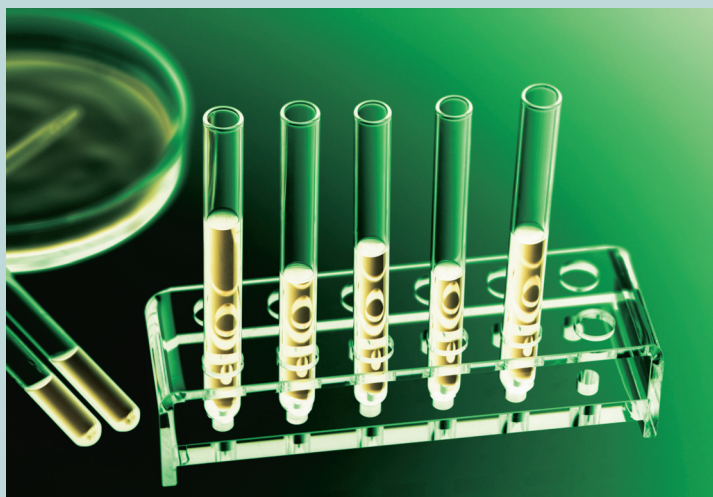




Paul T. Anastas • John C. Warner

ΠΡΑΣΙΝΗ ΧΗΜΕΙΑ

ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΠΡΑΞΗ

Μετάφραση

Κωνσταντίνος Αμπελιώτης

Μαρία Καπασσά

Παναγιώτης Α. Σίσκος

Επιστημονική επιμέλεια

Παναγιώτης Α. Σίσκος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ

Paul T. Anastas – John C. Warner

ΠΡΑΣΙΝΗ ΧΗΜΕΙΑ

ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΠΡΑΞΗ

Μετάφραση:

Κωνσταντίνος Αμπελιώτης

Μαρία Καπασσά

Παναγιώτης Α. Σίσκος

Επιστημονική επιμέλεια:

Παναγιώτης Α. Σίσκος

E-BOOK



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ

Ιδρυτική δωρεά Παγκρητικής Ενώσεως Αμερικής

Ηράκλειο 2011

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ

ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Ηράκλειο Κρήτης, Τ.Θ. 1385, 71110. Τηλ. 2810391087, Fax: 2810391085

Αθήνα: Κλεισόβης 3, 106 77. Τηλ. 2103849020-22, Fax: 2103301583

e-mail: info@cup.gr

www.cup.gr

ΣΕΙΡΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ / ΧΗΜΕΙΑ

Τίτλος πρωτοτύπου:

GREEN CHEMISTRY: THEORY AND PRACTICE, Oxford Univeristy Press, 2000

© 1998 Paul T. Anastas & John C. Warner

© 2006 για την ελληνική γλώσσα: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ

Μετάφραση:

Κωνσταντίνος Αμπελιώτης, *Επίκουρος Καθηγητής, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο*

Μαρία Δ. Καπασσά, *Χημικός, Δίπλωμα Ειδίκευσης*

Παναγιώτης Α. Σίσκος, *Καθηγητής Περιβαλλοντικής Χημείας,*

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Επιστημονική επιμέλεια: Παναγιώτης Α. Σίσκος

Επιμέλεια κειμένων: Νίκος Κουμπιάς (Π.Ε.Κ.)

Σελιδοποίηση: Παρασκευή Βλάχου (Π.Ε.Κ.)

Εκτύπωση: Γ. ΔΕΤΟΡΑΚΗΣ ΑΕΒΕ

Σχεδίαση εξωφύλλου: Βάσω Αβραμοπούλου

ISBN 978-960-524-234-6



Περιεχόμενα

<i>Πρόλογος στην ελληνική έκδοση</i>	xiii
<i>Πρόλογος στην αμερικανική έκδοση</i>	xv
1 Εισαγωγή	1
1.1 Η θέση της χημείας στον κόσμο και το περιβάλλον	1
1.2 Εξέλιξη του περιβαλλοντικού κινήματος	3
1.2.1 Ενημέρωση του κοινού	3
1.2.2 «Λύση για τη ρύπανση είναι η αραίωση»	8
1.2.3 Κατεργασία και περιορισμός των αποβλήτων μέσω μέτρων εποπτείας και ελέγχου	9
1.2.4 Πρόληψη της ρύπανσης	10
1.2.5 Πράσινη χημεία	11
1.3 Ο ρόλος των επιστημόνων της χημείας	12
2 Τι είναι η πράσινη χημεία;	15
2.1 Ορισμός	15
2.2 Γιατί προκαλεί τόσο ενδιαφέρον αυτό το νέο πεδίο της χημείας;	17
2.3 Γιατί πρέπει οι χημικοί να επιδιώκουν τους στόχους της πράσινης χημείας;	18
2.4 Οι ρίζες της καινοτομίας	22
2.5 Περιορισμοί/εμπόδια	23
3 Εργαλεία της πράσινης χημείας	29
3.1 Εναλλακτικές πρώτες ύλες	29

