

# ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

ΠΟΛΥΜΕΡΗ | ΚΕΡΑΜΙΚΑ | ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ | ΞΥΛΟ

Δομή | Ιδιότητες | Τεχνολογία | Εφαρμογές

2η Αναθεωρημένη Έκδοση

**ΔΗΜΗΤΡΗΣ Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.



ΑΘΗΝΑ 2008

Copyright © 2008 για την πρωτότυπη ελληνική έκδοση:  
Δημήτρης Παντελής & Α. Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο.Ε.,

Αποκλειστικότητα για την ελληνική γλώσσα:  
Εκδόσεις Παπασωτηρίου  
Κηφισού 46β  
104 42, Αθήνα  
Τηλ.: 210.33.23.300, Fax: 210.38.48.254  
<http://www.papasotiriou.gr>  
E-mail: [oe@papasotiriou.gr](mailto:oe@papasotiriou.gr)

1η έκδοση: 1996  
2η αναθεωρημένη έκδοση: 2008

ISBN: 978-960-7182-03-6

Υπεύθυνος παραγωγής έκδοσης: Παναγιώτης Ασωνίτης  
Μακέτα εξωφύλλου: Response Advertising Ε.Π.Ε.  
Γλωσσική επιμέλεια: Σοφία Χαροκόπου

Ηλεκτρονικά Μέσα Παραγωγής  
Cosmosware, Αγ. Ιωάννου 53, Αγ. Παρασκευή, 153 42 Αθήνα  
Τηλ.: 210 60.13.922, Fax: 210 600.16.42  
E-mail: [cosmosware@ath.forthnet.gr](mailto:cosmosware@ath.forthnet.gr)

Έργο εξωφύλλου: ΤΙΤΑ ΚΡΙΕΖΗ, από τη σειρά «Κοσμογονίες», λάδι σε μουσαμά, διαστάσεις  
116 cm x 89 cm, Παρίσι 1965, Ιδιωτική συλλογή.

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή του παρόντος βιβλίου ή μέρους αυτού με οποιοδήποτε μέσο  
μηχανικό ή ηλεκτρονικό, χωρίς την έγγραφη εξουσιοδότηση του εκδότη.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ Α΄ ΕΚΔΟΣΗΣ

Το βιβλίο αυτό αναφέρεται στις προηγμένες τεχνολογίες και εφαρμογές μη μεταλλικών τεχνικών υλικών (πολυμερών, κεραμικών και συνθέτων υλικών) και έρχεται να καλύψει το κενό που υπάρχει στη σχετική ελληνική βιβλιογραφία.

Απευθύνεται κατά κύριο λόγο στους φοιτητές μηχανολογικών τμημάτων, αλλά και σε διδάσκοντες, ερευνητές, μηχανικούς βιομηχανιών και σε φοιτητές άλλων τμημάτων, οι οποίοι ασχολούνται με τη μελέτη της τεχνολογίας και των βιομηχανικών εφαρμογών των υλικών αυτών και οι οποίοι θα ήθελαν να εμπλουτίσουν τις γνώσεις τους πάνω σε αυτούς τους τομείς.

Το βιβλίο αυτό είναι αποτέλεσμα πολλαπλών προσπαθειών συγγραφής κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, που διδάσκω το αντίστοιχο μάθημα στους φοιτητές του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Μεγάλος αριθμός φοιτητών, τόσο προπτυχιακών όσο και μεταπτυχιακών, συνέβαλε στη συνεχή βελτίωση των αρχικών κειμένων, μέσω των ερωτήσεων, σχολίων και υποδείξεών τους και γι' αυτό τους ευχαριστώ.

Για τη μετατροπή των σημειώσεων των ακαδημαϊκών παραδόσεων σε σύγγραμμα, απαιτήθηκαν διαδοχικές διορθώσεις μέχρι την οριστικοποίηση της τελικής μορφής του κειμένου. Ευχαριστώ την κ. Π. Π. Ψυλλάκη, διπλ. μηχανικό Ε.Μ.Π., που ανταποκρίθηκε πλήρως στις απαιτήσεις αυτού του βιβλίου και με συνέπεια και επίπονη προσπάθεια για την επιμέλεια του κειμένου και των σχεδίων, συνέβαλε στην απόδοση του τελικού κειμένου που σήμερα έχετε στα χέρια σας.

Ευχαριστίες, επίσης, απευθύνω στο προσωπικό του εκδοτικού οίκου Α.ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ & ΣΙΑ Ο.Ε. και ιδιαίτερα της COSMOSWARE για την άψογη συνεργασία μας, την τεχνική βοήθεια και επιμέλεια του συνολικού κειμένου.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου, για την ηθική συμπαράσταση και βοήθειά της.

*Δημήτρης Ι. Παντελής*

*Αθήνα*

*Μάρτιος 1996*



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ Β΄ ΕΚΔΟΣΗΣ

Η παρούσα δεύτερη έκδοση του βιβλίου «Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά» έρχεται να συνεχίσει την προσπάθεια που ξεκίνησε το Μάρτιο του 1996, όταν κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το βιβλίο αυτό το οποίο αναφερόταν στις προηγμένες τεχνολογίες και εφαρμογές των μη μεταλλικών τεχνικών υλικών (πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα υλικά).

