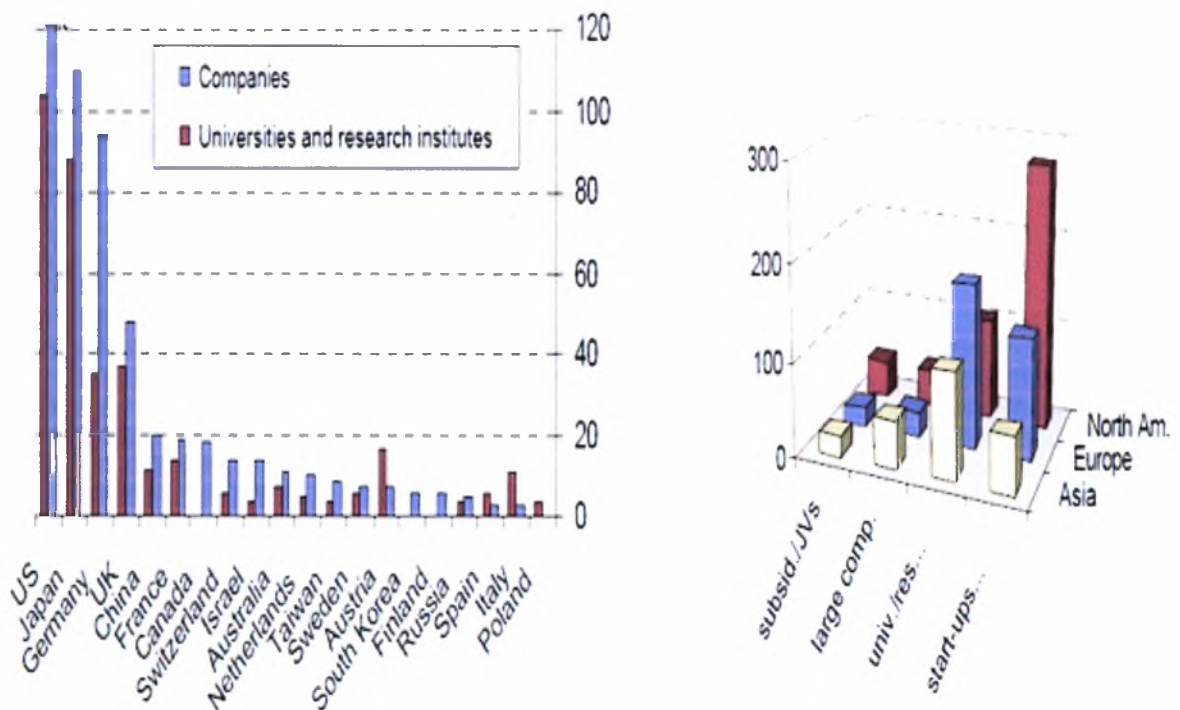
Το σχήμα 6.12 δείχνει το μέγεθος των εταιρειών σε σχέση με τον κύκλο εργασιών των περισσότερων ενεργών χωρών. Οι παρατηρούμενες εταιρείες που είναι εγκατεστημένες κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες και τη Γερμανία και σε μικρότερο βαθμό στο Ηνωμένο Βασίλειο, Ιαπωνία, Ισραήλ, Ελβετία, Καναδάς και τη Σουηδία. Η πλειοψηφία των εταιρειών στις Ηνωμένες Πολιτείες για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία είναι μεσαίου μεγέθους, δηλαδή κύκλου εργασιών 10 έως 500.000.000 δολάρια ΗΠΑ. Η πλειοψηφία των Γερμανικών και οι εταιρείες του Ηνωμένου Βασιλείου είναι πολύ μικρότερες με κύκλο εργασιών κάτω από 10 εκατ. δολάρια ΗΠΑ, ενώ ο κύκλος εργασιών των ιαπωνικών εταιρειών είναι μεγαλύτερος από 500 εκατ. δολάρια ΗΠΑ.



**Σχήμα 6.12** Οι εταιρείες με нанοτεχνολογία στις πρωτοπόρες χώρες (αριστερά) και σε σχέση με το μέγεθος της εταιρείας (Κύκλος εργασιών σε εκατ. δολάρια.) στις πιο δραστήριες χώρες (δεξιά). Τα στοιχεία αναφέρονται σε ένα δείγμα των 357 εταιρείες από μια έρευνα από την (Fecht et al., 2003).

Οι ιδιωτικές εταιρείες δεν είναι οι μόνες οργανώσεις που δραστηριοποιούνται στον τομέα της нанοτεχνολογίας. Ο αριθμός όλων των

οργανισμών που κάνουν έρευνα ή παράγουν νανοτεχνολογία αντικατοπτρίζει όλες δραστηριότητες της νανοτεχνολογίας και βοηθά στον προσδιορισμό των μοντέλων δραστηριότητας με τους όρους της επιστημονικής και εφαρμοσμένης έρευνας. Στο σχήμα 6.13 παρουσιάζεται ο αριθμός των οργανώσεων που δραστηριοποιούνται στον τομέα της νανοτεχνολογίας, στις πιο ενεργές χώρες σε διάφορες περιοχές του κόσμου. Το σύνολο των δεδομένων αποτελείται από περίπου 1100 οργανώσεις, εκ των οποίων οι 460 είναι μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις ή νεοσύστατες επιχειρήσεις, τα 390 ερευνητικά ιδρύματα, οι 120 μεγάλες επιχειρήσεις και οι 80 θυγατρικές ή κοινοπραξίες. Αλλά υπάρχουν διαφορές μεταξύ των περιφερειών του κόσμου: Αν και στις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις και την σύσταση νέων οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο, τα πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα διαδραματίζουν μεγαλύτερο ρόλο στην Ευρώπη και την Ασία.

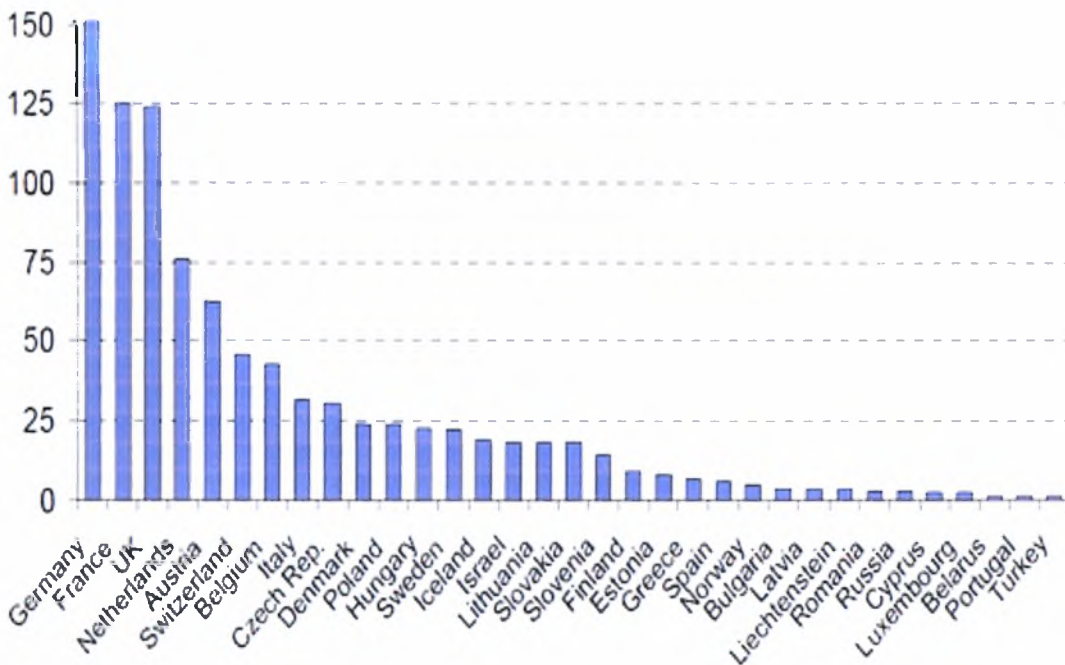


**Σχήμα 6.13** Ιδρύματα νανοτεχνολογίας ανά χώρα (αριστερά) και από το είδος του οργανισμού (Δεξιά). Ο συνολικός αριθμός είναι 1198 (αριστερά) και 1050 (δεξιά), αντίστοιχα. Πηγή: Cientifica, 2003

Ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες – γκρουπ, όλες οι εταιρείες (συμπεριλαμβανομένων των μικρών και μεσαίων επιχειρήσεων, μεγάλες επιχειρήσεις και οι θυγατρικές) στην μία πλευρά και τα ερευνητικά

ιδρύματα (πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα) στην άλλη πλευρά. Ενδιαφέρουσες διαφορές μεταξύ των χωρών μπορεί να παρατηρηθούν. Το μερίδιο των ερευνητικών ιδρυμάτων όλων των οργανισμών είναι πολύ υψηλό στην Ιαπωνία, το Ηνωμένο Βασίλειο, στη Κίνα, στη Γαλλία, στη Αυστραλία και στη Σουηδία. Στην Αυστρία, την Ισπανία, την Ιταλία και την Πολωνία, ξεπερνούν αριθμητικώς ακόμη και τις εταιρείες. Η αναλογία είναι διαφορετική στις Ηνωμένες Πολιτείες, τη Γερμανία, την Ελβετία, το Ισραήλ και την Ταϊβάν, καθώς και στη Νότια Κορέα και η Φινλανδία, όπου ο αριθμός των εταιρειών διπλασιάζεται ή και περισσότερο από τα ερευνητικά ινστιτούτα.

Μια άλλη βάση δεδομένων νανοτεχνολογίας επικεντρώνεται στις Ευρωπαϊκές χώρες και καταδεικνύεται από τα δεδομένα του [www.nanoforum.org](http://www.nanoforum.org). Αυτή είναι μια Ευρωπαϊκή πύλη στο Internet για τη νανοτεχνολογία, η οποία χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Τον Αύγουστο του 2005, 1538 οργανώσεις είχαν καταχωρηθεί σε αυτή τη βάση δεδομένων, από τις 33 ευρωπαϊκές χώρες. Αν και το ήμισυ των καταχωρήσεων προέρχονται από τη Γερμανία, αυτή η βάση δεδομένων δείχνει επίσης, τη δραστηριότητα των μικρότερων και λιγότερο ενεργών χωρών στον τομέα της νανοτεχνολογίας, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 6.14. Η Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο είναι στο ίδιο επίπεδο με 250 συμμετοχές από κοινού, ακολούθησε ένα μεγαλύτερο άνοιγμα από τις Κάτω Χώρες, την Αυστρία, την Ελβετία και Βέλγιο. Η Ιταλία προηγείται στη μεσαία γραμμή που περιλαμβάνει Τσεχική Δημοκρατία, Δανία, Πολωνία, Ουγγαρία, Σουηδία, Ισλανδία, Ισραήλ, Λιθουανία, Σλοβακία και Σλοβενία. Σε σύγκριση με το μέγεθος της χώρας, οι 19 συμμετοχές από την Ισλανδία κάνουν αίσθηση σε αντίθεση με το χαμηλός αριθμό των συμμετοχών 32 της Ιταλίας. Η Φινλανδία, η Ισπανία και η Νορβηγία είναι οι ομάδες με λιγότερο από 10 καταχωρήσεις. Από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι οι πιο σημαντικές εξελίξεις όσον αφορά τη δημιουργία και τη δραστηριότητα των νανοτεχνολογικών επιχειρήσεων και των σχετικών θέσεων εργασίας στην νανοτεχνολογία μπορεί να παρατηρηθούν στις Ηνωμένες Πολιτείες. Στην Ευρώπη, η Γερμανία διαδραματίζει το σημαντικότερο ρόλο, αλλά σε ένα μάλλον μέτριο επίπεδο, σε σύγκριση με τις Ηνωμένες Πολιτείες.



**Σχήμα 6.14** Τα ευρωπαϊκά θεσμικά όργανα (πανεπιστημιακά και άλλα ερευνητικά ιδρύματα, εταιρείες) που δραστηριοποιούνται στον τομέα της νανοτεχνολογίας. Ο συνολικός αριθμός είναι 1538. Σημείωση: Το Ισραήλ είναι συνδεδεμένα με το έκτο Πλαίσιο Προγράμματος για την Ευρωπαϊκή Έρευνα και την Τεχνολογική Ανάπτυξη (2002-2006) και ως εκ τούτου περιλαμβάνεται στις στατιστικές αυτές. Πηγή: Nanoforum, 11.8.2005.