3.2	Εναλλακτικά αντιδραστήρια	33
3.3	Εναλλακτικοί διαλύτες	34
3.4	Εναλλακτικό προϊόν/μόριο-στόχος	35
3.5	Αναλυτική χημεία των διεργασιών	36
3.6	Εναλλακτικοί καταλύτες	37
4	Αρχές της πράσινης χημείας	39
4.1	Είναι καλύτερα να προλαμβάνεται η δημιουργία αποβλήτων παρά να επιδιώκεται η εκ των υστέρων επεξεργασία τους	39
4.2	Οι συνθετικές μέθοδοι πρέπει να σχεδιάζονται έτσι, ώστε να μεγιστοποιείται η ενσωμάτωση στο τελικό προϊόν όλων των χρησιμοποιούμενων στη διεργασία υλικών	44
4.2.1	<i>Αναδιάταξη</i>	45
4.2.2	<i>Προσθήκη</i>	45
4.2.3	<i>Υποκατάσταση</i>	46
4.2.4	<i>Απόσπαση</i>	46
4.3	Όπου είναι πρακτικά εφικτό, οι συνθετικές μεθοδολογίες πρέπει να χρησιμοποιούν ή να παράγουν χημικές ουσίες με μικρή ή μηδενική τοξικότητα για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον	46
4.4	Τα χημικά προϊόντα πρέπει να σχεδιάζονται κατά τρόπο που να διατηρεί τη λειτουργικότητα αλλά και να μειώνει την τοξικότητά τους	49
4.4.1	<i>Τι είναι ο σχεδιασμός ασφαλέστερων χημικών ουσιών;</i>	49
4.4.2	<i>Γιατί είναι τώρα εφικτό κάτι τέτοιο;</i>	50
4.5	Οι βοηθητικές χημικές ουσίες πρέπει να καθίστανται μη αναγκαίες ή αβλαβείς	51
4.5.1	<i>Γενική χρήση βοηθητικών χημικών ουσιών</i>	51
4.5.2	<i>Ζητήματα που αφορούν τους διαλύτες</i>	52
4.5.3	<i>Περιβάλλον</i>	52

4.5.4	Υπερκρίσιμα ρευστά	55
4.5.5	Συστήματα χωρίς διαλύτη	55
4.5.6	Υδατικά συστήματα	56
4.5.7	Ακινητοποιημένα συστήματα	57
4.6	Οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις των ενεργειακών αναγκών πρέπει να αναγνωρίζονται και να ελαχιστοποιούνται	57
4.6.1	Χρήση της ενέργειας από τη χημική βιομηχανία	57
4.6.2	Πώς χρησιμοποιείται η ενέργεια	58
4.6.3	Η ανάγκη επιτάχυνσης των αντιδράσεων με θέρμανση	59
4.6.4	Η ανάγκη ελέγχου της δραστικότητας μέσω ψύξης	59
4.6.5	Οι ενεργειακές απαιτήσεις των διαχωρισμών	60
4.6.6	Μικροκύματα	60
4.6.7	Υπέρηχοι	61
4.6.8	Βελτιστοποίηση της αντίδρασης σημαίνει ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων	61
4.7	Οι πρώτες ύλες πρέπει να είναι ανανεώσιμες	62
4.7.1	Τι είναι οι ανανεώσιμες πρώτες ύλες και τι οι εξαντλούμενες	62
4.7.2	Αειφορία	63
4.7.3	Άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις	63
4.7.4	Έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις	64
4.7.5	Τα περιορισμένα αποθέματα δημιουργούν οικονομικές πιέσεις	64
4.7.6	Οι πολιτικές συνέπειες του πετρελαίου	65
4.7.7	Ζητήματα σχετικά με τις βιολογικές πρώτες ύλες	65
4.8	Η άσκοπη παραγωγή σημαίνει πρέπει κατά το δυνατόν να αποφεύγεται	66
4.8.1	Η επικράτηση της πρακτικής αυτής στη χημεία	66