Κατά τη διάρκεια της κυκλοφορίας του, εκτός από τη διάθεσή του στο ελεύθερο εμπόριο έχει επιλεγεί και διανέμεται δωρεάν ως βασικό σύγγραμμα για την υποστήριξη της διδασκαλίας αντίστοιχων μαθημάτων σε τμήματα διαφόρων ΑΕΙ, ΤΕΙ και Στρατιωτικών Σχολών της χώρας.

Σημαντικοί λόγοι που οδήγησαν στην επανέκδοση αυτού του βιβλίου ήταν η ανάγκη συμπλήρωσής του με την προσθήκη ενός νέου κεφαλαίου που μελετά το Ξύλο και εισαγωγής ενός αριθμού διορθώσεων στο κείμενο.

Επίσης, η παρούσα έκδοση εμπλουτίστηκε σε ορισμένα σημεία, με γνώμονα κυρίως τις επισημάνσεις των διδασκομένων φοιτητών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ενώ, τέλος, έλαβε υπόψη τις τελευταίες εξελίξεις σε ό,τι αφορά τα μη μεταλλικά τεχνικά υλικά.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην υλοποίηση της παρούσας έκδοσης αυτού του βιβλίου. Πιο συγκεκριμένα, τους συνεργάτες μου, το διδάκτορα φυσικό κ. Δημήτρη Χριστούλη, τη διδάκτορα χημικό μηχανικό κυρία Ιωάννα Κυριοπούλου και τη μηχανολόγο μηχανικό Ε.Μ.Π. κυρία Χαρά Σαράφογλου.

Ευχαριστίες, επίσης, απευθύνω στο προσωπικό του εκδοτικού οίκου Α.ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ και ιδιαίτερα της COSMOSWARE για την άψογη συνεργασία μας επί σειρά ετών.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τη σύζυγό μου Σταυρούλα και το γιο μου Ιωάννη, για την ηθική συμπαράσταση και βοήθειά τους.

Ελπίζω ότι, με αυτήν την εμπλουτισμένη του μορφή, το παρόν βιβλίο θα χρησιμεύσει στους αναγνώστες του και θα τους δώσει την ενημέρωση για μια επιστημονική περιοχή, της οποίας η πρόοδος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη βιομηχανική ανάπτυξη ποικίλων τομέων.

*Δημήτρης Ι. Παντελής  
Αθήνα  
Μάρτης 2008*





# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ Α΄ ΕΚΔΟΣΗΣ</b> .....	<b>7</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ Β΄ ΕΚΔΟΣΗΣ</b> .....	<b>9</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>11</b>
<b>ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>17</b>
<b>I. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ</b> .....	<b>21</b>
I.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	23
I.2. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΜΑΚΡΟΜΟΡΙΟΥ .....	26
I.2.1. ΜΑΚΡΟΜΟΡΙΟ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ .....	26
I.2.2. ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ .....	28
I.3. ΔΟΜΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	32
I.3.1. ΑΤΟΜΙΚΗ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ .....	32
I.3.1.1. Ατομικοί δεσμοί .....	32
I.3.1.2. Σχηματισμός αλυσίδας πολυμερούς .....	34
I.3.2. ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	36
I.3.2.1. Άμορφα πολυμερή .....	36
I.3.2.2. Κρυσταλλικά πολυμερή .....	37
I.3.2.3. Παράγοντες που επιδρούν στην κρυσταλλικότητα των πολυμερών .....	38
I.4. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	41
I.5. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	49
I.5.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	49
I.5.1.1. Πυκνότητα .....	49
I.5.1.2. Θερμικές ιδιότητες .....	50
I.5.1.3. Ηλεκτρικές ιδιότητες .....	50