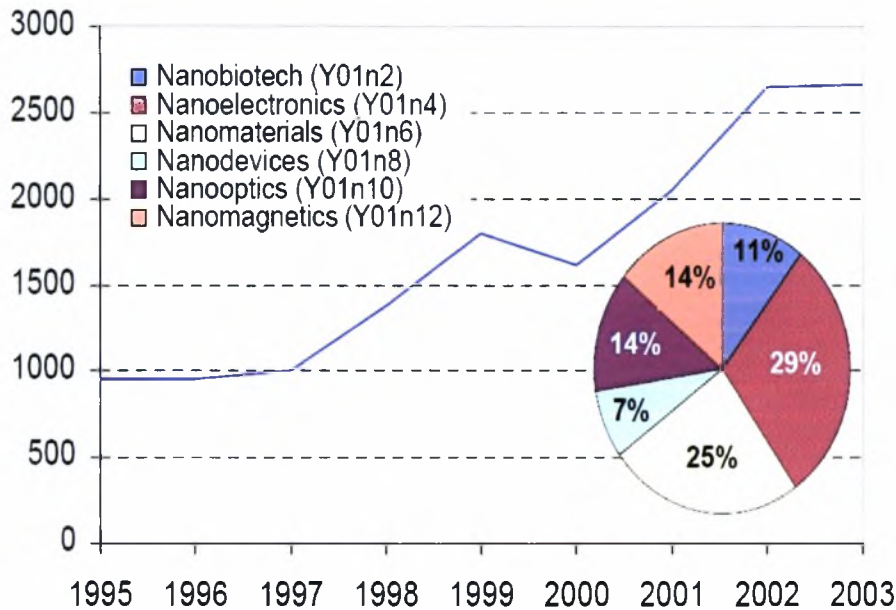
Η Ιαπωνία είναι ο πιο σημαντικός ανταγωνιστής των Ηνωμένων Πολιτειών. Όταν πρόκειται για την ανταγωνιστικότητα και τη δημιουργία θέσεων εργασίας, η σημασία των εταιρειών που δημιουργούνται για την υλοποίηση εφευρέσεων στις νανοτεχνολογίες ή την εφαρμογή νανοτεχνολογιών στις δραστηριότητες των εταιρειών τους θα αυξηθεί. Οι αναδυόμενες χώρες της νανοτεχνολογίας η Κίνα, η Ινδία και η Ρωσία είναι έτοιμες να απογειωθούν και να προσεγγίσουν την Ευρώπη. Παρά το γεγονός ότι καμία από αυτές δεν αναγράφεται ευκρινώς στο στατιστικά στοιχεία της εταιρείας, μπορεί να υποθεθεί ότι θα παρουσιάσουν σημαντική δυναμική στις επόμενες δεκαετίες και μπορεί να γίνουν ανταγωνιστικές στην παγκόσμια αγορά για τα προϊόντα, για την έρευνα και τις εγκαταστάσεις παραγωγής. Τα πρώτα στοιχεία τα δίνουν οι δείκτες για την επιστημονική και τεχνολογική ανάπτυξη, οι οποίοι αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

## 6.6 Η τεχνολογική ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας: αιτήσεις για διπλώματα ευρεσιτεχνίας

Ανθεκτική οικονομική επιτυχία δεν θα ήταν δυνατή χωρίς μια ισχυρή επιστημονική και τεχνολογική βάση. Από την άλλη πλευρά, η επιστημονική και η τεχνολογική επιτυχία δεν διευκολύνει αυτόματα την οικονομική επιτυχία και την καινοτομία. Αυτό είναι το ονομαζόμενο Ευρωπαϊκό παράδοξο, το οποίο αναφέρεται στην δύναμη της Ευρώπης στους τομείς της επιστήμης και στην αδυναμία της στην τεχνολογική εφαρμογή και κατά συνέπεια την οικονομική επιτυχία. Είναι ένα ευρωπαϊκό παράδοξο για τη νανοτεχνολογία εκεί. Προκειμένου να απαντηθεί το ερώτημα αυτό, είναι σκόπιμο να έχουμε τους δύο κύριους ποσοτικούς δείκτες της επιστημονικής και τεχνολογικής επιτυχίας: τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας και τις δημοσιεύσεις. Τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας αντικατοπτρίζουν την ικανότητα μεταφοράς των επιστημονικών αποτελεσμάτων σε τεχνολογικές εφαρμογές. Αποτελούν επίσης προϋπόθεση για την οικονομική εκμετάλλευση των ερευνητικών αποτελεσμάτων και ως εκ τούτου το βασικό για κάθε ανάλυση που ασχολείται με οικονομικές δυνατότητες της τεχνολογίας και τον εντοπισμό των πλέον ελπιδοφόρων τομέων και παραγόντων από την άποψη των προσώπων, οργανισμών ή χωρών. Το Ευρωπαϊκό Γραφείο Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας (ΕΓΔΕ) έχει αναπτύξει μια μέθοδο προκειμένου να εντοπίσει και να ταξινομήσει τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας στην νανοτεχνολογία. Ο αρχικός σκοπός ήταν να διευκολύνει το έργο των εξεταστών των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας για να προσδιορίσουν τις εξελίξεις σε αυτόν τον αναδυόμενο τομέα, προκειμένου να ανταποκρίνεται στη αυξανόμενη ανάγκη των νέων εξεταστών διπλώματος ευρεσιτεχνίας και διεπιστημονικής συνεργασίας. Η εισαγωγή «της μέθοδος tagging\*», εξυπηρετεί επίσης τους ερευνητές που ενδιαφέρονται για τις αναλύσεις ευρεσιτεχνίας στον τομέα της νανοτεχνολογία. Έχει το σαφές πλεονέκτημα ότι τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας νανοτεχνολογία μπορεί να εντοπιστούν με περισσότερη επάρκεια και ότι οι παγκόσμιες συγκρίσεις είναι πιο αξιόπιστες.

\*Μέθοδος που στηρίζεται σε μια λέξη-κλειδί ή όρο που συνδέεται με ή ανατεθεί σε ένα κομμάτι των πληροφοριών.

Το σχήμα 6.15 παρουσιάζει την εξέλιξη του αριθμού των οικογενειών ευρεσιτεχνίας 1995-2003 και τις συμμετοχές στα διάφορα υπό πεδία της нанοτεχνολογίας.

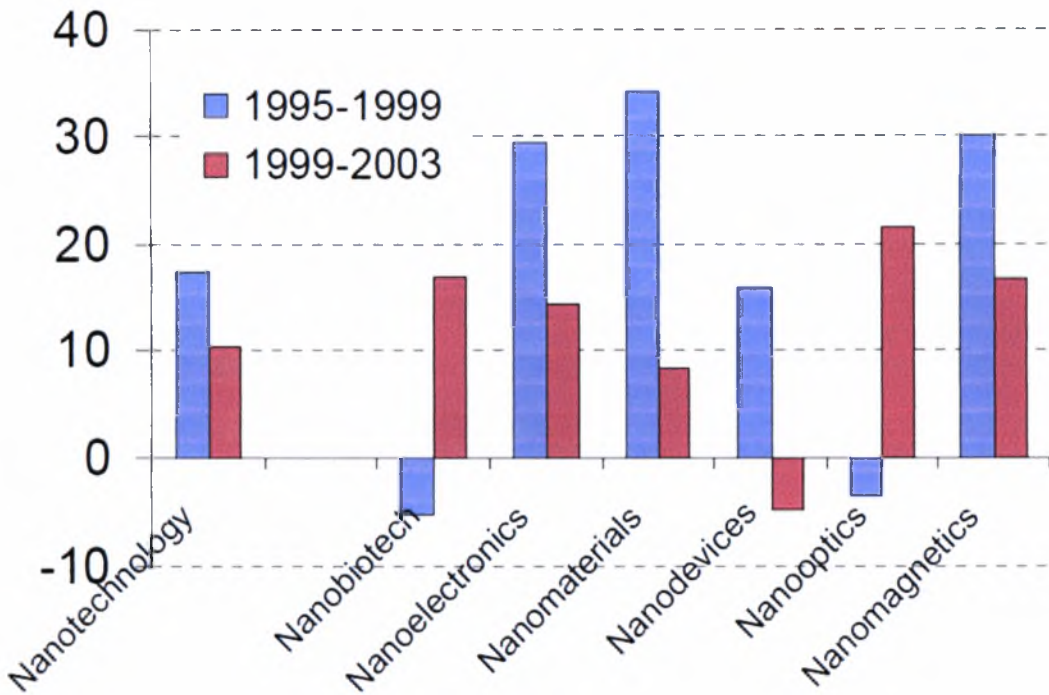


**Σχήμα 6.15** Διπλώματα ευρεσιτεχνίας στην нанοτεχνολογία σε όλο τον κόσμο, ο συνολικός αριθμός των οικογενειών των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στην Y01N\*. Πηγή: Ευρωπαϊκό Γραφείο Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας, (European Patent Office, EPO), το έτος 2006.

Ο αριθμός των οικογενειών ευρεσιτεχνίας αυξάνεται συνεχώς, αλλά μέχρι στιγμής δεν έχει πραγματικά απογειωθεί. Δύο μικρές κορυφές το 1999 και το 2002, επισημαίνουν την μια εκθετική αύξηση αλλά σε κάθε περίπτωση το επόμενο έτος αναγκάστηκαν να υποστούν μια επιβράδυνση που επηρεάζει τα συνολικά ποσοστά ανάπτυξης κατά την περίοδο. Το 2003, οι μεγαλύτερες ομάδες των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στη нанοτεχνολογία έχουν σχέση με τη νανο ηλεκτρονική. Τα νανοϋλικά κατέχουν τη δεύτερη θέση, ακολουθούν από απόσταση τα νανο-μαγνητικά και τα νανο-οπτικά το σχήμα 6.16 δείχνει την δυναμική του σε κάθε υποπεδίου.

\*Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις λογικές και τη μεθοδολογία της νανο ετικέτας Y01N, (Scheu et al, 2006). Οι ετικέτες είναι τα εξής: Y01N = Νανοτεχνολογία, Y01N2 = Νανο-βιοτεχνολογία, Y01N4 = Νανοτεχνολογία για την επεξεργασία των πληροφοριών, την αποθήκευση και μετάδοση (Νανο-ηλεκτρονική), Y01N6 = Νανοτεχνολογία για τα υλικά (Νανοϋλικά), Y01N8 = Η нанοτεχνολογία για τους αισθητήρες και ενεργοποιητές (νανο-συσκευές), Y01N10 = νανο-οπτική, Y01N12= Νανο-μαγνητισμός.



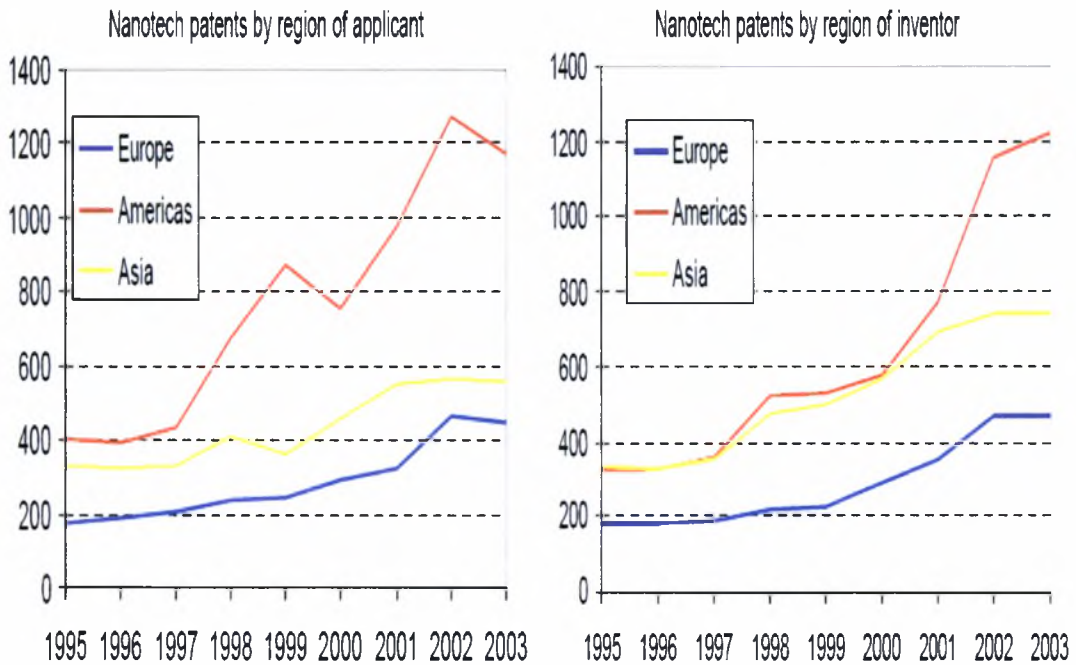


**Σχήμα 6.16** Μέσο ετήσιο ποσοστό αύξησης (%) ανά υποπεδίο нанοτεχνολογίας για δύο περιόδους: 1995-1999, 1999-2003. Πηγή: ΕΡΟ, το έτος 2006.

Το συνολικό ποσοστό ανάπτυξης των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στην нанοτεχνολογία μεταξύ 1995 και 2003 είναι 14% σε ετήσια βάση με τα χαμηλότερα ποσοστά κατά τη δεύτερη περίοδο συγκριτικά με την πρώτη περίοδο. Ωστόσο, οι τεράστιες διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των πεδίων. Νανο-ηλεκτρονική, νανοϋλικά, νανο-συσσκευές και νανο-μαγνητισμός είχαν τους υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης στην περίοδο του 1990 αλλά χαμηλότερων (με αρνητική ανάπτυξη στην περίπτωση των νανο συσκευών) μεταξύ 1999 και 2003. Από την άλλη πλευρά, η νανο-βιοτεχνολογία και η νανο οπτική φαίνεται να υφίσταται αρνητική ανάπτυξη στα τέλη της δεκαετίας του 1990, αλλά αυξήθηκαν σε περίπου 20% ανά έτος κατά το έτος 2000. Ωστόσο, σε απόλυτες τιμές και οι δύο είναι σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο από ό,τι η νανο-ηλεκτρονική και τα νανοϋλικά. Ως εκ τούτου, η αύξηση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί ως πρώιμη ένδειξη της αυξανόμενης σημασίας της νανο-βιοτεχνολογίας για την αγορά των προϊόντων нанοτεχνολογίας. Από ποιές περιοχές του κόσμου προέρχονται αυτές οι πατέντες στην нанοτεχνολογία;

Το σχήμα 6.17 δείχνει τον αριθμό των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας

νανοτεχνολογίας σε όλο τον κόσμο, κατανεμημένα σε αιτούντες και εφευρέτες από την Αμερική (κυρίως τις ΗΠΑ και τον Καναδά), την Ασία (κυρίως στην Ιαπωνία και Νότια Κορέα) και την Ευρώπη (κυρίως Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, Γαλλία και Κάτω Χώρες).



**Σχήμα 6.17** Διπλώματα ευρεσιτεχνίας σε όλο τον κόσμο σύμφωνα με την προσφεύγουσα (αριστερά) και τη χώρα του εφευρέτη (δεξιά). Πηγή: ΕΡΟ, το έτος 2006.