4.8.2	Καλυπτικές ή προστατευτικές ομάδες	67
4.8.3	Δημιουργία αλάτων κ.λπ., για τη διευκόλυνση της διεργασίας	67
4.8.4	Προσθήκη δραστηκής ομάδας με μοναδικό στόχο την αντικατάστασή της	68
4.9	Τα καταλυτικά αντιδραστήρια είναι ανώτερα από τα στοιχειομετρικά	69
4.10	Τα χημικά προϊόντα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι, ώστε στο τέλος της χρήσης τους να αποικοδομούνται προς αβλαβή προϊόντα	71
4.10.1	Η σημερινή κατάσταση	71
4.10.2	Ανθεκτικότητα στο περιβάλλον	71
4.11	Οι αναλυτικές μεθοδολογίες χρειάζονται περαιτέρω ανάπτυξη στην κατεύθυνση της παρακολούθησης μιας διεργασίας σε πραγματικό χρόνο και του έγκαιρου ελέγχου πριν από τον σχηματισμό επικίνδυνων ουσιών	73
4.12	Οι ουσίες που συμμετέχουν σε κάποια χημική διεργασία πρέπει να επιλέγονται έτσι, ώστε να ελαχιστοποιείται το ενδεχόμενο χημικών ατυχημάτων	75
5	Αξιολόγηση των επιπτώσεων της χημείας	77
5.1	Πώς αξιολογεί ο χημικός τις επιπτώσεις ενός χημικού προϊόντος ή μιας χημικής διεργασίας στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον;	77
5.1.1	Τοξικότητα για τον άνθρωπο	78
5.1.2	Τοξικότητα για την άγρια ζωή	81
5.1.3	Επιπτώσεις στο τοπικό περιβάλλον	83
5.1.4	Παγκόσμιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις	85
6	Αξιολόγηση αρχικών υλικών και πρώτων υλών	89
6.1	Προέλευση αρχικών υλικών/πρώτων υλών	90
6.2	Ανανεώσιμοι ή εξαντλούμενοι φυσικοί πόροι	90

6.3	Επικίνδυνες ή αβλαβείς πρώτες ύλες	92
6.4	Πώς επηρεάζει η επιλογή της πρώτης ύλης την πορεία της διεργασίας	92
7	Αξιολόγηση διαφόρων τύπων χημικών αντιδράσεων	95
7.1	Οι διάφοροι γενικοί τύποι χημικών μετασχηματισμών	96
7.1.1	<i>Αντιδράσεις αναδιάταξης</i>	97
7.1.2	<i>Αντιδράσεις προσθήκης</i>	98
7.1.3	<i>Αντιδράσεις υποκατάστασης</i>	100
7.1.4	<i>Αντιδράσεις απόσπασης</i>	104
7.1.5	<i>Περικυκλικές αντιδράσεις</i>	105
7.1.6	<i>Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις</i>	107
7.2	Η εγγενής φύση των διαφόρων τύπων χημικών αντιδράσεων	109
7.2.1	<i>Χρειάζονται πράγματι οι αντιδράσεις πρόσθετες χημικές ουσίες;</i>	109
7.2.2	<i>Παράγουν πάντοτε απόβλητα οι αντιδράσεις;</i>	110
8	Αξιολόγηση μεθόδων σχεδιασμού ασφαλέστερων χημικών ουσιών	113
8.1	Ανάλυση του μηχανισμού δράσης	115
8.2	Σχέσεις δομής-ενεργότητας	117
8.3	Αποφυγή τοξικών λειτουργικών ομάδων	118
8.4	Ελαχιστοποίηση της βιοδιαθεσιμότητας	119
8.5	Ελαχιστοποίηση της χρήσης βοηθητικών ουσιών	121
9	Παραδείγματα εφαρμογής της πράσινης χημείας	123
9.1	Παραδείγματα πράσινων πρώτων υλών	123
9.1.1	<i>Πολυμερή από πολυσακχαρίτες</i>	123
9.1.2	<i>Χημικά ευρείας χρήσης παραγόμενα από γλυκόζη</i>	124
9.1.3	<i>Μετατροπή βιομάζας σε χημικά προϊόντα</i>	126
9.2	Παραδείγματα πράσινων αντιδράσεων	128
9.2.1	<i>Οικονομία ατόμου και ομογενής κατάλυση</i>	128

9.2.2	<i>Σύνθεση αρωματικών αμινών χωρίς τη χρήση αλογονιδίων</i>	129
9.2.3	<i>Μια πράσινη εναλλακτική πρόταση για τη σύνθεση Strecker</i>	131
9.3	<i>Παραδείγματα πράσινων αντιδραστηρίων</i>	133
9.3.1	<i>Σύνθεση ισοκυανικών ενώσεων χωρίς τη χρήση φωσγενίου</i>	133
9.3.2	<i>Εκλεκτικές μεθυλιώσεις με τη χρήση ανθρακικού διμεθυλεστέρα</i>	133
9.3.3	<i>Πολυμερισμός στερεάς φάσης άμορφων πολυμερών με τη χρήση διφαινυλο-ανθρακικών εστέρων</i>	134
9.3.4	<i>Πράσινη οξειδωτική μετατροπή μεταλλικών συμπλόκων</i>	135
9.3.5	<i>Αντιδραστήρας υγρής οξείδωσης</i>	136
9.4	<i>Παραδείγματα πράσινων διαλυτών και συνθηκών αντίδρασης</i>	137
9.4.1	<i>Υπερκρίσιμα ρευστά</i>	137
9.4.2	<i>Αντιδράσεις σε υδατικές συνθήκες</i>	141
9.4.3	<i>Ακίνητοποιημένοι διαλύτες</i>	143
9.4.4	<i>Αντιδράσεις με τη χρήση ακτινοβολίας</i>	144
9.5	<i>Παραδείγματα πράσινων χημικών προϊόντων</i>	145
9.5.1	<i>Σχεδιασμός εναλλακτικών νιτριλίων</i>	146
9.5.2	<i>Το προϊόν Sea-Nine™ της εταιρείας Rohm and Haas</i>	147
9.5.3	<i>Το εντομοκτόνο CONFIRM™ της εταιρείας Rohm and Haas</i>	148
9.5.4	<i>Πολυασπαρτικά οξέα του Donlar</i>	149
9.5.5	<i>Εμφανιστικά διαλύματα φωτογραφιών με σύμπλοκες ενώσεις της εταιρείας Polaroid</i>	150
10	Μελλοντικές τάσεις της πράσινης χημείας	155
10.1	<i>Οξειδωτικά αντιδραστήρια και καταλύτες</i>	155
10.2	<i>Βιομημητικά, πολυλειτουργικά αντιδραστήρια</i>	157