## 12 ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

1.5.1.4. Οπτικές ιδιότητες .....	51
1.5.2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	52
1.5.2.1. Ελαστική συμπεριφορά .....	53
1.5.2.2. Αντοχή σε θραύση πολυμερών .....	57
1.5.2.3. Ξωδοελαστικότητα θερμοπλαστικών .....	60
1.5.2.4. Ερπυσμός και αντοχή σε κρούση πολυμερών .....	62
1.5.2.5. Τριβή – Φθορά .....	63
1.5.2.6. Χαλάρωση τάσεων .....	63
1.5.2.7. Μηχανική συμπεριφορά αφρωδών πολυμερών υλικών .....	64
1.5.3. ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ .....	65
1.6. ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ή ΓΗΡΑΝΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	67
1.6.1. ΦΥΣΙΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ .....	67
1.6.2. ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ .....	68
1.6.3. ΘΕΡΜΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ .....	69
1.6.4. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ .....	70
1.6.5. ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ ή ΒΙΟΧΗΜΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ .....	70
1.7. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	72
1.7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	72
1.7.2. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	73
1.7.3. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΩΝ .....	83
1.7.4. ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΗΓΜΑΤΟΣ .....	85
1.7.5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΦΡΩΔΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	86
1.8. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	89
<b>II. ΚΕΡΑΜΙΚΑ &amp; ΓΥΑΛΙΑ .....</b>	<b>91</b>
II.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	93
II.2. ΔΟΜΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ .....	96
II.2.1. ΑΤΟΜΙΚΗ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗ ΣΤΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ .....	96
II.2.2. ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ .....	98
II.3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	102
II.3.1. ΓΕΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ .....	102
II.3.2. ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ .....	103
II.3.3. ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ .....	106
II.3.3.1. Γενικά .....	106
II.3.3.2. Χημική σύσταση και γενικές ιδιότητες .....	107
II.3.3.3. Χαρακτηριστικά προηγμένα κεραμικά και εφαρμογές .....	108
II.3.4. ΓΥΑΛΙΑ .....	114
II.3.4.1. Κοινά γυαλιά .....	114
II.3.4.2. Κεραμικά γυαλιά .....	115
II.4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ .....	117
II.4.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	117



II.4.1.1. Ηλεκτρικές ιδιότητες .....	117
II.4.1.2. Θερμικές ιδιότητες .....	117
II.4.1.3. Οπτικές ιδιότητες .....	120
II.4.2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	120
II.4.2.1. Σκληρότητα .....	120
II.4.2.2. Στιβαρότητα και αντοχή των κεραμικών .....	122
II.4.2.3. Αντοχή σε θραύση .....	126
II.4.2.4. Αντοχή σε θερμικούς αιφνιδιασμούς .....	129
II.4.2.5. Ερπυσμός κεραμικών .....	131
II.4.2.6. Κόπωση των κεραμικών .....	132
II.4.2.7. Φθορά – Εκτριβή των κεραμικών .....	132
II.4.3. ΑΛΛΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	133
II.4.3.1. Αντοχή σε διάβρωση .....	133
II.4.3.2. Προσρόφηση – Κατάλυση .....	133
II.4.3.3. Βιοσυμβατότητα .....	134
II.4.4. ΠΙΝΑΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ .....	135
II.5. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ .....	137
II.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	137
II.5.2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗ ΑΜΟΡΦΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ...	138
II.5.2.1. Προετοιμασία πρώτων υλών για μορφοποίηση .....	138
II.5.2.2. Τεχνικές μορφοποίησης μη άμορφων κεραμικών .....	141
II.5.2.3. Ξήρανση μορφοποιημένου κεραμικού .....	148
II.5.2.4. Έψηση μορφοποιημένου κεραμικού .....	148
II.5.2.5. Μορφοποίηση παραδοσιακών κεραμικών .....	153
II.5.2.6. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μορφοποίησης προηγμένων κεραμικών .....	154
II.5.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΓΥΑΛΙΩΝ .....	156
II.5.4. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΗ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ .....	159
II.5.5. ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ .....	160
II.6. ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ .....	162
II.6.1. ΠΥΡΙΜΑΧΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ .....	162
II.6.2. ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ .....	164
II.6.3. ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ .....	173
II.6.3.1. Εισαγωγή .....	173
II.6.3.2. Δομή και ταξινόμηση υπεραγωγίμων κεραμικών .....	175
II.6.3.3. Χαρακτηριστικά φαινόμενα υπεραγωγίμων υλικών .....	177
II.6.3.4. Σύνθεση και μορφοποίηση υπεραγωγίμων υλικών .....	181
II.6.3.5. Εφαρμογές υπεραγωγίμων υλικών .....	187
<b>III. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ .....</b>	<b>189</b>
III.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	191
III.2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ .....	193
III.2.1. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ .....	193
III.2.2. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ ....	194

III.2.2.1. Ενισχυτικές ίνες .....	194
III.2.2.2. Μήτρες .....	202
III.2.2.3. Επιλογή ενισχυτικών ιών και μήτρας .....	205
III.2.3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	
ME ENISXYΣH INΩN .....	214
III.2.3.1. Συμπεριφορά σε εφελκυσμό .....	214
III.2.3.2. Συμπεριφορά σε θλίψη .....	222
III.2.3.3. Δυσθραυστότητα σύνθετων υλικών με ενίσχυση ιών .....	222
III.2.3.4. Αντοχή των σύνθετων υλικών σε κόπωση .....	225
III.2.3.5. Συμπεριφορά σύνθετων υλικών σε τριβή .....	226
III.2.4. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ME ENISXYΣH INΩN .....	226
III.2.4.1. Μορφοποίηση σύνθετου οργανικής μήτρας .....	227
III.2.4.2. Μορφοποίηση σύνθετου μεταλλικής μήτρας .....	230
III.2.4.3. Μορφοποίηση σύνθετου κεραμικής μήτρας .....	232
III.3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ME ENISXYΣH ΣΩΜΑΤΙΔΙΩN .....	233
III.3.1. ΓΕΝΙΚΑ .....	233
III.3.2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	234
III.3.3. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ME ENISXYΣH ΣΩΜΑΤΙΔΙΩN .....	235
III.4. ΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ .....	237
III.4.1. ΓΕΝΙΚΑ .....	237
III.4.2. ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ .....	237
III.4.3. ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ .....	239
III.4.4. ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ & SANDWICH ΥΛΙΚΑ .....	241
III.5. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ .....	243
III.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	243
III.5.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ .....	244
III.5.3. ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ .....	246
III.5.4. ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ .....	249
III.5.5. ΔΟΜΙΚΗ ΣΥΛΛΗΨΗ - ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ .....	254
III.5.6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ .....	258
III.5.7. ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ..	264
<b>IV. ΞΥΛΟ .....</b>	<b>265</b>
IV.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	267
IV.2. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ .....	270
IV.2.1. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ .....	271
IV.2.2. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ .....	273
IV.2.3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΟΡΙΑΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ .....	275
IV.2.4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ .....	279
IV.3. ΕΙΔΗ ΞΥΛΩΝ .....	280