Είναι προφανές ότι η Αμερική είναι μακράν η πιο ενεργή περιοχή του κόσμου στην εγγραφή διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στον τομέα της νανοτεχνολογίας. Είναι υπεύθυνη κάθε χρόνο για τα μισά διπλώματα που κατατίθενται παγκοσμίως. Στην περίπτωση της νανοτεχνολογίας, πάντως, ένας σημαντικός αριθμός των εφευρετών έχουν ασιατικές διευθύνσεις κατοικίας – εργασίας αλλά οι εταιρίες που προτείνουν την εργασία τους είναι αμερικάνικες. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των περιπτώσεων, η κινητικότητα των ερευνητών δεν θα μπορούσε να έχει μια επαρκή εξήγηση. Θα ήταν δίκαιο να υποθέσουμε ότι η διαφορά αυτή οφείλεται επίσης στο γεγονός ότι τα ασιατικά ερευνητικά κέντρα, που ανήκουν σε μια αμερικανική εταιρεία, δεν υποβάλλουν αίτηση για το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τα ίδια, αλλά αυτό το φροντίζει η αμερικάνικη έδρα τους.

Ενδιαφέρουσα είναι η μείωση των διαφορών το 2002 και 2003. Αυτό είναι μια ένδειξη είτε για την αλλαγή των συνηθειών στην κατοχύρωση με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ή η αυξανόμενη δραστηριότητα των ασιατικών επιχειρήσεων που αιτούνται διπλώματος. Η κλίση της αμερικανικής καμπύλης δείχνει επίσης ότι οι κορυφές της παγκόσμιας ευρεσιτεχνίας στη нанοτεχνολογία (βλ. σχήμα 6.15), προκλήθηκαν κυρίως από ένα ασυνήθιστα μεγάλο αριθμό αμερικανικών αιτούντων το 1999 και το 2002. Ο πίνακας 6.2 περιλαμβάνει τις 10 πρώτες χώρες για κάθε υποκατηγορία Y01N το 2003 και δείχνει ότι οι Ηνωμένες Πολιτείες είναι η πιο ενεργή χώρα για τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας σε κάθε υποπεδίο, τόσο για τους αιτούντες όσο και στους εφευρέτες. Αλλά οι χώρες που ακολουθούν αλλάζουν τη θέση τους ανάλογα με το πεδίο. Η Γερμανία, Γαλλία και ο Καναδάς, κατατάσσονται σε υψηλότερη θέση για τη νανο-βιοτεχνολογία, οι Κάτω Χώρες και η Σουηδία στη νανο-ηλεκτρονική, ενώ το Βέλγιο και η Ταϊβάν, καταλαμβάνουν υψηλή θέση στην νανοϋλικών. Η Ελβετία είναι ιδιαίτερα ισχυρή στις νανο-συσσκευές, και το Ηνωμένο Βασίλειο στην νανο-οπτική.

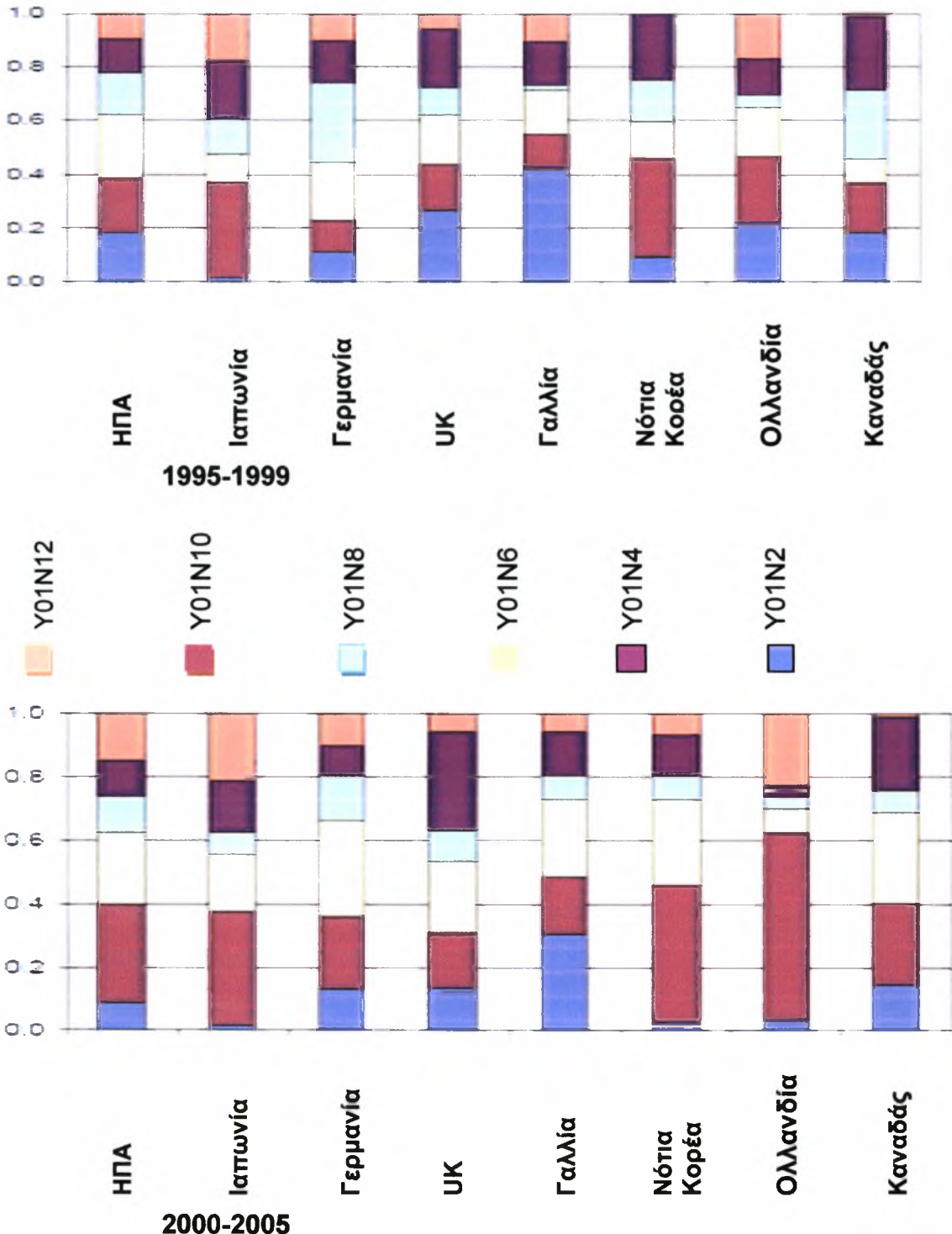
**Πίνακας 6.2** Οι πρώτες χώρες σε διπλώματα ευρεσιτεχνίας σε όλο τον κόσμο σε κάθε τομέα της нанοτεχνολογίας, 2003. Πηγή: Ευρωπαϊκό Γραφείο Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας, το 2006.

<b>Νανο-βιοτεχνολογία (Y01N2)</b>			
<b>Χώρες εφαρμογών</b>	<b>Αριθμός</b>	<b>Χώρες ερευνών</b>	<b>Αριθμός</b>
ΗΠΑ	146	ΗΠΑ	188
Γερμανία	25	Γερμανία	27
Ιαπωνία	14	Ιαπωνία	17
Γαλλία	11	Καναδάς	12
Καναδάς	10	UK	10
Ιταλία	8	Γαλλία	9
Ηνωμένο Βασίλειο	6	Ιταλία	9
Ινδία	6	Ινδία	6
Ισραήλ	3	Ισραήλ	4
Νότια Κορέα	2	Νότια Κορέα	4

<b>Νανο-τεχνολογία (Υ01Ν)</b>			
<b>Χώρες εφαρμογών</b>	<b>Αριθμός</b>	<b>Χώρες ερευνών</b>	<b>Αριθμός</b>
ΗΠΑ	1136	ΗΠΑ	117
Ιαπωνία	461	Ιαπωνία	600
Γερμανία	199	Γερμανία	200
Ηνωμένο Βασίλειο	59	Νότια Κορέα	73
Γαλλία	52	UK	68
Νότια Κορέα	48	Καναδάς	38
Ολλανδία	37	Γαλλία	37
Καναδάς	32	Ταϊβάν	29
Ιταλία	16	Ολλανδία	29
Ταϊβάν	15	Ελβετία	21
Σιγκαπούρη	13	Ισραήλ	19
Βέλγιο	13	Σουηδία	19
Ελβετία	13	Ιταλία	19
Κίνα	13	Σιγκαπούρη	17
Σουηδία	12	Βέλγιο	16
Ισραήλ	12	Δανία	14
Δανία	10	Κίνα	14
Αυστραλία	7	Αυστραλία	10
Αφρικανική IPO	7	Αφρική IPO	7
Ινδία	6	Φινλανδία	7
Φινλανδία	5	Ινδία	6
Ισπανία	3	Ρωσία	5
Βραζιλία	3	Ισπανία	4
Αυστρία	3	Κύπρος	3
Ρωσία	3	Βραζιλία	3
Κύπρος	2	Αυστρία	3
<b>Νανο-ηλεκτρονική (Υ01Ν4)</b>			
<b>Χώρες εφαρμογών</b>	<b>Αριθμός</b>	<b>Χώρες ερευνών</b>	<b>Αριθμός</b>
USA	422	USA	413
Ιαπωνία	192	Ιαπωνία	258
Γερμανία	55	Γερμανία	60
Ολλανδία	28	Νοτιά Κορέα	40
Νότια Κορέα	24	Ολλανδία	19
Καναδάς	11	Ελβετία	12
Γαλλία	10	UK	11
UK	8	Σουηδία	10
Σουηδία	6	Ταϊβάν	10
Ταϊβάν	5	Καναδάς	10

<b>Νανο-οπτική (Y01N10)</b>			
<b>Χώρες εφαρμογών</b>	<b>Αριθμός</b>	<b>Χώρες ερευνών</b>	<b>Αριθμός</b>
ΗΠΑ	171	ΗΠΑ	162
Ιαπωνία	102	Ιαπωνία	120
UK	26	UK	25
Γερμανία	16	Γερμανία	18
Γαλλία	10	Νότια Κορέα	9
Νότια Κορέα	6	Καναδάς	8
Καναδάς	6	Δανία	7
Ισραήλ	5	Ιταλία	6
Σιγκαπούρη	5	Σιγκαπούρη	6
Δανία	5	Ισραήλ	5
<b>Νανοϋλικά (Y01N6)</b>			
<b>Χώρες εφαρμογών</b>	<b>Αριθμός</b>	<b>Χώρες ερευνών</b>	<b>Αριθμός</b>
USA	303	USA	345
Ιαπωνία	114	Ιαπωνία	146
Γερμανία	65	Γερμανία	61
UK	21	UK	21
Γαλλία	17	Νότια Κορέα	21
Νότια Κορέα	15	Ταϊβάν	15
Βέλγιο	8	Γαλλία	14
Ταϊβάν	8	Καναδάς	9
Καναδάς	6	Βέλγιο	7
Κίνα	5	Σιγκαπούρη	7
<b>Νανο-μαγνητισμός (Y01N12)</b>			
<b>Χώρες εφαρμογών</b>	<b>Αριθμός</b>	<b>Χώρες ερευνών</b>	<b>Αριθμός</b>
USA	214	USA	191
Ιαπωνία	112	Ιαπωνία	166
Γερμανία	29	Γερμανία	27
Ολλανδία	10	Νότια Κορέα	7
Γαλλία	6	Ολλανδία	5
Νότια Κορέα	5	Γαλλία	3
Κίνα	2	Κίνα	2
Ινδία	2	Φιλανδία	2
Ισραήλ	1	Ισραήλ	2
Βραζιλία	1	Ινδία	1
Σιγκαπούρη	1	Βραζιλία	1
		Σιγκαπούρη	1
		Βέλγιο	1
		Ταϊβάν	1

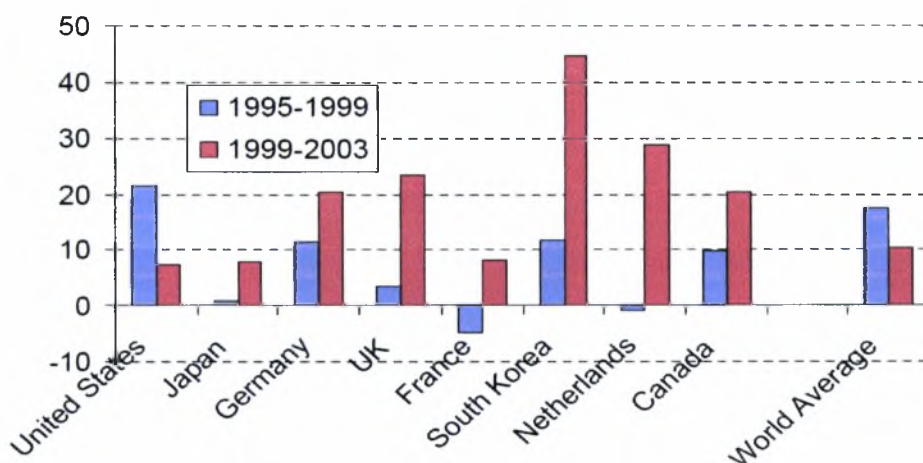
Το σχήμα 6.18 δείχνει την κατανομή για τις 8 πρώτες χώρες στα διπλώματα ευρεσιτεχνίας για τις τάξεις της νανοτεχνολογίας το 2003, για δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους.



**Σχήμα 5.18** Διπλώματα ευρεσιτεχνίας στην νανοτεχνολογία των 8 πρώτων χωρών, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Γραφείο Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας για τις τάξεις Y01N2-Y01N12. Πάνω 1995-1999, Κάτω 2000-2005. Πηγή: Ευρωπαϊκό Γραφείο Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας, το 2006.

Συγκρίνοντας την κατανομή των υποκατηγοριών μεταξύ των δύο περιόδων, μερικές ενδιαφέρουσες μετατοπίσεις των κέντρων βάρους μπορούν να παρατηρηθούν. Ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες συνέχισαν στην ίδια κατεύθυνση, η Ιαπωνία, η Γερμανία, η Γαλλία, η Νότια Κορέα και ο Καναδάς κινήθηκαν προς τα νανοϋλικά. Η Γερμανία, η Νότια Κορέα και ιδίως οι Κάτω Χώρες έχουν βελτιωθεί στον τομέα της νανο-ηλεκτρονικής, ενώ στην νανο-οπτική το Ηνωμένο Βασίλειο, στις νανο-συσκευές ο Καναδάς και στον νανο-μαγνητισμό η Νότια Κορέα. Είναι ενδιαφέρον ότι, το μερίδιο των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στην νανο-βιοτεχνολογία είναι στάσιμο ή μειώθηκε σε κάθε χώρα.