10.3 Συνδυαστική πράσινη χημεία	157
10.4 Χημεία που προλαμβάνει μελλοντικά και λύνει τρέχοντα προβλήματα ρύπανσης	158
10.5 Αντιδράσεις χωρίς διαλύτες	159
10.6 Έμφαση στην ενέργεια	160
10.7 Μη ομοιοπολική παραγωγοποίηση	160
<i>Ασκήσεις</i>	163
<i>Αναφορές</i>	169
<i>Ευρετήριο</i>	175



Πρόλογος

στην ελληνική έκδοση

Η εντεινόμενη επιδείνωση της κατάστασης του παγκόσμιου περιβάλλοντος, οι αυξανόμενες ανησυχίες από τις επιπτώσεις των χημικών ουσιών στην ανθρώπινη υγεία, αλλά και οι απαιτήσεις της χημικής βιομηχανίας για αυξημένη ανταγωνιστικότητα υπό καθεστώς αυστηρών νομοθετικών ρυθμίσεων, έχουν οδηγήσει στην ανάγκη μεταβολής των παραγωγικών προτύπων και εφαρμογής των αρχών της πράσινης ή βιώσιμης ή αειφόρου χημείας. Σήμερα είναι πράγματι εντυπωσιακή, σε παγκόσμιο επίπεδο, η δραστηριότητα που αναπτύσσεται στα πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα, αλλά και στον κλάδο της χημικής βιομηχανίας, προς την κατεύθυνση της πράσινης χημείας.

Το βιβλίο των Paul Anastas και John Warner αποτελεί το πρώτο βιβλίο στον κόσμο με θέμα την πράσινη χημεία και ως εκ τούτου, σήμερα, 10 περίπου χρόνια μετά την πρώτη έκδοσή του, συγκαταλέγεται πλέον στα κλασικά του είδους. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν χιλιάδες αναφορές στο συγκεκριμένο εγχειρίδιο.

Η απουσία από την ελληνική βιβλιογραφία ενός εγχειριδίου πράσινης χημείας, που δημιουργεί έλλειμμα γνώσεων και έχει σημαντικό αντίκτυπο στην εκπαίδευση των νέων επιστημόνων, οδήγησε στην απόφαση να αποδόσουμε το περιεχόμε-

νο του βιβλίου *Green Chemistry: Theory and Practice* στην ελληνική γλώσσα, ώστε να καλυφθεί το σχετικό βιβλιογραφικό κενό.

Εκφράζουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας στους συγγραφείς Paul Anastas και John Warner, αλλά και στην Oxford University Press, που ανταποκρίθηκαν θετικά στο αίτημά μας για μεταφραστική απόδοση του βιβλίου, καθώς και στις Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης για το ενδιαφέρον και τη θερμη που έδειξαν όσον αφορά την επιμέλεια της έκδοσής του.

Με αίσθημα ικανοποίησης και ευθύνης παραδίδουμε το βιβλίο αυτό στην ελληνική επιστημονική κοινότητα, με την ελπίδα ότι θα αποτελέσει το έναυσμα για περαιτέρω ανάπτυξη της έρευνας και για την εφαρμογή των αρχών της πράσινης χημείας στην Ελλάδα.