IV.4. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	283
IV.4.1. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ.....	283
IV.4.2. ΥΓΡΟΣΚΟΠΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ .....	283
IV.4.3. ΑΛΛΕΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	287
IV.5. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ .....	289
IV.5.1. ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	291
IV.5.2. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗ.....	292
IV.5.3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ – ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ.....	294
IV.6. ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ .....	295
IV.6.1. ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΜΟΡΦΗΣ .....	295
IV.6.2. ΑΝΑΤΟΜΙΚΑ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ.....	295
IV.6.3. ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ .....	295
IV.7. ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ.....	296
IV.7.1. ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ .....	296
IV.7.2. ΔΟΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ.....	297
IV.7.3. ΧΗΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ.....	297
IV.7.4. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΞΥΛΟΥ ΜΕ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	298
IV.8. ΕΙΔΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΞΥΛΕΙΑΣ .....	299
IV.9. ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΞΥΛΕΙΑΣ .....	299
IV.9.1. ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΑ ΥΛΙΚΑ ΞΥΛΕΙΑΣ .....	302
IV.9.2. ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΞΥΛΕΙΑΣ .....	303
IV.9.3. ΞΥΛΕΙΑ ΑΠΟ ΤΕΜΑΧΙΔΙΑ ΞΥΛΟΥ.....	304
IV.9.4. ΜΟΡΙΟΠΛΑΚΕΣ (PARTICLEBOARD) .....	306
IV.9.5. ΙΝΟΠΛΑΚΕΣ (FIBERBOARD).....	307
IV.10. ΤΟ ΞΥΛΟ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ .....	309
IV.10.1 Η ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΤΕΧΝΗ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΩΝ .....	310
IV.10.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΝΑΥΠΗΓΗΣΗΣ ΞΥΛΙΝΩΝ ΣΚΑΦΩΝ.....	312
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>317</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΙ ΑΓΓΛΙΚΟΙ ΟΡΟΙ .....</b>	<b>323</b>

## ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ

### I.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά το γεγονός ότι τα πολυμερή έλκουν την ιστορία τους από τα πρώτα χρόνια της ανθρωπότητας (φυσικά ελαστικά, βαμβάκι, μαλλί, κ.λπ.), τόσο η θεωρητική προσέγγιση των πολυμερικών δομών, όσο και η συνθετική παραγωγή πολυμερών, είναι προϊόντα του αιώνα μας.

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η επιστήμη των πολυμερών "γεννήθηκε", πραγματικά, τη δεκαετία του '20, όταν ο Γερμανός χημικός Hermann Staudinger εισήγαγε για πρώτη φορά την έννοια του μακρομορίου. Μια θεωρία που ερχόταν σε αντίθεση με την προγενέστερη εκδοχή του Naegeli περί "μεγαλομορίου" διαστάσεων κολλοειδούς, το οποίο αποτελούσε άθροισμα μικρότερων μορίων συνδεδεμένων με ασθενείς δεσμούς ακαθόριστης φύσεως. Η θεωρία του Staudinger άρχισε να αποκτά υποστηρικτές στη δεκαετία του '30 και ο ίδιος βραβεύτηκε με το βραβείο Nobel το 1953.

Ωστόσο, δε θα πρέπει να υποτιμηθεί η συμβολή κι άλλων μελετητών, οι οποίοι από τα μέσα του 19ου αιώνα εργάστηκαν στο ίδιο ερευνητικό πεδίο:

- Το 1838, ο Γάλλος χημικός Henri Victor Regnault παρατήρησε το σχηματισμό στερεής ουσίας από βινυλοχλωρίδιο, μετά από έκθεσή του στο φως. Η έρευνα αυτή δεν είχε συνέχεια.
- Η μετατροπή του καουτσούκ, με την προσθήκη θείου, σε ελαστικό καλύτερων ιδιοτήτων παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Αμερικανό Charles Goodyear (1839). Το 1844, για τη διαδικασία αυτή, καθιερώθηκε ο όρος βουλκανισμός, μετά από εισήγηση του Άγγλου ερευνητή Thomas Hancock.