Τα ετήσια ποσοστά ανάπτυξης των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στην νανοτεχνολογία σε κάθε μία από τις οκτώ κορυφαίες χώρες το 2003, εμφανίζεται στο σχήμα 6.19.



**Σχήμα 6.19** Μέση ετήσια ποσοστά ανάπτυξης των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στην νανοτεχνολογία για το 2003 στις πρώτες 8 χώρες για την Y01N. Πηγή: EPO, το 2006.

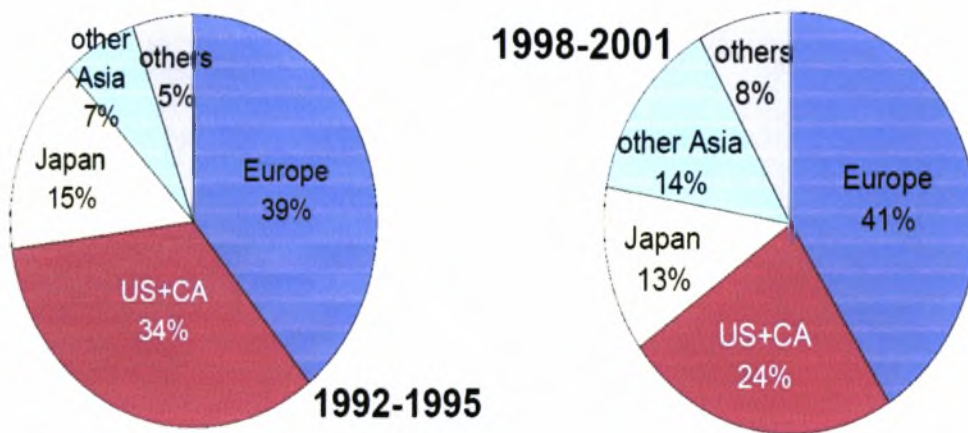
Η αύξηση του αριθμού των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στη νανοτεχνολογία που προέρχονται από τις Ηνωμένες Πολιτείες είναι παρόμοια με τη συνολική ανάπτυξη όλων των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στη νανοτεχνολογία, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αύξηση στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και μικρότερη στις αρχές του 2000. Με το 50% όλων των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας στη νανοτεχνολογία να αναπτύσσεται στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η αντίθετη εικόνα μπορεί να παρατηρηθεί για όλες τις άλλες χώρες: οι μικρές αυξήσεις ή ακόμη και μειώσεις στις, (Γαλλία, Κάτω Χώρες) στη δεκαετία του 1990 και σημαντική

αύξηση το έτος 2000. Η Γερμανία, ο Καναδάς, το Ηνωμένο Βασίλειο ακολουθούμενες από την Ολλανδία και την Νότια Κορέα έχουν δείξει μια πολύ πιο δυναμική ανάπτυξη κατά την τελευταία περίοδο.

### 6.7 Η επιστημονική βάση της νανοτεχνολογίας: επιστημονικές δημοσιεύσεις και αναφορές.

Οι Επιστημονικές δημοσιεύσεις είναι ο πιο κατάλληλος δείκτης για τη μέτρηση της επιστημονικής επιτυχίας με την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, ο καθαρός αριθμός αποτελεσμάτων θα μπορούσε να είναι παραπλανητικός. Άλλος δείκτης, όπως οι αναφορές αντανakλούν την ποιότητα των επιστημονικών χαρτιών και τον αντίκτυπό τους στην επιστημονική κοινότητα. Συγκρίνοντας τις περιοχές του κόσμου, το σχήμα 6.20 δείχνει την Ευρώπη στην πρωτοπορία του αριθμού των επιστημονικών δημοσιεύσεων στην νανοτεχνολογία.

161



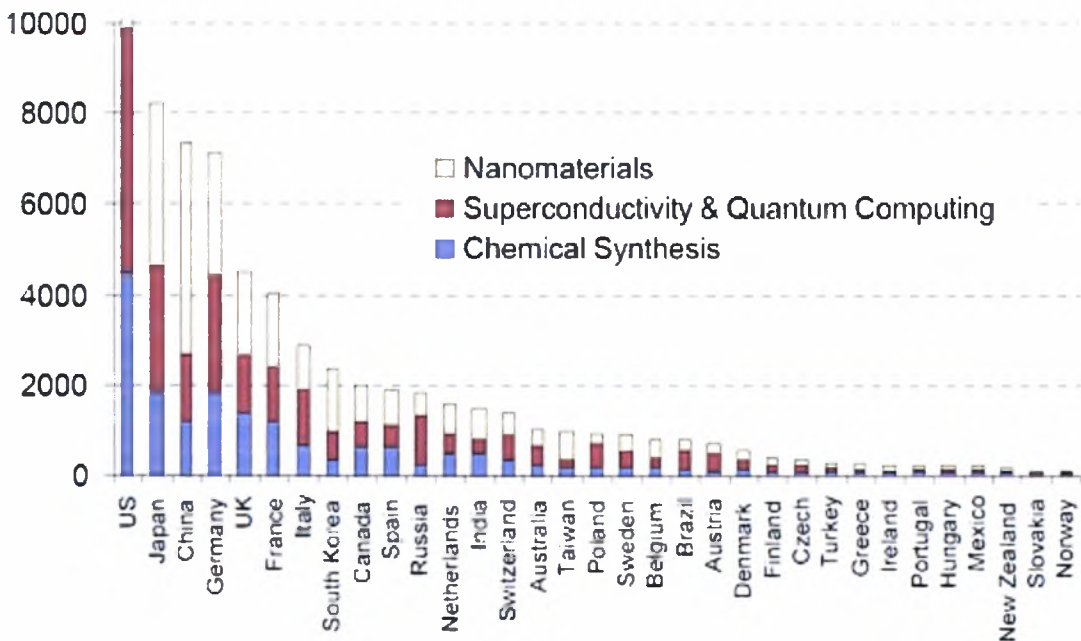
**Σχήμα 6.20** Επιστημονικές δημοσιεύσεις στον τομέα της νανοτεχνολογίας στη βάση δεδομένων της *Science Citation Index*, SCI, ανά τον κόσμο, 1992-1995 και 1998-2001. Στην «Ευρώπη» περιλαμβάνονται τα κράτη μέλη της ΕΕ και οι συνδεδεμένες Χώρες. Πηγή: (Glänzel et al., 2003). [http://www.steunpuntoos.be/nanotech\\_domain\\_study.pdf](http://www.steunpuntoos.be/nanotech_domain_study.pdf)

Στη δεκαετία του 1990, το Ευρωπαϊκό μερίδιο αυξήθηκε ελαφρά, ενώ ο αριθμός των επιστημονικών δημοσιεύσεων που προέρχονται από τις ΗΠΑ και τον Καναδά μειώθηκαν ιδιαίτερα, αλλά η Ασία, δηλαδή η Κίνα, κέρδισαν σημαντικά. Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η Ευρώπη έχει μια μεγάλη επιστημονική βάση στον τομέα της νανοτεχνολογίας, σε σύγκριση



με τους κύριους ανταγωνιστές. «Άλλες χώρες της Ασίας» είναι η πιο δυναμική περιοχή του κόσμου. Μια πιο προσεκτική ματιά στις διάφορες χώρες, θα ρίξει φως στην προέλευση των δημοσιεύσεων στις νανοεπιστήμες. Το σχήμα 6.21 δείχνει τα στοιχεία σχετικά με τον αριθμό των δημοσιεύσεων κατά χώρα και κατά επιστημονικό κλάδο.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες είναι πιο δραστήριες με συνολικά περισσότερες από 18000 δημοσιεύσεις στις νανοεπιστήμες στην χρονική περίοδο 1999 - 2004. Η Ιαπωνία και η Κίνα ακολουθούν, αλλά με μια μεγάλη διαφορά. Οι μεγαλύτερες ευρωπαϊκές χώρες είναι στις θέσεις τέσσερα έως επτά ακολουθούν η Νότια Κορέα, ο Καναδά, η Ισπανία στην πρώτη δεκάδα. Η εικόνα αλλάζει ελαφρώς όταν κάποιος κάνει την διάκριση μεταξύ των τριών νανοεπιστημονικών υποπεδίων της χημικής σύνθεση, της υπεραγωγιμότητα τους κβαντικούς υπολογιστές, και τα νανοϋλικά.



**Σχήμα 5.21** Επιστημονικές δημοσιεύσεις στις νανοεπιστήμες ανά χώρα και υποπεδίο, 1999-2004 (SCI βάση δεδομένων). Πηγές: Igami, 2006, Science Citation Index 1999-2004.

Στα πρώτα δύο πεδία, η Γερμανία είναι κατά πολύ ισχυρότερη από την Κίνα, σε παρόμοιο επίπεδο με την Ιαπωνία, και το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γαλλία επίσης βρίσκονται σε παρόμοιο επίπεδο με την Κίνα. Η Κίνα είναι πολύ ισχυρή στα νανοϋλικά, και στη δεύτερη θέση βρίσκεται η Ιαπωνία.

Δεν έχουν όλες οι επιστημονικές δημοσιεύσεις την ίδια ποιότητα και αξία και δεν δημιουργούν τον ίδιο αντίκτυπο. Ένας καλός δείκτης για την

ποιότητα των δημοσιεύσεων και της σημασίας που έχουν οι επιπτώσεις τους είναι ο αριθμός των αναφορών τους που έχουν λάβει\*. Ο πίνακας 6.3 δείχνει τον αριθμό των δημοσιεύσεων και αναφορών στην νανοτεχνολογία στις 24 πρώτες χώρες στην δεκαετία του 1990.

Όταν πρόκειται για τη σχετική επίπτωση, δύο μικρές χώρες είναι οι πρώτες: η Ελβετία και η Ολλανδία. Στις τρεις πρώτες συμπεριλαμβάνονται οι Ηνωμένες Πολιτείες. Οι άλλες πιο δραστήριες χώρες το Ηνωμένο Βασίλειο (που εκπροσωπείται εδώ από τη Αγγλία και τη Σκωτία), η Γαλλία, η Ιαπωνία και η Γερμανία βρίσκονται μόνο στην μεσαία γραμμή, πίσω από τον Καναδά, το Βέλγιο, την Ιρλανδία και τη Δανία. Οι τρεις πιο δυναμικές χώρες η Ρωσία, η Κίνα και η Νότια Κορέα ολοκληρώνουν την εικόνα. Η λίστα των πρώτων χωρών στον τομέα της νανοτεχνολογίας αντανακλά επίσης ένα γενικό φαινόμενο. Αν μια χώρα είναι αγγλόφωνη ή δεν έχει μια ισχυρή γλώσσα από την άποψη του αριθμού των προσώπων που την μιλάει, ή να είναι πολύ γλωσσική, έχει μια πολύ μεγαλύτερη τάση για δημοσιεύσεις στα «περιοδικά παγκόσμιας εμβέλειας» στην αγγλική γλώσσα, τα οποία έχουν υψηλότερη αντίκτυπο από της εθνικής γλώσσας με μικρότερο δυναμικό στο αναγνωστικό κοινό και συνεπώς, μικρότερο αντίκτυπο. Τα κορυφαία περιοδικά στα οποία παρατίθενται έγγραφα για τις νανοεπιστήμες είναι το ευρωπαϊκό «Nature» και το «Science» των ΗΠΑ. Και τα δύο περιοδικά είναι διεπιστημονικά, και πολύ κατάλληλα για νανοεπιστημονικές δημοσιεύσεις. Η συντριπτική πλειοψηφία των νανοεπιστημονικών εντύπων είναι στους τομείς της χημείας και της φυσικής, μερικά δε αναφέρονται και στην έρευνα των υλικών. Στην κορυφή της κατάταξης, βρίσκονται τα Νανοδομικά Υλικά που είναι ρητά αφιερωμένα στις νανοεπιστήμες μόνο.

Αυτές οι παρατηρήσεις υποστηρίζουν το διεπιστημονικό χαρακτήρα των νανοεπιστημών: Ένα άρθρο μπορεί νανοεπιστήμης μπορεί να είναι χρήσιμο σε πολλούς κλάδους και να έχει συνεπώς μεγαλύτερο αντίκτυπο αν το αναγνωστικό κοινό είναι ευρύ, όπως συμβαίνει με το «Nature», και το «Science».

---

\*Για περισσότερες εξελιγμένες αναλύσεις πρέπει να εξετασθεί ο αριθμός των αναφορών σχετικά με τον μέσο αριθμό των παραπομπών στον τομέα τους.

**Πίνακας 6.3** Αριθμός των δημοσιεύσεων και αναφορών στην νανοτεχνολογία στη βάση δεδομένων του SCI το 1991-2000 για τις 24 πρώτες χώρες που αναφέρονται. Πηγή: Thomson ISI , 2001.