Αθήνα, Οκτώβριος 2006
Παναγιώτης Α. Σίσκος



Πρόλογος

στην αμερικανική έκδοση

Η *πράσινη χημεία* δεν είναι κάτι διαφορετικό από την παραδοσιακή χημεία, δεδομένου ότι χαρακτηρίζεται από την ίδια εφευρετικότητα και καινοτομική διάθεση που αποτελούσαν ανέκαθεν θεμελιώδεις αρχές της κλασικής χημείας. Η *πράσινη χημεία* υπηρετεί τις ίδιες αρχές, αλλά δίνει μεγαλύτερη έμφαση στους προβληματισμούς που έχουν συνδεθεί με τον σχεδιασμό των μεθόδων και εφαρμογών της χημείας στην ιστορική διαδρομή της. Οι εν λόγω προβληματισμοί, οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά στο βιβλίο μας, φανερώνουν τη δύναμη που κατέχει ο χημικός επιστήμονας όχι μόνο όσον αφορά τη χρήση νέων χημικών μεθόδων, αλλά και όσον αφορά την αποτροπή των επιπτώσεών τους καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός χημικού προϊόντος, δηλαδή κατά την παραγωγή, τη χρήση, την καταστροφή του, αλλά και μετά από αυτήν. Ο χημικός μπορεί όχι μόνο να επινοεί τρόπους παρασκευής μιας χημικής ουσίας με επιθυμητές ιδιότητες κατά τη διάρκεια της χρήσιμης ζωής της, αλλά και να σχεδιάζει τα προϊόντα αποικοδόμησής της, όταν η χρήση της εν λόγω ουσίας έχει πια ολοκληρωθεί.

Το βιβλίο αυτό δεν συνιστά κάποιου είδους ηθική αποτίμηση της χημείας. Ωστόσο, αποσαφηνίζει τις ηθικές δεσμεύσεις των χημικών, ως επιστημόνων, όταν αυτοί κάνουν τις επι-

λογές τους κατά τον σχεδιασμό μιας χημικής μεθοδολογίας. Η καθαυτό χημεία δεν είναι ούτε «καλή» ούτε «κακή», από ηθική άποψη· δεν πρόκειται για τίποτα παραπάνω από φαινόμενα της φύσης που υπακούουν στους φυσικούς νόμους. Οι χημικοί, όμως, έχουν τις απαραίτητες γνώσεις και δεξιότητες ώστε, κατά την εφαρμογή της επιστήμης τους, να λαμβάνουν αποφάσεις οι οποίες είναι δυνατόν είτε να προσφέρουν τεράστια οφέλη στην κοινωνία είτε να προκαλέσουν βλάβες στην ανθρώπινη ζωή και σε άλλους ζώντες οργανισμούς. Επομένως, οι χημικοί φέρουν ευθύνη για τη φύση των αποφάσεων που λαμβάνουν. Έτσι, λοιπόν, αν και η επιστήμη της χημείας δεν μπορεί να είναι ούτε «αγαθή» ούτε «σατανική», διάφοροι αήθεις, αδαείς, ή ανεύθυντοι άνθρωποι διαμόρφωσαν με τις ενέργειές τους αρνητικό κλίμα στην κοινή γνώμη, γι' αυτήν και τους λειτουργούς της.

Στο πεδίο της πράσινης χημείας είναι απαραίτητο να διεξαχθεί βασική έρευνα. Η ανακάλυψη και ανάπτυξη θεμελιωδών χημικών μετασχηματισμών μη επιβλαβών για το περιβάλλον θα αποτελέσουν την κινητήρια δύναμη για την εξέλιξή της. Εφαρμογές τέτοιων ανακαλύψεων έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί, αλλά θα χρησιμοποιηθούν και στο μέλλον, τόσο για οικονομικούς όσο και για επιστημονικούς σκοπούς. Οι μεθοδολογίες αυτές ενδέχεται να επηρεάσουν κάθε πτυχή της ζωής μας, όπως συνέβη με τόσες άλλες ανακαλύψεις της χημείας στο παρελθόν. Μια συνθετική μεθοδολογία μπορεί να οδηγήσει είτε σε κάποιο φαρμακευτικό προϊόν είτε σε μια χρωστική είτε σε ένα πρόσθετο διατροφής. Κατά συνέπεια, μπορεί να επηρεάσει θετικά μεγάλο αριθμό προϊόντων.

Εκείνος που πραγματοποιεί όλες αυτές τις ανακαλύψεις είναι ο χημικός. Ο χημικός επινοεί τα εργαλεία, δηλ. τις συνθετικές μεθόδους, που χρησιμοποιούνται σε ολόκληρη τη χημική βιομηχανία. Σε τελική ανάλυση, αυτός είναι και ο κατ' εξοχήν υπεύθυνος για τη φύση των διαθέσιμων εργαλείων.

Ευτυχώς για την κοινωνία, οι χημικοί επιστήμονες έχουν την απαραίτητη κατάρτιση τόσο για τη λήψη αποφάσεων όσο και για την πραγματοποίηση ανακαλύψεων. Η πράσινη χημεία, άλλωστε, εκμεταλλεύεται τις ίδιες ακριβώς δεξιότητες που έχουν καλλιεργήσει οι χημικοί καθ' όλη την ιστορία της επιστήμης τους. Σκοπός αυτού του βιβλίου είναι να προσφέρει τις βάσεις και το θεωρητικό πλαίσιο για την περαιτέρω ανάπτυξη της χημικής επιστήμης με τον πλέον δημιουργικό, καινοτόμο και υπεύθυνο τρόπο.