- Πρώτος ο Γάλλος Henri Braconnot, το 1832, παρασκεύασε νιτρική κυτταρίνη, η βιομηχανική παραγωγή της οποίας άρχισε το 1846, μετά από βελτιώσεις του Christian Freidrich Schonbein.
- Το 1870, με τη συνδυασμένη έρευνα των John Wesley και Isaiah S.Hyatt, παρασκευάστηκε το πρώτο πλαστικό: η συνθετική κυτταρίνη (celluloid). Η σύνθεσή της στηρίχθηκε στην πλαστικοποίηση της νιτρικής κυτταρίνης με καμφορά.
- Η αναζήτηση υποκατάστατων της εύφλεκτης νιτρικής κυτταρίνης από σταθερότερα υλικά, οδήγησε στη σύνθεση της ακετοσελουλόζης (καζεΐνης). Το 1910, ο Leo Hendrik Baekeland συνέθεσε την πρώτη θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη: το βακελίτη.
- Στην περίοδο του μεσοπολέμου, ανακαλύφθηκαν και αναπτύχθηκαν τα θερμοπλαστικά πολυμερή, όπως: πολυστυρένιο (PS), πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP), χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC).
- Στις μέρες μας, η παγκόσμια ετήσια παραγωγή πολυμερών αγγίζει τα 70 εκατομμύρια και συναγωνίζεται εκείνη του χάλυβα.

Η λέξη πολυμερές είναι σύνθετη: πολύς + μέρος. Και πραγματικά, μπορούμε να ορίσουμε τα **πολυμερή** (polymers) ως φυσικές ή τεχνητά παρασκευασμένες ύλες, αποτελούμενες από μόρια μεγάλων διαστάσεων (μεγάλου μοριακού βάρους), τα μακρομόρια. Δομικοί λίθοι των μακρομορίων είναι χημικές ενώσεις-μονάδες, μικρού μοριακού βάρους, που καλούνται μονομερή και ο αριθμός τους ποικίλει από 100 έως 100.000 ανά αλυσίδα.

Ο ανταγωνισμός των πολυμερών με τα μεταλλικά, κυρίως, υλικά είναι σκληρός. Τα πολυμερή μορφοποιούνται εύκολα και παρασκευάζονται "στα μέτρα μας", έτσι ώστε να συνδυάζουν ταυτόχρονα πολλά πλεονεκτήματα, όπως: τη δυνατότητα δημιουργίας προϊόντων πολύπλοκης γεωμετρίας, τη διαφάνεια –μπορούν, έτσι, να αντικαταστήσουν το γυαλί– χαμηλή πυκνότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες και, αρκετά συχνά, χαμηλό κόστος.

Τα πολυμερή σε σχέση με τα μεταλλικά υλικά παρουσιάζουν όμως και μειονεκτήματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες και δεν είναι δυνατή η χρήση τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, η χρήση τους επιφυλάσσει μεγάλους κινδύνους ρύπανσης του περιβάλλοντος (πρόβλημα ανακύκλωσης).

Τέλος, ένας μεγάλος αριθμός πολυμερών προϊόντων, που παράγονται με πρώτη ύλη το πετρέλαιο, βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση από την τιμή και την πολιτική του πετρελαίου στις διάφορες χώρες (OPEC), χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν ισχύει το ίδιο με την παραγωγή άλλων υλικών (π.χ. Al).

Οι εφαρμογές των πολυμερών εκτείνονται από τις απλές καθημερινές χρήσεις, όπως π.χ. οικιακά σκεύη, διακοσμητικά είδη, είδη συσκευασίας, αυτοκόλλητες ταινίες, είδη σπόρ, μουσικής, ταξιδιού κ.λπ., μέχρι τις πιο

προηγμένες, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία (δομικά στοιχεία, καθίσματα, τζαμαρία, ντεπόζιτο βενζίνης, ζάντες), στη μικροηλεκτρονική (μικροεξαρτήματα, τυπωμένα κυκλώματα) και αλλού.

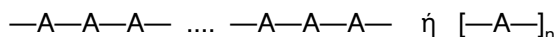
## I.2. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΜΑΚΡΟΜΟΡΙΟΥ

### I.2.1. ΜΑΚΡΟΜΟΡΙΟ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

Τα μεγάλα μόρια των πολυμερών δημιουργούνται από απλά μόρια, τα μονομερή (monomers), τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς, στην πλειοψηφία τους, δεσμούς και σχηματίζουν τις χαρακτηριστικές μακρές αλυσίδες του πολυμερούς.

Το μονομερές που επαναλαμβάνεται σε όλη τη δομή του πολυμερούς ονομάζεται **επαναλαμβανόμενη μονάδα** (repeating unit) ή **δομική μονάδα** (structural unit).