α/α	ΧΩΡΑ	Αριθμός αναφορών	Αριθμός πόλεων	Αναφορές ανά πόλη
1	Ελβετία	792	8233	10,40
2	Ολλανδία	514	4767	9,27
3	ΗΠΑ	9993	92108	9,22
4	Καναδάς	754	5707	7,57
5	Βέλγιο	382	873	7,52
6	Ιρλανδία	131	926	7,07
7	Αγγλία +Σκωτία	1.545	10.325	6,68
8	ΕΕ-25	22069	145681	6,60
9	Δανία	217	1401	6,46
10	Γαλλία	2673	17168	6,42
11	Ιαπωνία	4251	26267	6,18
12	Γερμανία	3634	22373	6,16
13	Ισπανία	874	5.131	5,87
14	Ισραήλ	371	2063	5.56
15	Βραζιλία	245	1253	5.11
16	Αυστρία	220	1103	5.01
17	Ιταλία	958	4585	4.79
18	Σουηδία	381	1.729	4.54
19	Αυστραλία	349	1508	4.32
20	Ινδία	636	2005	3.15
21	Πολωνία	387	969	2,50
22	Ρωσία	1.708	4.240	2,48
23	Κίνα	3.168	7.653	2,42
24	Νότια Κορέα	579	1243	2.15

Ένας άλλος γενικότερος λόγος είναι ότι μόνο υψηλής ποιότητας, άρθρα γίνονται δεκτά σε αυτά τα περιοδικά, κάτι το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό ενδιαφερόμενων και στη δημιουργία περισσότερων άρθρων. Μπορούμε επίσης να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι οι επιδόσεις των

νανοεπιστημών στο μεγαλύτερο μέρος του ευρωπαϊκού χώρου είναι διαφορούμενες. Οι ευρωπαϊκές χώρες είναι πολύ ενεργοποιημένες και παρουσιάζουν ένα υψηλό ποσοστό επιδράσεων όσον αφορά την επιστήμη, κάτι που συναντάται εξίσου και στην περίπτωση των Ηνωμένων Πολιτειών. Σε σύγκριση με τα στοιχεία των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, δύο είναι τα σημαντικότερα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν. Πρώτον, η Ευρώπη δεν παρουσιάζει ομοιογένεια ούτε στις εκδόσεις ούτε στα διπλώματα ευρεσιτεχνίας. Δεν υπάρχουν βέβαια αποδεικτικά στοιχεία για το «ευρωπαϊκό παράδοξο», παρά μια διασπορά των γνώσεων και τεχνολογικών εφαρμογών σε ολόκληρη την Ευρώπη. Δεύτερον, οι Ηνωμένες Πολιτείες αποτελούν ένα σημείο αναφοράς, όταν πρόκειται για την επιστημονική και τεχνολογική επιτυχία στην νανοτεχνολογία. Το συμπέρασμα αυτό δεν είναι νέο, αλλά ενισχύεται με αποδεικτικά στοιχεία.

## **6.8 Συμπεράσματα**

Η εμπειρική ανάλυση της οικονομικής ανάπτυξης της νανοτεχνολογίας προφανώς ξεκινάει με τις προοπτικές της αγοράς. Αυτές οι προοπτικές που αναφέρονται στην νανοτεχνολογία, στο σύνολό της διαφέρουν πολύ και διαμορφώνονται από το σκοπό για τον οποίο προορίζονται. Αυτό οφείλεται στο ότι πραγματικά περιστατικά δεν είναι εύκολο να μετρηθούν και σχεδόν αδύνατο να φανεί εκ των προτέρων η προοπτική τους. Ωστόσο, τα στοιχεία παρουσιάζονται επαρκώς αξιόπιστα, διότι είναι συνεπή και προλαμβάνουν τους διαφορετικούς ρυθμούς, σε διαφορετικούς τομείς της νανοτεχνολογίας και των διάφορων σημαντικών ανακαλύψεων στις χώρες που ενδιαφέρονται για την νανοτεχνολογία. Μετά από αυτό το σημείο, μπορούμε πραγματικά να αναμένουμε ένα λαμπρό μέλλον για την νανοτεχνολογία. Λόγω του χαρακτήρα της και της ιδιαίτερης σημασίας για τη φαρμακοβιομηχανία και τη βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών, υπάρχει η δυνατότητα πολύ εύκολα να ξεπεραστεί ο παραδοσιακός τομέας της βιοτεχνολογίας και ακόμη να φθάσει και να ξεπεράσει το σημερινό επίπεδο που αφορά στις τεχνολογίες της πληροφορίας και της επικοινωνίας.

Οι εξελίξεις αυτές θα έχουν επίσης τεράστια επίδραση στον αριθμό των

θέσεων εργασίας στις βιομηχανίες. Οι εταιρίες που ασχολούνται με τη нанοτεχνολογία δημιουργήθηκαν κατά το παρελθόν και αναμένεται να προσφέρουν πολλά περισσότερα στο μέλλον. Σε αντίθεση με την βιοτεχνολογία, πολλές από αυτές τις εταιρείες θα εργαστούν σε τομείς όπου το μέγεθος της εταιρίας θα είναι λιγότερο σημαντικό για την έρευνα, την ανάπτυξη (E & A), την παραγωγή ή το μάρκετινγκ. Μόλις καταφέρουν και αποκτήσουν μια τεχνολογική επιτυχία, δεν θα είναι καταδικασμένες να κατακτηθούν και να απορροφηθούν από μια μεγάλη εταιρεία. Οι μεγάλες πολυεθνικές εταιρείες έχουν ήδη δεσμευτεί στη нанοτεχνολογία και δαπανούν ένα αρκετά σημαντικό ποσό χρημάτων για έρευνες πάνω σε αυτήν. Επιπλέον, τα επιχειρηματικά κεφάλαια για νεοσύστατες εταιρείες που ασχολούνται με το αντικείμενο είναι διαθέσιμα. Αν και τα πράγματα δεν φαίνονται τόσο αισιόδοξα όπως με την έκρηξη της «φούσκας» του Διαδικτύου, οι επιχειρηματίες έχουν ανακαλύψει τη нанοτεχνολογία ως το επόμενο μεγάλο πράγμα και ακολουθούν με πολλή προσοχή και φροντίδα τις εξελίξεις στον τομέα αυτόν.

Όσον αφορά τη χρηματοδότηση της έρευνας στην περιοχή της нанοτεχνολογίας, ορισμένες διαφορές μεταξύ των διαφόρων περιοχών του κόσμου γίνονται προφανείς. Στην Ευρώπη, οι ιδιώτες επενδυτές έχουν μείνει πίσω σε σχέση με τις δημόσιες υπηρεσίες χρηματοδότησης, ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ιαπωνία έχουν πιο ισορροπημένη κατανομή της ιδιωτικής και δημόσιας χρηματοδότησης, τη στιγμή που η Ευρωπαϊκή έρευνα για την нанοτεχνολογία θα πρέπει να υποφέρει από τη μείωση των ιδιωτικών πηγών χρηματοδότησης. Αφ' ετέρου και για να προστεθεί και μία θετική πλευρά, η δημόσια χρηματοδότηση της нанοτεχνολογίας στην Ευρώπη είναι ανταγωνιστική σε παγκόσμιο επίπεδο και δείχνει την έγκαιρη αντίδραση της ευρωπαϊκής πολιτικής στην έρευνα για τις νέες δυνατότητες που διανοίγονται από τη нанοτεχνολογία και τελικά στη προσπάθεια να συμμετέχουν όσο το δυνατόν αξιότερα στον αγώνα για την κατάκτηση της καινούργιας αυτής τεχνολογίας. Ωστόσο, υπάρχει έλλειψη δέσμευσης για Ευρωπαϊκές ιδιωτικές επενδύσεις στην нанοτεχνολογία, κάτι που να παρατηρηθεί στις συνολικές δαπάνες για την έρευνα και ανάπτυξη, γεγονός που πρέπει να αποδώσουμε σε άλλους, περισσότερο γενικούς λόγους του ευρωπαϊκού βιομηχανικού συστήματος έρευνας. Το

πρόβλημα είναι γνωστό και εντάσσεται στο πλαίσιο της συνθήκης της Βαρκελώνης, (Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, 2002).

Το υψηλό επίπεδο της δημόσιας χρηματοδότησης της έρευνας στη νανοτεχνολογία είναι πολύ πιθανό να έχει θετικό αντίκτυπο στην επιτυχία στις επιστήμες και την τεχνολογία της Ευρώπης. Η γνώση και η πνευματική ιδιοκτησία δημιουργείται στα ερευνητικά έργα τα οποία σε μεγάλο βαθμό χρηματοδοτούνται από το δημόσιο. Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή της τεχνολογίας και η μετατροπή της σε εμπορικά επιτυχημένα προϊόντα εξαρτώνται επίσης από την ενσωμάτωση της τεχνολογίας σε αυτά τα έργα, η οποία γίνεται, αλλά πρέπει να βελτιωθεί. Σε αυτή την σχέση, μπορεί να θεωρηθεί ως πλεονέκτημα ότι η Ευρώπη επικεντρώνεται στις εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού στην νανοτεχνολογία, ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες ξοδεύουν ένα μεγάλο μερίδιο της δημόσιας χρηματοδότησης στην νανοτεχνολογία για στρατιωτική έρευνα. Μια άλλη θετική πτυχή της ουσιαστικής πολιτικής της δημόσιας χρηματοδότησης στην Ευρώπη είναι η κοινωνική διάσταση: Η νανοτεχνολογία θα έχει θετικό αντίκτυπο στην οικονομική ανάπτυξη, εάν παρέχει νέες λύσεις και δεν δημιουργεί νέα προβλήματα. Μόνο σε αυτή την περίπτωση η κοινωνία θα είναι μπροστά από τους καταναλωτές. Οι ομάδες πίεσης και οι ρυθμιστικοί οργανισμοί πρέπει να αποδέχονται την υποστήριξη των προϊόντων νανοτεχνολογίας.

Οι τρέχουσες συζητήσεις σχετικά με τους ενδεχόμενους κινδύνους των νανοσωματιδίων απευθύνονται στους συμβαλλομένους με τις ερευνητικές δραστηριότητες των σχετικών θεμάτων. Η πολιτική δράση είναι επίσης απαραίτητη εάν οι κίνδυνοι αποδειχθούν ότι είναι κοινωνικά μη παραδεκτοί σε μεγάλο βαθμό. Η δυνατότητα να κατευθυνθεί πολιτικά η έρευνα, δηλαδή ο ορισμός των τομέων προτεραιότητας, όπως η έρευνα σχετικά με θέματα ασφάλειας της νανοτεχνολογίας, για τις νέες περιβαλλοντικές λύσεις, ή της νέες ιατρικές συσκευές, είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα της δημοσίας χρηματοδοτούμενης έρευνας. Επηρεάζοντας την κατεύθυνση της έρευνας στη νανοτεχνολογία, θα μπορεί να ανταποκρίνεται στις κοινωνικές προσδοκίες και κατά συνέπεια να έχει θετικό οικονομικό αντίκτυπο.

Τα πολιτικά διδάγματα από τα στοιχεία δεν είναι νέα. Η Ευρώπη πάει

καλά, αλλά έχει να μειώσει το κενό με τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία σε πολλούς τομείς και για πολλούς δείκτες. Επιπλέον, η Ευρώπη έχει να παρατηρήσει προσεκτικά την εξέλιξη στις αναδυόμενες χώρες της νανοτεχνολογίας όπως η Κίνα, η Ινδία και η Ρωσία. Πολλά εξαρτώνται από την επιστημονική και τεχνολογική επιτυχία στην Ευρώπη, προκειμένου να ενισχυθεί η βασική γνώση της νανοτεχνολογίας στον τομέα της έρευνας και της βιομηχανίας, και να μην αγνοηθεί η παράλληλη ανάγκη για καλά μορφωμένους ερευνητές της νανοτεχνολογίας σε ένα κόσμο πολύ ανταγωνιστικό στην παραγωγή γνώσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

---

### ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Η κατασκευαστική βιομηχανία είναι τόσο παλιά όσο και η πολιτισμένη διαβίωση του ανθρώπου, που έχει υποστεί τεράστιες αλλαγές τους τελευταίους δύο αιώνες. Αυτό που την επηρέασε περισσότερο ήταν η βιομηχανική επανάσταση και τα προκύπτοντα αποτελέσματα της όσον αφορά τον χάλυβα, το τσιμέντο και τα άλλα δομικά υλικά. Στον εικοστό αιώνα υπήρξε περαιτέρω βελτίωση στον τομέα των κατασκευών. Τώρα, πρέπει να προχωρήσουμε στην επόμενη φάση, όπου τα υλικά των κατασκευών θα είναι όλο και πιο ελαφρύτερα, ανθεκτικότερα, οικονομικότερα, αποδοτικότερα, καθαρότερα και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Για να επιτευχθούν αυτά πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τις νέες τεχνολογίες, όπως η нанοτεχνολογία. Ειδικότερα η νανο-επιστήμη και η нанοτεχνολογία πρόκειται να αλλάξει δραστικά την οικοδομική βιομηχανία τα επόμενα χρόνια. Η нанοτεχνολογία διαθέτει μια σειρά από δυνατότητες με τις οποίες μπορεί να καταστήσει την βιομηχανία των κατασκευών άξια των προσδοκιών της σημερινής εποχής. Η нанοτεχνολογία προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στα δομικά υλικά και την ίδια στιγμή, χαμηλότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης. Στην πραγματικότητα, με την χρήση των νανοϋλικών, η συντήρηση δεν θα μας απασχολεί για πάρα πολύ καιρό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η χρήση ενεργών υλικών της нанοτεχνολογίας θα δώσει την δυνατότητα στους χρήστες των κτιρίων να τα συντηρούν με πολύ χαμηλό κόστος. Αυτό που απαιτείται είναι η δέσμευση της επιστημονικής κοινότητας για έρευνα στην ανάπτυξη κατάλληλων εφαρμογών της нанοτεχνολογίας και των νανοϋλικών για την βιομηχανία των δομικών κατασκευών, καθώς και μια στενότερη συνεργασία μεταξύ της βιομηχανίας της нанοτεχνολογίας και της κατασκευαστικής βιομηχανίας, αφενός, και αφετέρου μεταξύ των κατασκευαστών και των καταναλωτών.

Η χρήση των νανοϋλικών μπορεί να βελτιώσει την ρευστότητα, τη δύναμη και την αντοχή του σκυροδέματος. Τα νανοϋλικά έχουν επίσης τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση και την ενίσχυση των ιδιοτήτων των αντιδιαβρωτικών υλικών. Η нанοτεχνολογία επέτρεψε στις



επιστρώσεις των δομικών υλικών να αποτελούν την πιο σημαντική εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στον τομέα των κατασκευών. Τα νανο-προϊόντα όπως αρχιτεκτονικά χρώματα, στεγανοποιητικά νερού και υλικά αποκατάστασης επιφανειών χρησιμοποιούνται στις κατασκευές και προσφέρουν ανθεκτικότητα στις χαράξεις των επιστρώσεων των δαπέδων από βινύλιο και στις μονωτικές επικαλύψεις. Τα νανο-τεχνολογικά προϊόντα και οι εφαρμογές τους, μεταξύ των άλλων, μπορεί να αυξήσουν την απόδοση σε σχέση με την προστασία από τις υπεριώδεις ακτίνες, την διαφάνεια των δομών και την αντίσταση στους ρύπους και τις οσμές. Επιπλέον, τα επιχρίσματα νανοτεχνολογίας μπορεί να επιτρέψουν τη δημιουργία αυτο-καθοριζόμενων επιφανειών. (Zhi, 2008). Πολλές από αυτές έχουν ήδη ενσωματωθεί στα ποτήρια, στα παράθυρα και στις υδραυλικές εγκαταστάσεις.