Paul T. Anastas – John C. Warner
Βοστώνη, Δεκέμβριος 1997

1 *Εισαγωγή*

1.1 Η θέση της χημείας στον κόσμο και το περιβάλλον

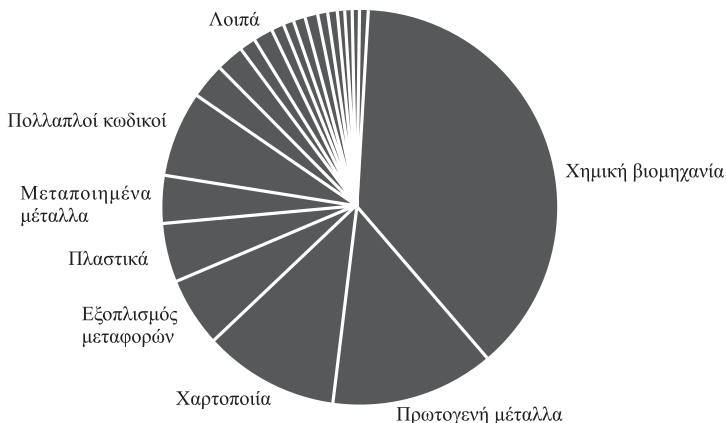
Οι απόψεις για τη θέση της χημείας στον σύγχρονο κόσμο διίστανται βαθιά, αλλά καμία δεν είναι καλά θεμελιωμένη. Από τη μια πλευρά, όσοι ασχολούνται με την επιστήμη και τη βιομηχανία της χημείας διατρανώνουν τα επιτεύγματά της. Από την άλλη, υπάρχει μεγάλος αριθμός ανθρώπων που αντι-μετωπίζουν με φόβο τη χημεία και τα χημικά προϊόντα, απο-φεύγοντας κατά το δυνατόν ό,τι έχει σχέση μαζί τους. Ωστό-σο, καμία από τις παραπάνω απόψεις δεν στηρίζεται σε μια ολοκληρωμένη εικόνα της χημείας, που να περιλαμβάνει τον χαρακτηρισμό, την αλληλεπίδραση και τον μετασχηματισμό όλης της ύλης. Η αληθής φύση της χημικής επιστήμης, λοι-πόν, είναι περίπλοκη και ευρεία, ακριβώς όπως και τα αποτε-λέσματά της.

Η χημεία μας οδήγησε στην ιατρική επανάσταση του 20ού αιώνα, στη διάρκεια της οποίας φάρμακα όπως τα αντιβιοτικά χρησιμοποιήθηκαν για τη θεραπεία ασθενειών που ταλαιπω-ρούσαν την ανθρωπότητα εδώ και χιλιετίες. Αυτή η πρόοδος, που οφείλεται στη χημεία, είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί ο μέσος όρος της ανθρώπινης ζωής, και από 47 έτη που ήταν το 1900 να φθάσει τα 75 έτη κατά τη δεκαετία του 1990¹. Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, τα παγκόσμια αποθέματα τροφι-

μων παρουσίασαν εκρηκτική αύξηση, εξαιτίας της ανάπτυξης και της χρήσης χημικών ουσιών οι οποίες συνετέλεσαν στην προστασία των καλλιεργειών και αύξησαν τη γεωργική παραγωγή. Από κάθε άποψη και σε κάθε πεδίο της καθημερινής ζωής –τις μεταφορές, τις επικοινωνίες, τον ρουχισμό, τη στέγαση κ.λπ.– η χημεία συνέβαλε καθοριστικά στη βελτίωση της ποιότητας ζωής δισεκατομμυρίων ανθρώπων.

Ωστόσο, αυτά τα σχεδόν απίστευτα επιτεύγματα είχαν ένα βαρύ τίμημα, και συγκεκριμένα τις αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον από την παρασκευή, χρήση και διάθεση των συνθετικών χημικών ουσιών. Στις Ηνωμένες Πολιτείες τηρείται αρχείο με την ονομασία Toxics Release Inventory (TRI), στο οποίο καταγράφεται η εκπομπή τοξικών χημικών ενώσεων στο περιβάλλον. Το TRI² άρχισε να τηρείται με βάση τη νομοθεσία για τον Σχεδιασμό Έκτακτης Ανάγκης και το Δικαίωμα της Κοινωνίας για Ενημέρωση (Emergency Planning and Community Right-to-Know Act) και καταγράφει την εκπομπή στο περιβάλλον χημικών ουσιών και ομάδων χημικών ενώσεων, ανά βιομηχανικό κλάδο και παραγωγική μονάδα. Αν και η συγκεκριμένη διαδικασία προσφέρει εξαιρετικά σημαντικά στοιχεία, άγνωστα πριν την έναρξη τήρησης του TRI το 1986, οι χημικές ουσίες τις οποίες καλύπτει αποτελούν μικρό μόνο τμήμα των περίπου 75.000 ουσιών που κυκλοφορούν σήμερα στο εμπόριο. Επομένως, οι ποσότητες των χημικών ενώσεων που απελευθερώνονται στο περιβάλλον είναι πολύ μεγαλύτερες από όσες καταγράφονται.

Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση του 1994, το έτος εκείνο απελευθερώθηκαν συνολικά στο περιβάλλον ένα δισεκατομμύριο χιλιόγραμμα από τουλάχιστον 300 επικίνδυνες ουσίες. Με αυτό τον ρυθμό, στο χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να διαβάσετε μία σελίδα του βιβλίου μας, τουλάχιστον ένας τόνος επικίνδυνων βιομηχανικών αποβλήτων θα έχει μολύνει τον αέρα, το νερό και το έδαφος των ΗΠΑ. Η μεγαλύτε-



Εικόνα 1.1 Αναλογία επικινδυνών αποβλήτων που απελευθερώνονται στο περιβάλλον από μείζονες βιομηχανικούς κλάδους⁴.

ρη επιβάρυνση του περιβάλλοντος με επικίνδυνα απόβλητα οφείλεται στη χημική βιομηχανία (Εικόνα 1.1). Από τους δέκα πρώτους βιομηχανικούς κλάδους σε εκπομπές ρύπων που καταγράφονται στο αρχείο TRI, η χημική βιομηχανία, συμπεριλαμβανομένης της μεταλλουργίας, απελευθερώνει στο περιβάλλον περισσότερα απόβλητα απ' ό,τι οι άλλοι εννιά βιομηχανικοί κλάδοι μαζί.

1.2 Εξέλιξη του περιβαλλοντικού κινήματος

1.2.1 Ενημέρωση του κοινού

Το ζήτημα της «επίδρασης των χημικών ουσιών στο περιβάλλον» μόλις πρόσφατα αναγνωρίστηκε ως ουσιαστικό πρόβλημα και άρχισε να απασχολεί την κοινή γνώμη. Στα χρόνια που ακολούθησαν τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο δεν υπήρχε σχεδόν κανένας περιβαλλοντικός κανονισμός που να καθορίζει τρό-

πους παρασκευής, χρήσης και διάθεσης των χημικών ουσιών. Μόνο στα τέλη της δεκαετίας του 1950 με αρχές της δεκαετίας του 1960 άρχισε να αναπτύσσεται κάποια ανησυχία για το ενδεχόμενο επιβλαβούς επίδρασης των χημικών ουσιών στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον.

Το 1962, η Rachel Carson έγραψε τη *Σιωπηλή Άνοιξη*, βιβλίο στο οποίο περιέγραφε λεπτομερώς τις επιδράσεις ορισμένων εντομοκτόνων στα αβγά διαφόρων πτηνών³. Το βιβλίο τόνιζε ότι το DDT και άλλα εντομοκτόνα ήταν δυνατόν να επεκταθούν σε όλη την τροφική αλυσίδα, προκαλώντας απρόβλεπτες, ανεπανόρθωτες βλάβες. Η απρόσμενη επιβλαβής επίδραση των εν λόγω ουσιών ξεσήκωσε δημόσια κατακραυγή και έγινε αιτία να ρυθμιστούν νομοθετικά η παραγωγή και χρήση εντομοκτόνων στις ΗΠΑ.

Το 1961, τρόμος κυρίευσε την Ευρώπη για μια ουσία που ονομαζόταν *θαλιδομίδη*, η οποία χορηγούνταν σε εγκύους για τη μείωση της ναυτίας και του εμετού, δηλαδή της λεγόμενης «πρωινής αδιαθεσίας». Η χρήση αυτού του φαρμάκου από εγκυμονούσες γυναίκες είχε ως αποτέλεσμα να γεννηθούν βρέφη με σημαντικές ανωμαλίες, συχνά με πλήρη απουσία ή έντονη δυσμορφία των άκρων. Περίπου 10.000 παιδιά γεννήθηκαν με τέτοια προβλήματα σε όλο τον κόσμο, εκ των οποίων 5.000 στη Γερμανία. (Αμφιβολίες όσον αφορά την ασφάλεια του εν λόγω φαρμάκου εμπόδισαν την κυκλοφορία του στις Ηνωμένες Πολιτείες.) Η τραγωδία αυτή οδήγησε στη θέσπιση αυστηρών κανονισμών όσον αφορά τον έλεγχο των νέων φαρμάκων για κινδύνους τερατογενέσεων. Τα «παιδιά της θαλιδομίδης», όπως ενίοτε αποκαλούνται, έγιναν αιτία να δημιουργηθεί ισχυρό αίσθημα φόβου στο ευρύ κοινό για τις επιπτώσεις των συνθετικών χημικών ουσιών, ιδιαίτερα για τις απρόβλεπτες επιπτώσεις τους στους ανθρώπους.