Αν —A— είναι η δομική μονάδα και  $n$  ο αριθμός επανάληψής της στο μόριο του πολυμερούς, αυτό παίρνει τη μορφή:



Ο αριθμός επανάληψης του μονομερούς στην αλυσίδα του πολυμερούς ονομάζεται **βαθμός πολυμερισμού DP** (degree of polymerization) και σχετίζεται με το μήκος της μοριακής αλυσίδας και το μοριακό βάρος του πολυμερούς.

Επειδή, στην πράξη, η μάζα του πολυμερούς αποτελείται από αλυσίδες ποικίλων μηκών, χρησιμοποιείται ο ορθότερος όρος **μέσος βαθμός πολυμερισμού  $\overline{DP}$**  (average degree of polymerization).

Εξαιτίας της ανομοιογένειας του μεγέθους των διαφόρων μακρομορίων, καθώς επίσης και της συμμετοχής διαφόρων τύπων μονομερών στη μοριακή αλυσίδα του πολυμερούς, το μοριακό βάρος ( $M$ ) των πολυμερών έχει στατιστική έννοια.

Ο υπολογισμός του μοριακού βάρους γίνεται αφού διαιρέσουμε τη μοριακή αλυσίδα του πολυμερούς σε υποαλυσίδες και τις ταξινομήσουμε σε κλάσεις μοριακών βαρών ( $M_i$ ). Για κάθε κλάση μπορούμε να υπολογίζουμε το κατά βάρος ποσοστό ( $f_i$ ), με το οποίο κάθε κλάση μετέχει στο μοριακό βάρος του πολυμερούς, καθώς επίσης και τον αριθμό υποαλυσίδων ( $n_i$ ) με το ίδιο μοριακό βάρος ( $M_i$ ). Με βάση αυτή τη θεώρηση, μπορούμε να ορίσουμε το μοριακό βάρος των πολυμερών ως εξής:

$$\overline{M} = \frac{\sum f_i \cdot M_i^\beta}{\sum f_i \cdot M_i^{\beta-1}} \quad (1.1)$$

Ισχύει επίσης:

$$f_i = n_i \cdot M_i \quad (1.2)$$

(α) Εάν στην εξίσωση (1.1) τεθεί  $\beta = 0$ , τότε προκύπτει το μέσου αριθμού μοριακό βάρος ( $\overline{M}_n$ ):

$$\bar{M}_n = \frac{f_1 + f_2 + \dots}{\frac{f_1}{M_1} + \frac{f_2}{M_2} + \dots} = \frac{\sum f_i}{\sum \frac{f_i}{M_i}} = \frac{\sum (n_i \cdot M_i)}{\sum \frac{(n_i \cdot M_i)}{M_i}} = \frac{\sum n_i \cdot M_i}{\sum n_i} \quad (1.3)$$

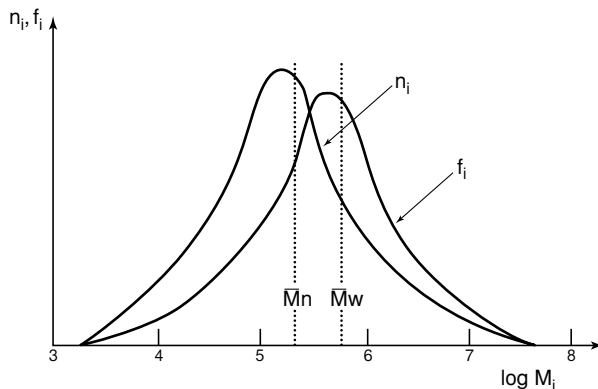
(β) Εάν στην εξίσωση (1.1) τεθεί  $\beta = 1$ , τότε προκύπτει το μέσου βάρους μοριακό βάρος ( $\bar{M}_w$ ):

$$\bar{M}_w = \frac{f_1 \cdot M_1 + f_2 \cdot M_2 + \dots}{f_1 + f_2 + \dots} = \frac{\sum f_i \cdot M_i}{\sum f_i} = \frac{\sum (n_i \cdot M_i) \cdot M_i}{\sum (n_i \cdot M_i)} = \frac{\sum n_i \cdot M_i^2}{\sum n_i \cdot M_i} \quad (1.4)$$

Συνήθως, το μέσου αριθμού μοριακό βάρος είναι μικρότερο από το μέσου βάρους μοριακό βάρος.

Με τη βοήθεια των μεγεθών αυτών είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η ομοιογένεια –ή η ανομοιογένεια– ενός πολυμερούς. Συνήθως, η κατανομή αυτή δίνεται υπό μορφή καμπύλης (σχήμα 1.1α). Ο λόγος  $P = \bar{M}_w / \bar{M}_n$ , ο οποίος πολλές φορές αναφέρεται και ως δείκτης διασποράς, αποτελεί μέτρο του εύρους της καμπύλης κατανομής μοριακών βαρών.

Όταν ένα πολυμερές είναι ομοιογενές, τότε  $P = 1$ . Αυτό συμβαίνει συχνά στα βιολογικά πολυμερή, αλλά είναι πολύ σπάνιο στην περίπτωση των βιομηχανικών πολυμερών. Ανάλογα με τις συνθήκες σύνθεσης του πολυμερούς, ο λόγος  $P$  κυμαίνεται σε ένα ευρύ φάσμα τιμών. Συνήθως, ο  $P$  παίρνει τιμές μεταξύ 1,5 και 3.