Θα πρέπει, βέβαια, να γίνουν σοβαρές προσπάθειες ώστε η εισαγωγή των μαθημάτων νανοτεχνολογίας στα προγράμματα σπουδών, όλων των πανεπιστημιακών σχολών που σχετίζονται με τις θετικές επιστήμες, να είναι επιβεβλημένη. Χωρίς συστηματική εκπαίδευση στις νανοτεχνολογίες δεν είναι δυνατή η αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την νανοτεχνολογία. Έχουμε ήδη καθυστερήσει πάρα πολύ, σε σχέση με τις άλλες χώρες όπου υπάρχει μεγάλο φάσμα σπουδών στην νανοτεχνολογία σε όλα τα επίπεδα.

Ο διδάσκων θα πρέπει να ανατρέξει σε στοιχεία που δεν διδάχθηκε στα πλαίσια των Πανεπιστημιακών του Σπουδών αλλά επίσης θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιήσει κατάλληλα προετοιμασμένα εργαστηριακά πειράματα ή/και δραστηριότητες, όπως και εποπτικό υλικό προκειμένου να το αναδείξει την σημασία των σχετικών φαινομένων. Σίγουρα ο ρόλος των μοντέλων, της προσομοίωσης και της εικονικής πραγματικότητας προσφέρεται ιδιαίτερα για την διδασκαλία τέτοιων θεμάτων προκειμένου οι μαθητές να «εμβυθισθούν» στον μικρόκοσμο και να εμβαθύνουν κατανοώντας την ατομική πραγματικότητα, (Καρακασίδης, Βαβουγιός, 2006).

Οι προβληματισμοί που τίθενται αφορούν τους εμπλεκόμενους άμεσα ή έμμεσα στην εκπαιδευτική διαδικασία και όχι στην διδακτική μεθοδολογία αυτή κάθε αυτή καθώς κάτι τέτοιο αποτελεί σίγουρα το αντικείμενο πολλών

και διαφορετικών επιστημονικών-ερευνητικών πεδίων.

Επειδή αντίστοιχες προσπάθειες έχουν ήδη υλοποιηθεί σε χώρες του εξωτερικού και ιδιαίτερα στις ΗΠΑ παρουσιάζονται στην εργασία μας αυτή ορισμένες από αυτές τις προσπάθειες προκειμένου να ενημερωθούν οι αρμόδιοι παράγοντες. Οι εφαρμογές αν και έγιναν σε διαφορετικά από το Ελληνικό εκπαιδευτικά συστήματα κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικές για εφαρμογή μετά από κατάλληλη αναμόρφωση - προσαρμογή στα πλαίσια του εκπαιδευτικού συστήματος μας. Ας ελπίσουμε ότι με τις κατάλληλες υποδομές, που θα πρέπει να δημιουργηθούν άμεσα και με πολλή και σοβαρή δουλειά θα καλύψουμε το χαμένο έδαφος για την εισαγωγή της νανοτεχνολογίας στην καθημερινή ζωή στην χώρα μας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ειδικά στις ΗΠΑ υπάρχουν πρωτοβουλίες για την διάδοση των σχετικών γνώσεων και στα χαμηλότερα επίπεδα εκπαίδευσης.

Είναι σίγουρο ότι θα χρειαστεί να συνδεθούν οι γνώσεις από τον μικρόκοσμο και τον μικρόκοσμο για το λόγο αυτό οι μηχανικοί και οι άλλοι επιστήμονες του χώρου θα πρέπει να έχουν διεπιστημονικά προγράμματα.

Η εφαρμογή μιας ισχυρής νανοτεχνολογίας στα χέρια των πολιτικών μηχανικών πρέπει να είναι ένας από τους μακροπρόθεσμους στόχους της επιστήμης. Μέσα από την παρασκευή αυτοαναπαραγόμενων ρομπότ οι νανοτεχνολογικές εφαρμογές θα μπορούσαν με τη σειρά τους να χειραγωγήσουν την ύλη στην ατομική κλίμακα, τα κτίρια θα μπορούσαν να «μεγαλώσουν» από έναν σωρό των υλικών, οι επιφάνειες θα μπορούσαν να καθαρίζονται με την ανακύκλωση της βρωμιάς, και η αιθαλομίχλη που θα μπορούσε να μετατρέπεται σε οξυγόνο. Γέφυρες και άλλες μεγάλες κατασκευές που υπόκεινται στο φαινόμενο του συντονισμού λόγω των ανέμων και των σεισμών θα μπορούσαν να μεταβάλουν τη δομή τους έξυπνα για να προσαρμοστούν στις καταπονήσεις. Λακκούβες θα μπορούσαν να «θεραπεύσουν τον εαυτό τους».

Εάν και όταν η νανοτεχνολογία περάσει στην καθημερινή ζωή, δεν πρόκειται να επιφέρει εξωτερικά δραματικές αλλαγές. Πάντα θα αρέσει στους ανθρώπους να κάθονται στα υπαίθρια καφέ, ίσως ακόμη περισσότερο απ' όσο σήμερα, αφού ο ενοχλητικός θόρυβος των κινητήρων εσωτερικής καύσης θα έχει αντικατασταθεί από διακριτικό, συριστικό

βόμβο σαν εκείνον που ακούγεται όταν κλείνει μια φραγή του διαστημόπλοιου Enterprise στην τηλεοπτική σειρά Star Trek. Τη δυσωδία των καυσαερίων θα έχουν διαδεχθεί σποραδικές, σχεδόν ανεπαίσθητες αναθυμιάσεις μεθανόλης, μιας που αυτή πια θα τροφοδοτεί τις κυψέλες καυσίμου. Η εξυπηρέτηση στα καφέ θα είναι πολύ γρήγορη: η επιλογή με την αφή από τον ηλεκτρονικό κατάλογο θα κινητοποιεί την κουζίνα. Ο πελάτης θα πληρώνει το λογαριασμό, φέρνοντας σε επαφή τη χρεωστική κάρτα του με το σύμβολο του ευρώ που θα είναι εκτυπωμένο στο άκρο του καταλόγου. Για τα φιλοδωρήματα θα εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται μετρητά, αφού ηχούν τόσο ευχάριστα και, άλλωστε, θα φέρουν επικάλυψη υγιεινής από αντιβακτηριδιακά νανοσωματίδια. Οι υαλοπίνακες των καφέ θα είναι πολύ ακριβότεροι, επειδή θα επιτελούν πολλές λειτουργίες – συνεπώς, το τελικό κόστος θα είναι μικρότερο: θα απωθούν την ακαθαρσία, θα είναι ανθεκτικά στη χάραξη, θα σκουραίνουν, όταν το φως είναι πολύ έντονο, θα μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρική ενέργεια και, όταν χρειάζεται, θα ανάβουν σαν τεράστιες οθόνες. Θα είναι διασκεδαστικό να παρακολουθεί κανείς παγκόσμια πρωταθλήματα μαζί με άλλους θαμώνες μέσα στα καφέ ή μπροστά στα παράθυρά τους. Όταν ωριμάσει η νανο-ηλεκτρονική, είναι πιθανόν να δημιουργηθούν συσκευές εντυπωσιακής κομψότητας, όπως ένας πραγματικός PDA (Personal Digital Assistant/προσωπικός ψηφιακός βοηθός) σε σχήμα πιστωτικής κάρτας (όχι πως δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί και μικρότερο μέγεθος, αλλά επειδή θα πρέπει να είναι πρωτ' απ' όλα εύχρηστος για τα ανθρώπινα χέρια).

Το παραγόμενο προϊόν της νανοτεχνολογίας μπορεί να είναι ένας μαύρος ματ μονόλιθος, χωρίς εμφανείς δομές, με τις μαύρες επιφάνειες να συλλέγουν ηλιακό φως και να το μετατρέπουν σε ισχύ. Θα είναι ανθεκτικό στη χάραξη, επικαλυμμένο με λεπτότατο αδαμάντινο στρώμα, κάτω από το οποίο θα υπάρχει λεπτή πιεζοκεραμική στιβάδα, που θα μετατρέπει τον ήχο σε ηλεκτρική τάση, ώστε να επιτρέπει τη φωνητική επικοινωνία. Φυσικά, θα εξασφαλίζει επίσης την οπτική και ασύρματη μεταβίβαση δεδομένων. Το ίδιο προϊόν θα μπορεί να έχει επίσης όραση, μέσω ενός επίπεδου φακού και ενός μετατροπέα εικόνων μεγάλης διακριτικής ικανότητας. Κατά βούληση, θα ανάβει σαν οθόνη, παρέχοντας έτσι σε μία

συσκευή μαγνητόφωνο, φωτογραφική μηχανή, βιντεοκάμερα, τηλεοπτικό δέκτη, κινητό τηλέφωνο και, μέσω του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού GPS, βοήθημα προσανατολισμού. Θα είναι ικανό, όταν χρειάζεται, σε ένα παρισινό καφέ, να διαβάσει, να μεταφράσει και να εξηγήσει τον κατάλογο, να μεταβιβάσει την παραγγελία και να πληρώσει το λογαριασμό. Θα αναγνωρίζει φυσικά τη φωνή και το δακτυλικό αποτύπωμα του ατόμου που θα έχει την άδεια να το χρησιμοποιεί και, έτσι, θα αυτό-προστατεύεται από κατάχρηση, (Schulenburg, 2007). Όλα τα παραπάνω αποτελούν ίσως στόχους επιστημονικής φαντασίας για την νανοτεχνολογία άλλα το μέλλον θα δείξει αν θα τους προσεγγίσει η θα προχωρήσουμε στην Πικο-τεχνολογία, (Pico-technology), ή ακόμη και στην Φεμτο-τεχνολογία, (Femto-technology).

## Κεφάλαια 1 και 2

- Ahmadi T. S., Wang Z. L., Green T. C., Henglein A. and El-Sayed M. A. Science, 1996.
- Alivisatos, A. P. Perspectives on the physical chemistry of semiconductor nanocrystals. J. Phys. Chem., 1996.
- Allianz Group report, Small sizes that matter: Opportunities and risks of Nanotechnologies, Report in co-operation with the OECD International Futures Programme, 2005.
- Allhoff Fritz, Lin Patrick, and Moore Danie, «What Is Nanotechnology and Why Does It Matter», A. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2010.
- Anquetil, P., *The impact of nanotechnology*, Susquehanna Financial Group, June 2005.
- Dr. Angela Hullmann European Commission, DG Research, Unit “Nano S&T - Convergent Science and Technologies” Version: 28 November 2006.
- Bhattacharyya, S., Bhattacharya, D., & Thampan, A.V, MNRAS, 2001.
- Birringer, R., U. Herr, and H. Gleiter. Structure of nanometer-sized polycrystalline iron investigated by positron lifetime spectroscopy, 1984.
- Braun, A. E., *Nanotechnology: genesis of semiconductors future*, Semiconductor International, November, 2004.
- Brust, M., Walker M., Bethell, D., Schiffrin, D.J. & Whyman, R.J., Synthesis of thiol-derivatised gold nanoparticles in a two-phase liquid–liquid system, 1994.
- Bruchez, M. Jr., M. Moronne, P. Gin, S. Weiss, and A.P. Alivisatos. Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels. *Science* 281:2013-2016, 1998.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Nanotechnology conquers markets for nanotechnology*, BMBF report, 2004.
- Bureau d'Etude Marketing du CEA Business Communication Company (BCC), *Global Nanotechnology Market to Reach \$29 Billion by 2008*, Press Release, February, 2004.
- Business Communication Company (BCC) 2002, cited by Rittner, M., *Market Analysis of Nanostructured Materials*, American Ceramic Society Bulletin, 2002.
- Business Communication Company (BCC), *Opportunities in nanostructured materials: Biomedical, pharmaceutical & cosmetic*, Norwalk, USA, 2001.
- Cao, S., Chen S. J., Free Energy Landscapes of RNA/RNA Complexes-with applications to RNA complexes in spliceosomes, *Journal of Molecular Biology*, 2006.
- Coe M. J., Bird A. J., McBride V. A., Townsend L. J., Corbet R.H.D., Udalski A., 2009.
- Charitidis C. A. Nanostructures and Nanomaterials, Athens 2006.
- Chilcott, J., Jones, A., Mitchell, M., *Nanotechnology: Commercial Opportunity*, Evolution Capital Ltd., London, 2001.
- Cientifica *The Nanotechnology Opportunity Report*, edition 2002.

- Cientifica *The Nanotechnology Opportunity Report*, edition 2003.
- Cientifica *Nanotechnologies for the Textiles Market*, April 2006.
- Compañó R., Hullmann, A.: *Forecasting the development of nanotechnology with the help of science and technology indicators* in: *Nanotechnology*, Volume 13, Number 3, pp. 243-247, 2002.
- Cumings John, A. Zettl. Low-friction nanoscale linear bearing realized from multiwall carbon nanotubes. *Science*, 289(5479), p. 602, 2000.
- Cumings John, A. Zettl, and M. R. McCartney, Carbon Nanotube Electrostatic Biprism: Principle of Operation and Proof of Concept. *Microscopy and Microanalysis*, 10(4), p. 420, 2004.
- Data Mine, *Nanotechnology Grows Up*, Data Mine Technology Review, June 2005.
- Department for Trade and Industry (DTI), 2001, cited by Greenpeace Environmental Trust, *Future Technologies, Today's Choices*, 2003.
- Deutsche Bank AG, *Nanotechnology Market and Company Report*, 2003.
- Dingreville R., Qu J., Cherkaoui M. Surface free energy and its effect

on the elastic behavior of nano-sized particles, wires and films.

*Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 2005.

- DG Bank 2001, cited by DGMWZ Bank, *Im Fokus. Nanotechnologie in der Chemie*. Frankfurt A. M., 2001.
- ElSherik A M, Erb U, , *Metall. Mater.* 1995.
- European Commission, *Some Figures about Nanotechnology R&D in Europe and Beyond*, European Commission, Research DG, December 2005.
- European Commission: *Nanosciences and Nanotechnologies: An action plan for Europe for 2005 to 2009*, Communication, 2005.
- European Commission: *Towards a European Strategy for Nanotechnology*, Communication, 2004.
- European Council, *Presidency Conclusions*, Barcelona European Council, 15 and 16 March 2002.
- Evolution Capital Limited, *Nanotechnology: Commercial Opportunity*, London, 2001.
- Fecht H. J., Ilgner J., Köhler T., Mietke S., Werner M., *Nanotechnology Market and Company Report – Finding Hidden Pearls*, WMtech Center of Excellence Micro and Nanomaterials, Ulm, 2003.
- Freedonia: *Nanotech Tools to 2008: Nanotech Tool Technologies – Microscopy*, on [http://freedonia.ecnext.com/coms2/summary\\_0285-1108\\_ITM](http://freedonia.ecnext.com/coms2/summary_0285-1108_ITM), August 2004.
- Frost&Sullivan, cited by Carillo, D., *Nanosensors' Niche in Nanotechnology*, in: *Cepmagazin-online*, 2002.
- Frost&Sullivan, cited by Stevenson, R, *OLEDs set to glow*, e-zine chemSoc, 2003.

- FTM consulting, *Nanotechnology: Worldwide IC Market*, November, 2004.
- Glänzel W., Meyer, M., du Plessis M., Thijs B., Magerman B., Schlemmer, B. Debackere, K, Veugelers, R.: *Nanotechnology: Analysis of an Emerging Domain of Scientific and Technological Endeavour*, Report of Steunpunt O&O Statistieken, K.U. Leuven, 2003.
- Greenpeace Environmental Trust, *Future Technologies, Today's Choices*, 2003
- Helmut Kaiser Consultancy, *Nanotechnology in Food and Food Processing Industry Worldwide, 2003-2006-2010-2015*, Study, 2004.
- Hullmann, A., Meyer, M., Publications and Patents in Nanotechnology: An overview of previous studies and the state of the art, in: *Scientometrics*, Volume 58, Number 3, pp. 507-527, 2003.
- Huang, Y., Gattoni, R., Stevenin, J., and Steitz, J.A., SR splicing factors serve as adapter proteins for TAP-dependent, 2003.
- Igami, M., *Bibliometric Indicators of Nanoscience Research*, OECD working paper, presented at the NESTI working party, Berlin, 2006.
- Ikezawa, N., *Competitiveness in High-Tech Fields and Nanotechnology*, Nomura Research Institute, 2003.
- In Realis, *A critical investor's guide to nanotechnology*, February, 2002.
- Jiang Y, Jianping W, Bai J, Jia X, Hu Z Biodegradation of phenol at high initial concentration by *Alcaligenes faecalis*, J. Hazard, 2007.
- Kis, A., Jensen, K., Aloni, S., Mickelson, W. & Zettl, A. Interlayer forces and ultralow sliding friction in multiwalled carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.* 97, 2006.
- Li, H., Lin, Y., Heath, R.M., Zhu, M.X., and Yang, Z, Control of pollen tube tip growth by a Rop GTPase-dependent pathway that leads to tip-localized calcium influx. 1999.
- Liao, X. Z., A. R. Kil'mametov, R. Z. Valiev, H. S. Gao, X. D. Li, A. Mukherjee, J. F. Bingert, and Y. T. Zhu High-pressure torsion-induced grain growth in electrodeposited nanocrystalline ni. *Applied Physics Letters* 88, 021909. 2006.
- Lux Research, *Rush to market in nanosensors, but most aren't "nano"*, May 2005.
- Lux Research, *The Nanotech Report 2004*.
- Lux Research, *Sizing Nanotechnology's Value Chain*, October 2004.
- Malow BA, Lin X, Kushwaha R, Aldrich MS. Interictal spiking increases with sleep depth in temporal lobe epilepsy. *Epilepsia* 1998
- McWilliams, A., *Nanotechnology: A Realistic Market Evaluation*, BCC Researchreport, March 2004.
- Mitsubishi Research Institute 2002, cited by Kamei, S., *Promoting Japanese style Nanotechnology Enterprises*, 2002.
- Moradi, M., *Global Developments in Nano-Enabled Drug Delivery Markets*, In *Nanotechnology Law and Business*, 2005.
- Meulenkamp Eric A., *Synthesis and Growth of ZnO Nanoparticles*, American Chemical Society, 1998.

- Mughrabi H., Acta metal, 1983.
- Musil J. and J.Vlcek: Materials Chemistry and Physics 54, 1998.
- NanoForum database on [www.nanoforum.org](http://www.nanoforum.org), 2005.
- NanoInvestorNews database on [www.nanoinvestornews.com](http://www.nanoinvestornews.com), 2005.
- Nanologue *Engaging with researchers and civil society* Report from the Nanologue project, [www.nanologue.net](http://www.nanologue.net), December 2005.
- NanoMarkets, *Nanomemory: Commercial Opportunities for Nano-based Memory and Storage Technologies*, August 2004.
- NanoMarkets LC, Venture Development Associates, 2005.
- Nanopedia, "Carbon Nanotubes."  
<http://nanopedia.case.edu/image/nanotubes.jpg>, January 16, 2008.
- NASA "Nanotubes".2008.
- National Institute of Science and Technology (NISTEP), *Development of New Bibliometric Indicators Assessing Scientific Activities*, study in preparation, Tokyo, 2006.
- National Nanotechnology Coordination Office, 2005.
- National Science Foundation (NSF) 2001, cited by RedHerring, *The Biotech Boom: the view from here*, online article of 5th November, 2001.
- Nicoara, C., Zach, K., Trachsel, D., Germann, D. & Matter, L, Decay of passively acquired maternal antibodies against measles, mumps, and rubella viruses. *Clinical and Diagnostic Laboratory Immunology*, 1997.
- Paull, R., Wolfe, J., Hébert, P., Sinkula, M.: *Investing in nanotechnology*, in: Nature Biotechnology, 2003.
- Ren, Y., Li, R., Zheng, Y. and Busch, H. Cloning and characterization of GEF-H1, a microtubule-associated guanine nucleotide exchange factor for rac and rho GTPases, 1998.
- Reuters, *Degussa investigations into alleged price-fixing in the carbon black industry*, press release, 2002.
- Roco M. C., *Converging science and technology at the nanoscale: opportunities for education and training*, In: Nature Biotechnology, 2003.
- PriceWaterhouseCoopers, Venture Capital data, 2005.
- Sal. Oppenheim 2001, cited by Jankowski, P., *Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie – Schlüsseltechnologien für Deutschland*, Köln, 2001.
- Sanvicens, N.; Marco, M. P. Multifunctional Nanoparticles O Properties and Prospects for Their Use in Human Medicine. *Trends Biotechnol*, 2008.
- Scheu, M. Veefkind, V. Verbandt, Y. Molina Galan, E. Absalom R. and Förster W., *Mapping nanotechnology patents: The EPO approach*, in: World Patent Information, 2006.
- Small Times, *Veeco came, saw, acquired majority of the AFM Market*, [www.smalltimes.com](http://www.smalltimes.com), 2002.
- SRI, *Nanoscale chemicals and materials: An overview on technology, products and applications*, in: SRI-International Report, Speciality Chemicals: Nanotechnology, 2002.
- Thomson ISI database, on <http://www.esi-topics.com/nano/>, 2001.



- US Nanobusiness Alliance 2001, cited by CMP Cientifica, *Nanotech The tiny Revolution*, Madrid, 2002.
- VentureCapital Magazin, *Nano-/Mikrotechnologie*, 2003.
- Verein der Ingenieure - Technologiezentrum (VDI-TZ) *Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt*, Company Survey, 2004.
- Verein der Ingenieure - Technologiezentrum (VDI-TZ) *Innovationsschub aus dem Nanokosmos*, 1998.
- Zhi Ge, Zhili Gao, Applications of Nanotechnology and nanomaterials in Construction, *Karachi, Pakistan*, 2008.
- Yu, X.-J., McBride, J. W., Diaz, C. M. & Walker, D. H. , Molecular cloning and characterization of the 120-kilodalton protein gene of *Ehrlichia canis* and application of the recombinant 120-kilodalton protein for serodiagnosis of canine ehrlichiosis. *J Clin Microbiol*, 2000.
- Yu, X.-J., McBride, J. W., Zhang, X. & Walker, D. H. haracterization of the complete transcriptionally active *Ehrlichia chaffeensis* 28 kDa outer membrane protein multigene family. *Gene*, 2000b.
- Πρακτικά του Διεθνούς Συνεδρίου Μηχανικών Παραγωγής, στο Λονδίνο, μέρος II. British Society of Engineering ακριβείας, 1974.

#### Κεφάλαια 3 και 4

- Balaguru, P. N. "Nanotechnology and Concrete: Background, Opportunities and Challenges." Proceedings of the International Conference – Application of Technology in Concrete *Design*, 2005.
- Boresi, Arthur P.; Chong, Ken P.; Saigal, Sunil. Approximate Solution Methods in Engineering Mechanics, John Wiley, New York, 2002, 280 pp.
- Bakker Erik, Nanotechnology and human health in the construction industry, Report of MSc. NanoScience, April 2008
- Balaguru, P.; and Shah, S.P. Fiber Reinforced Cement Composites, McGraw-Hill, New York, 1992, 530 pp.
- Concrete, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Concrete>.
- COE MALEGAON(BK), BARAMATI, PUNE, MAHARASHTRA, Application of nanotechnology in concrete technology. PIONNEER PRESENTATION, 2009.
- D.C. Rapaport, The Art of Molecular Dynamics Simulation, Cambridge University Press, 1995.
- Gerhard Wilde Nanostructured Materials, Volume 1 (Frontiers of Nanoscience); Elsevier Science, 2009.
- Karakasidis T.E. , C.A. Charitidis, Multiscale modeling in nanomaterials science, 2007.
- LI, G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. Cement and Concrete Research. 34. 2004. P. 1043 – 1049.
- Mc CARTHY, M.J. & DHIR, R.K. Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction. Fuel 84. 2005. P.1423–1432.

- Moon R., Frihart C. and T. Wegner, Nanotechnology applications in the Forest Products Industry, 2006.
- NanoForum database on [www.nanoforum.org](http://www.nanoforum.org), Surinder Mann Institute of Nanotechnology, Nanotechnology and Construction, 2006.
- Nippon Steel Technical Report No.91 January 2005.
- Srivastava, D.; Wei, C.; and Cho, K. "Nanomechanics of carbon nanotubes and composites." Applied Mechanics Review, 56, 2003, 215-230.
- Taneike M., F. Abe, and K. Sawada, Nature London **424**, 294 , 2003.
- Theodore H. Wegner, Jerrold E. Winandy and Michael A. Ritter, NANOTECHNOLOGY OPPORTUNITIES IN RESIDENTIAL AND NON-RESIDENTIAL CONSTRUCTION, In: 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction, 13-16 November 2005, Bilbao, Spain.
- Thomas, J. and Jennings, H. The nanostructure of low-CO2 concrete for a sustainable infrastructure: Technical report on Year 1 activities for Lafarge Cement. Technical report, Northwestern University, Evanston, Illinois, 2008.
- Ulm F.-J., G. Constantinides, F.H. Heukamp, "Is concrete a poro-mechanics material? A multi-scale investigation of poro-elastic properties", *Mater. Struct.* (Special Issue of Concrete Science and Engineering), Vol. **37**, pp. 43-58, 2004.
- Wegner, D. M Who is the controller of controlled processes, In R. Hassin, J.S. Uleman, & J.A. Bargh (Eds.) *The New Unconscious* , New York: Oxford University Press, 2005.
- Zhi Ge, Zhili Gao, Applications of Nanotechnology and Nanomaterials in Construction, *Karachi, Pakistan , 2008*.
- [www.aggregateresearch.com](http://www.aggregateresearch.com)
- [www.nanoc.info/index.html](http://www.nanoc.info/index.html)
- [www.phoenixweigh.com](http://www.phoenixweigh.com)
- <http://technologe.in.pathfinder.gr/nanophos/>

## Κεφάλαιο 5

- Jo Anne Shatkin, Nanotechnology Health and Environmental Risks, 2008.
- ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ Βρυξέλλες, 29.10.2009 COM (2009)607 ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΣΤΟ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟ, ΣΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
  1. Νανοεπιστήμες και нанοτεχνολογίες: ένα σχέδιο δράσης για την Ευρώπη, 2005-2009.
  2. Δεύτερη έκθεση εφαρμογής, ΥΓΕΙΑ, ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ, 2007-2009.
  3. Ρυθμιστικές πτυχές των νανοϋλικών, COM(2008)366, SEC(2008)2036
  4. Ψήφισμα της 24ης Απριλίου 2009 σχετικά με τις ρυθμιστικές πτυχές των νανοϋλικών (2008/2208(INI))

5. Γνώμη της 25ης Φεβρουαρίου 2009 επί της ανακοίνωσης σχετικά με τις ρυθμιστικές πτυχές των νανοϋλικών,
  - <http://cordis.europa.eu/nanotechnology>
  - [http://eesc.europa.eu/documents/opinions/avis\\_en.asp?type=en](http://eesc.europa.eu/documents/opinions/avis_en.asp?type=en)
  - <http://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/nanomaterials.pdf>
  - [http://ec.europa.eu/health/nanohearing\\_en.htm](http://ec.europa.eu/health/nanohearing_en.htm)