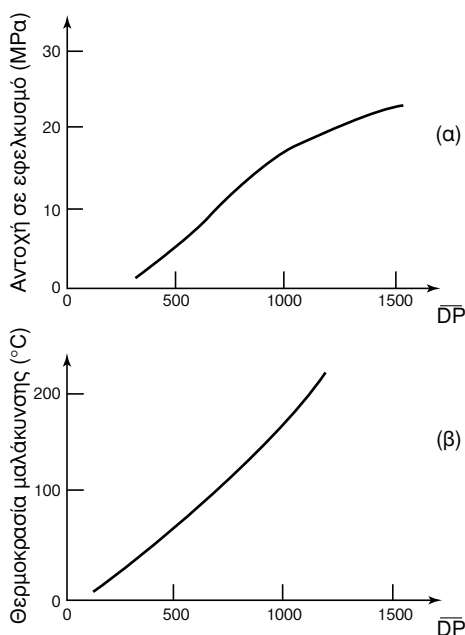
**ΣΧΗΜΑ 1.1α.** Κατανομή μοριακών βαρών σε πολυμερές.

Αν τα μονομερή που συνθέτουν την πολυμερική αλυσίδα είναι ενός μόνο τύπου, το μακρομόριο ονομάζεται **ομοπολυμερές** (homopolymer). Πολλές φορές, όμως, στην αλυσίδα του μακρομορίου μετέχουν περισσότεροι τύποι μονομερών. Ένα τέτοιο πολυμερές χαρακτηρίζεται ως **συμπολυμερές** (copolymer).



Συνήθως, το μοριακό βάρος των πολυμερών είναι υψηλότερο των 5000 g. Όταν το μοριακό βάρος της ένωσης παίρνει τιμές από 1000 έως 5000 g, χρησιμοποιείται ο όρος **ολιγομερές** (oligomer). Τα ολιγομερή έχουν βαθμό πολυμερισμού μικρότερο του 200.

Ο βαθμός πολυμερισμού επιδρά τόσο στις φυσικές, όσο και στις μηχανικές ιδιότητες του πολυμερούς. Στο σχήμα I.1β, φαίνεται η μεταβολή της αντοχής σε εφελκυσμό και της θερμοκρασίας μαλάκυνσης του πολυαιθυλενίου, συναρτήσει του μέσου βαθμού πολυμερισμού.



**ΣΧΗΜΑ I. 16.** Μεταβολή της μηχανικής αντοχής (α) και της θερμοκρασίας μαλάκυνσης (β) του πολυαιθυλενίου συναρτήσει του μέσου βαθμού πολυμερισμού.

### 1.2.2. ΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ (polymerization)

Τα πολυμερή λαμβάνονται μέσω χημικών διαμοριακών αντιδράσεων μεταξύ των μορίων των μονομερών. Ανάλογα με το είδος των αντιδρώντων μονομερών, το παραγόμενο μπορεί να είναι ομοπολυμερές ή συμπολυμερές και η χημική αντίδραση καλείται πολυμερισμός ή συμπολυμερισμός, αντίστοιχα.

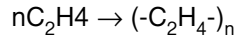
Κατά τον **πολυμερισμό** λαμβάνουν χώρα είτε αντιδράσεις συμπυκνώσεως, είτε αντιδράσεις προσθήκης. Με βάση την κινητική των αντιδράσεων, ο πολυμερισμός διακρίνεται σε:

**(α) Σταδιακό**, όταν όλες οι αντιδράσεις οδεύουν κατά βαθμίδες. Πρόκει-

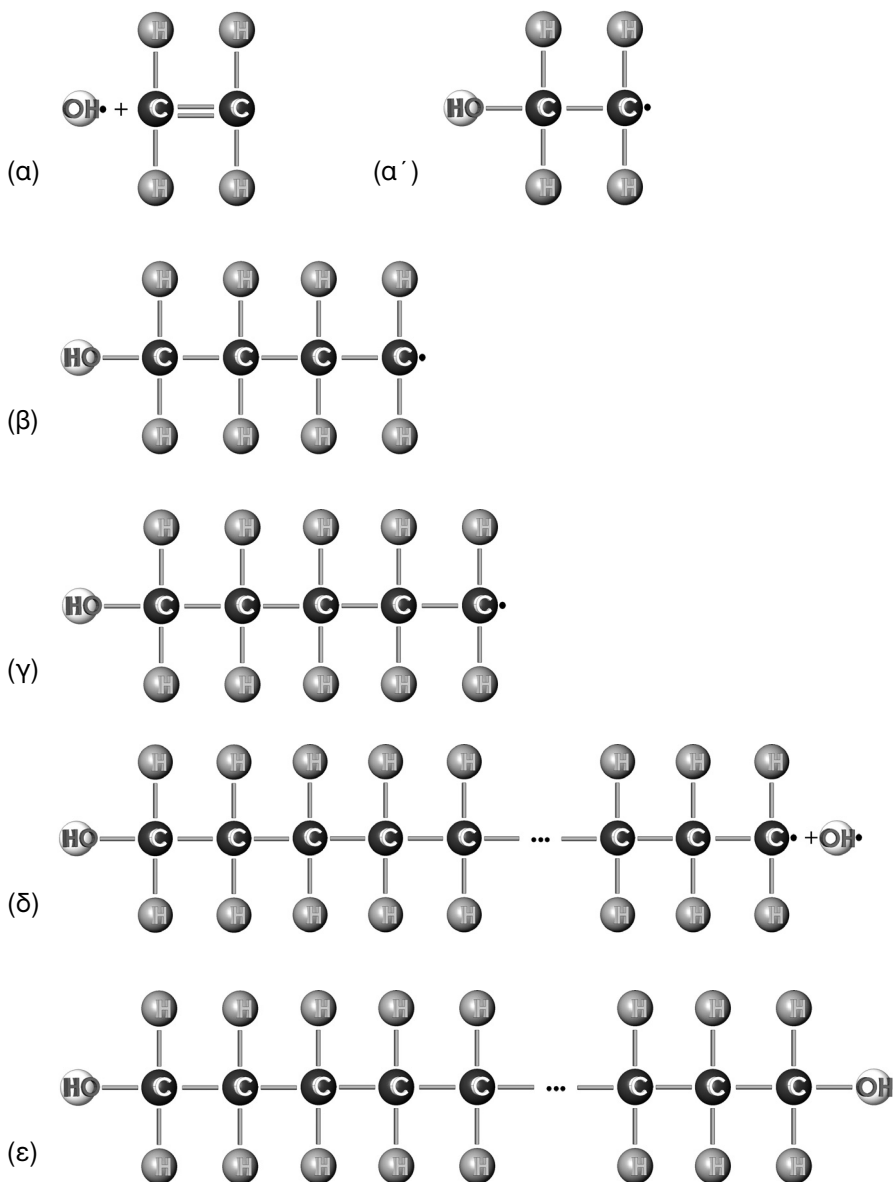
ται για ένα είδος αντιδράσεων συμπυκνώσεως.

**(β) Αλυσιδωτό**, όταν οι αντιδράσεις οδεύουν με διαδοχικές προσθήκες ενός μονομερούς κάθε φορά και πρόκειται για ταχύτατες αντιδράσεις προσθήκης.

Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζεται σχηματικά ο αλυσιδωτός πολυμερισμός για την περίπτωση του πολυαιθυλενίου. Η ολική αντίδραση μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:



Η διαδικασία πολυμερισμού ξεκινά με την προσθήκη ενός διεγέρτη (initiator), που στην προκειμένη περίπτωση είναι ελεύθερη ρίζα υδροξυλίου (βήμα α). Με τον όρο ελεύθερη ρίζα γίνεται αναφορά σε ένα άτομο (ή ομάδα ατόμων) το οποίο περιέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια (στο σχήμα, η ύπαρξη του ελεύθερου ηλεκτρονίου συμβολίζεται με  $\bullet$ ). Κατά την αντίδραση έναρξης, ο διπλός δεσμός του μονομερούς μετατρέπεται σε απλό δεσμό (βήμα α'). Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, το ελεύθερο ηλεκτρόνιο μπορεί να αντιδράσει με το πλησιέστερο μονομερές αιθυλενίου, με αποτέλεσμα να επεκτείνεται η μοριακή αλυσίδα κατά μια μονάδα (βήμα β). Η αύξηση του μεγέθους της αλυσίδας (βήματα β και γ) μπορεί να συνεχιστεί με μεγάλη ταχύτητα και μπορεί να περιοριστεί μόνο στην περίπτωση ύπαρξης μη αντιδρώντων μονομερών αιθυλενίου. Μια άλλη ρίζα υδροξυλίου (βήμα δ) μπορεί να τερματίσει την αντίδραση πολυμερισμού με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα σταθερό μακρομόριο (βήμα ε). Το ταχύ πέρασμα από το βήμα β στο βήμα δ αποτελεί την περιγραφή του *πολυμερισμού*.



**Σχήμα 1.2.** Σχηματική αναπαράσταση του αλυσιδωτού πολυμερισμού του πολυαιθυλενίου.

Κατά τον **συμπολυμερισμό** (copolymerization), δύο ή και περισσότερα μονομερή πολυμερίζονται ταυτόχρονα και σχηματίζουν συμπολυμερή, των οποίων η μοριακή αλυσίδα αποτελείται από όλα τα χρησιμοποιηθέντα είδη μονομερών. Συμπολυμερή λαμβάνονται τόσο με αντιδράσεις συμπολυμερισμού, όσο και με χημικές αντιδράσεις μεταξύ ομοπολυμερών. Οι συνηθέστερες αντιδράσεις συμπολυμερισμού είναι αλυσιδωτές.