## Κεφάλαιο 6

- Alivisatos, A. P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. *Science*, 1996.
- Ashby, M. F. and R. A. Verrall (1973). Diffusion-accommodated flow and superplasticity. *Acta Metallurgica* 21, 149–163.
- Bruchez, M., M. Moronne, P. Gin, S. Weiss, and A. P. Alivisatos (1998). Semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels. *Science* 281(5385), 2013–2016.
- Cao, B., K. T. Ramesh, Li. B and E. Ma (2009). Twinning in nanocrystalline aluminum under high-rate shearing conditions. *Submitted for publication*.
- Cao, G. X. and X. Chen Buckling of single-walled carbon nanotubes upon bending: Molecular dynamics simulations and finite element method. *Physical Review B*, 2006.
- Carsley, J. E., W. W. Milligan, X. H. Zhu, and E. C. Aifantis, On the failure of pressuresensitive plastic materials .2. comparisons with experiments on ultra fine grained fe-10. *Scripta Materialia*, 1997.
- Chan, S., P. M. Fauchet, Y. Li, L. J. Rothberg, and B. L. Miller, Porous silicon microcavities for biosensing applications. *Physica Status Solidi a-Applied Research*, 2000.
- Chen, M. W., E. Ma, K. J. Hemker, H. W. Sheng, Y. M. Wang, and X. M. Cheng Deformation, twinning in nanocrystalline aluminum. *Science* 300(5623), 1275–1277, 2003.
- Chen, X. H. and L. Lu. Work hardening of ultrafine-grained copper with nanoscale twins. *Scripta Materialia* 57(2), 133–136. Chen, X. H. Lu, L., 2007.
- Cheng, S., E. Ma, Y. M. Wang, L. J. Kecskes, K. M. Youssef, C. C. Koch, U. P. Trociewitz, and K. Han, Tensile properties of in situ consolidated nanocrystalline cu. *Acta Materialia* 53(5), 1521–1533, , 2005.
- Chichili, D., K. Ramesh, and K. Hemker, The high-strain-rate response of alpha-titanium: Experiments, deformation mechanisms and modeling. *Acta Materialia* 46, 1025–43, 1998.
- Christian, J. and S. Mahajan Deformation twinning. *Progress in Materials Science* 39, 1–157, 258 *Nanomaterials*, 1995.
- Fritz Allhoff, Patrick Lin, and Daniel Moore, *What Is Nanotechnology and Why Does It Matter? From Science to Ethics* , WILEY-BLACKWELL, 2010.
- Eric Drexler, *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology* (New York: Broadway Books), 1987.

- Erwin Schrodinger, "The Present Situation in Quantum Mechanics," trans. John D. Trimmer, *Proceedings of the American Philosophical Society* 124 323. Schrodinger's original essay was "Die gegenwartige Situation in der Quantenmechanik," *Naturwissenschaften*, 1980.
- Letter to Max Born, written December 4, 1926. In Irene Born (trans.), *The Born-Einstein Letters* (New York: Walker and Company, 1971,
- Birringer, R., H. Gleiter, H. P. Klein, and P. Marquardt. Nanocrystalline materials an approach to a novel solid structure with gas-like disorder. *Physics Letters A* 102(8), 365-369, 1984.
- Meulenkamp, E. A.. Synthesis and growth of zno nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry B* 102(29), 5566-5572, 1998.
- Ren, Z. F., Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, M. P. Siegal, and P. N. Provencio. Synthesis of large arrays of well-aligned carbon nanotubes on glass. *Science* 282(5391), 1105-1107, 1998.
- Brust, M., M. Walker, D. Bethell, D. J. Schiffrin, and R. Whyman. Synthesis of thiol-derivatized gold nanoparticles in a 2-phase liquid-liquid system. *Journal of the Chemical Society-Chemical Communications* 7, 801-802, 1994.
- Ahmadi, T. S., Z. L. Wang, T. C. Green, A. Henglein, and M. A. ElSayed. Shape-controlled synthesis of colloidal platinum nanoparticles. *Science* 272(5270), 1924-1926, 1996.
- Li, M., H. Schnablegger, and S. Mann. Coupled synthesis and self-assembly of nanoparticles to give structures with controlled organization. *Nature* 402(6760), 393-395, 1999.
- Nicoara, G., D. Fratiloiu, M. Nogues, J. L. Dormann, and F. Vasiliu. Ni-zn ferrite nanoparticles prepared by ball milling. In *Synthesis and Properties of Mechanically Alloyed and Nanocrystalline Materials, Pts 1 and 2 - Ismanam-96, Volume 235- of Materials Science Forum*, pp. 145-150. Transtec, 1997.
- Ramesh K. T. , *Nanomaterials Mechanics and Mechanisms*, Springer Science+Business Media, 2009.
- Stephen Wood, *The social and economic challenges of nanotechnology*, E-S-R-C., 2002.
- Wing Kam Liu, Eduard G. Karpov, Harold S. Park - *Nano Mechanics and Materials Theory, Multiscale Methods and Applications*, *Northwestern University, Illinois, USA, 2006*.
- Surinder Mann Institute of Nanotechnology *Nanotechnology and Construction* 31/10/2006
- COM(2005) 243, ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΣΤΟ ΣΥΜΒΟΛΙΟ, ΣΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΝΟΒΟΥΛΙΟ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ, *Νανοεπιστήμες και нанοτεχνολογίες: σχέδιο δράσης για την Ευρώπη, 2005-2009*.
- Conrad, H. and J. Narayan. On the grain size softening in nanocrystalline materials. *Scripta Materialia* 42(11), 1025-1030., 2000.

- Cumings, J. and A. Zettl. Low-friction nanoscale linear bearing realized from multiwall carbon nanotubes. *Science* 289(5479), 602–604, 2000.
- Cumings, J. and A. Zettl. Localization and nonlinear resistance in telescopically extended nanotubes. *Physical Review Letters* 93(8). 086801, 2004.
- Dao, M., L. Lu, Y. F. Shen, and S. Suresh. Strength, strain-rate sensitivity and ductility of copper with nanoscale twins. *Acta Materialia* 54(20), 5421–5432, 2006.
- Dingreville, R., J. Qu, and M. Cherkaoui (2005). Surface free energy and its effect on the elastic behavior of nano-sized particles, wires and films. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 53(8), 1827–1854.
- Gao, H., Y. Huang, W. D. Nix, and J. W. Hutchinson (1999). Mechanism-based strain gradient plasticity - i. theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 47(6), 1239–1263.
- Gianola, D. S., S. Van Petegem, M. Legros, S. Brandstetter, H. Van Swygenhoven, and K. J. Hemker (2006). Stress-assisted discontinuous grain growth and its effect on the deformation behavior of nanocrystalline aluminum thin films. *Acta Materialia* 54(8), 2253–2263.
- Greer, J. R. and W. D. Nix (2006). Nanoscale gold pillars strengthened through dislocation starvation. *Physical Review B* 73(24), 245410.
- Greer, J. R. (2006). Bridging the gap between computational and experimental length scales: A review on nanoscale plasticity. *Reviews on Advanced Materials Science* 13(1), 59–70.
- Hu, N. and J. Molinari (2004). Shear bands in dense metallic granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 52, 499–531.
- Huang, Z. M., Y. Z. Zhang, M. Kotaki, and S. Ramakrishna (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology* 63(15), 2223–2253.
- Iwashita, K. and M. Oda (1998). Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by dem. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE* 124(3), 285–292.
- Jia, D., K. T. Ramesh, and E. Ma (2003). Effects of nanocrystalline and ultrafine grain sizes on constitutive behavior and shear bands in iron. *Acta Materialia* 51(12), 3495–3509.
- Jiang, H., M. F. Yu, J. Q. Lu, Y. Huang, H. T. Johnson, X. G. Zhang, and P. Ferreira (2007). Carbon nanotube electronic displacement encoder with sub-nanometer resolution. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 4(3), 574–577.
- Joshi, S. and K. Ramesh (2008a). Grain size dependent shear instabilities in bcc and fcc materials. *Materials Science and Engineering A* 493, 65–70.
- Joshi, S. P. and K. T. Ramesh (2008b). Rotational diffusion and grain size dependent shear instability in nanostructured materials. *Acta Materialia* 56(2), 282–291.

- Joshi, S. P. and K. T. Ramesh (2008c). Stability map for nanocrystalline and amorphous materials. *Physical Review Letters* 101(2), 025501.
- Kibey, S., J. B. Liu, D. D. Johnson, and H. Sehitoglu (2007). Predicting twinning stress in fcc metals: Linking twin-energy pathways to twin nucleation. *Acta Materialia* 55(20), 6843–6851.
- Kis, A., K. Jensen, S. Aloni, W. Mickelson, and A. Zettl (2006). Interlayer forces and ultralow sliding friction in multiwalled carbon nanotubes. *Physical Review Letters* 97(2), 025501.
- Liao, X. Z., F. Zhou, E. J. Lavernia, S. G. Srinivasan, M. I. Baskes, D. W. He, and Y. T. Zhu (2003). Deformation mechanism in nanocrystalline al: Partial dislocation slip. *Applied Physics Letters* 83(4), 632–634.
- Malow, T., C. Koch, P. Miraglia, and K. Murty (1998). Compressive mechanical behavior of nanocrystalline fe investigated with an automated ball indentation technique. *Materials Science & Engineering A* A252, 36–43.
- Moldovan, D., D. Wolf, and S. Phillipot (2001). Theory of diffusion-accomodated grain rotation in columnar polycrystalline microstructures. *Acta Materialia* 49, 3521–3532.
- Murayama, M., J. Howe, H. Hidaka, and S. Takaki (2002). Atomic-level observation of disclination dipoles in mechanically milled anocrystalline fe. *Science* 295, 2433–2435.
- Nanologue *Engaging with researchers and civil society* Report from the Nanologue project, www.nanologue.net, December 2005.
- 7 Scale-Dominant Mechanisms in Nanomaterials 259 Nix, W. D., J. R. Greer, G. Feng, and E. T. Lilleodden (2007). Deformation at the nanometer and micrometer length scales: Effects of strain gradients and dislocation starvation. *Thin Solid Films* 515(6), 3152–3157.
- Pantano, A., M. C. Boyce, and D. M. Parks (2004). Mechanics of axial compression of single and multi-wall carbon nanotubes. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme* 126(3), 279–284.
- Paull, R., Wolfe, J., Hébert, P., Sinkula, M.: *Investing in nanotechnology*, in: Nature Biotechnology Vol 21, No. 10, p.1145, 2003.
- Roco M. C., *Converging science and technology at the nanoscale: opportunities for education and training*, In: Nature Biotechnology Vol. 21, pp. 1247-1249, 2003.
- Rosakis, P. and H. Y. Tsai (1995). Dynamic twinning processes in crystals. *International Journal of Solids and Structures* 32(17–18), 2711–2723.
- Sanvicens, N. and M. P. Marco (2008). Multifunctional nanoparticles - properties and prospects for their use in human medicine. *Trends in Biotechnology* 26(8), 425–433.
- Scheu, M. Veefkind, V. Verbandt, Y. Molina Galan, E. Absalom R. and Förster W., *Mapping nanotechnology patents: The EPO approach*, in: World Patent Information, 28, pp. 204-211, 2006.
- Spitzig, W. and A. Keh (1970). The effect of orientation and temperature on the plastic flow properties of iron single crystals.

- Acta Metallurgica* 18(6), 611–622. Stronge, W. (2000). *Impact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sun, P., E. Cerreta, G. Gray, and J. Bingert (2006). The effect of grain size, strain rate, and temperature on the mechanical behavior of commercial purity aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions -A* 37A, 2983–2994.
  - Van Swygenhoven, H. and A. Caro (1997). Plastic behavior of nanophase ni: A molecular dynamics computer simulation. *Applied Physics Letters* 71(12), 1652–1654.
  - Van Swygenhoven, H. and P. Derlet (2001). Grain boundary sliding in nanocrystalline fcc metals. *Physical Review-B* 64(224105), 1–9.
  - Wei, Q., D. Jia, K. Ramesh, and E. Ma (2002). Evolution and microstructure of shear bands in nanostructured fe. *Applied Physics Letters* 81(7), 1240–1242.
  - Yamakov, V., D. Wolf, S. R. Phillpot, A. K. Mukherjee, and H. Gleiter (2002). Dislocation processes in the deformation of nanocrystalline aluminium by molecular-dynamics simulation. *Nature Materials* 1(1), 45–48.
  - Yang, S. and B. Bacroix (1996). Shear banding in strain hardening polycrystals during rolling. *International Journal of Plasticity* 12(10), 1257–1285.
  - Yu, M. F., B. S. Files, S. Arepalli, and R. S. Ruoff (2000a). Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties. *Physical Review Letters* 84(24), 5552–5555.
  - Yu, M. F., O. Lourie, M. J. Dyer, K. Moloni, T. F. Kelly, and R. S. Ruoff (2000b). Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science* 287(5453), 637–640.
  - Zhang, H., B. E. Schuster, Q. Wei, and K. T. Ramesh (2006). The design of accurate microcompression experiments. *Scripta Materialia* 54(2), 181–186.
  - Zhu, X. H., J. E. Carsley, W. W. Milligan, and E. C. Aifantis (1997). On the failure of pressure-sensitive plastic materials .1. models of yield & shear band behavior. *Scripta Materialia* 36(6), 721–726.

## Κεφάλαιο 7

- Schulenburg, ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ, Νανοτεχνολογία *Καινοτομία για τον αυριανό κόσμο*, 2007.
- Zhi Ge, Applications of Nanotechnology and Nanomaterials in Construction, 2008.
- SAINSCCE, Strategic Applications Integrating Nano Science,
- Καρακασίδης Θεόδωρος και Βαβουγιός Διονύσιος, Η ενσωμάτωση νέων γνώσεων από την έρευνα της Φυσικής των υλικών στο αναλυτικό πρόγραμμα : Η περίπτωση της нанοτεχνολογίας, 11<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο της Ένωσης, Ελλήνων Φυσικών, Λάρισα, 30 Μαρτίου-2 Απριλίου, 2006.
- <http://www.sainsce.com/construction.aspx>



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104812

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	
ΤΙΤΛΟΣ	
ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
2.5.11	
19/07/11	

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
Τηλ.: 24210 06300-1