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, το ευρύ κοινό γνώριζε καλά ότι οι συγκεκριμένες ουσίες (DDT και θαλιδομίδη)

είχαν σχεδιαστεί από επιστήμονες, δηλαδή από ανθρώπους για τους οποίους πεποίθηση της κοινής γνώμης ήταν ότι γνώριζαν πολύ περισσότερα από την ίδια για τις χημικές ουσίες που παράγονται βιομηχανικά. Παρά την εμπιστοσύνη που είχε δείξει το κοινό στην επιστημονική κοινότητα για τις καινοτομίες που αυτή προσέφερε στην κοινωνία, άρχισε να συνειδητοποιεί ότι η χρήση των χημικών ουσιών μπορούσε να έχει αναπάντεχες καταστροφικές συνέπειες. Δεν ήταν ξεκάθαρο για το ευρύ κοινό εάν υπήρχε κάποιος που θα μπορούσε να θέσει υπό έλεγχο τις επιπτώσεις αυτών των ουσιών. Μοιραία, λοιπόν, ανατέθηκε στην κυβέρνηση ο έλεγχος αυτός, που είχε ως κυριότερο όπλο τη θέσπιση ρυθμιστικών κανονισμών.

Στις δεκαετίες του 1960, του 1970 και του 1980, που ακολούθησαν, κυριάρχησε η εξής αλληλουχία συμβάντων: Προέκυπτε ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα, λόγω της απροσδόκητης δράσης των χημικών ουσιών πέραν του πεδίου που αρχικά προβλεπόταν. Ακολουθούσε γενικευμένη δημόσια κατακραυγή. Τέλος, θεσπίζονταν οι κατάλληλοι νόμοι και περιοριστικές διατάξεις για τον έλεγχο των χημικών ουσιών που απελευθερώνονταν στο περιβάλλον.

Η Times Beach (πληθυσμός 2.000· απογραφή 1983) είναι μια μικρή πόλη στην Πολιτεία Missouri των ΗΠΑ, 40 χλμ. νοτιοδυτικά του Saint Louis. Τη δεκαετία του 1920 αποτελούσε θέρετρο για την εργατική τάξη του Saint Louis. Σύντομα εξελίχθηκε σε περιοχή μόνιμης εγκατάστασης, με μικρές κατοικίες και πάρκα για τροχόσπιτα. Το 1982, το έδαφος κατά μήκος των δρόμων της Times Beach βρέθηκε ότι περιείχε την τοξική χημική ουσία διοξίνη. [Η πόλη ήταν μία από τις τουλάχιστον 26 –ενδεχομένως περισσότερες και από 100– θέσεις της Πολιτείας που μάλλον ρυπάνθηκαν πριν από μία δεκαετία, όταν οι δρόμοι είχαν ψεκάστεί με πετρελαϊκά απόβλητα που περιείχαν διοξίνη. Τα επίπεδα διοξίνης στο έδαφος των θέσεων αυτών κυμαινόταν από περίπου 300 έως 740 ppb

(parts per billion). Σημειωτέον ότι το ομοσπονδιακό Κέντρο Ελέγχου Ασθενειών (Center for Disease Control, CDC) των ΗΠΑ θεωρεί εδάφη με συγκέντρωση διοξίνης άνω του 1 ppb ως επισφαλή για μακροχρόνια επαφή με τον άνθρωπο.] Τα προβλήματα των κατοίκων της Times Beach επιδεινώθηκαν από μια πλημμύρα, στα τέλη του 1982, η οποία ανάγκασε 700 οικογένειες περίπου να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους. Οι κυβερνητικοί αξιωματούχοι παρότρυναν τους κατοίκους να μην καθαρίσουν τη γεμάτη ρύπους λάσπη και τα «μπάζα» που είχε φέρει μέσα στα σπίτια τους η πλημμύρα. Η Ομοσπονδιακή Κυβέρνηση τους διέθεσε προσωρινή στέγη και, στο πλαίσιο μιας πρωτοφανούς απόφασης, αγόρασε ολόκληρη την πόλη, ξοδεύοντας 33 εκατομμύρια δολάρια από το ειδικό αποθεματικό για την εκκαθάριση τοξικών αποβλήτων.

Την ίδια περίπου χρονική περίοδο, εκτός από το συμβάν στην Times Beach, συνέβησαν και άλλες περιβαλλοντικές καταστροφές. Μία από αυτές που τράβηξαν την προσοχή της κοινής γνώμης ήταν η περίπτωση του Love Canal.

Τα καταστροφικά γεγονότα της περιοχής Love Canal, κοντά στους καταρράκτες του Νιαγάρα, στην Πολιτεία της Νέας Υόρκης (ΗΠΑ), ήταν αποτέλεσμα μακροχρόνιας ρύπανσης. Από τη δεκαετία του 1930 μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1950, μια βιομηχανία χημικών και πλαστικών υλών χρησιμοποιούσε την κοίτη ενός παλιού ρέματος ως θέση απόρριψης χημικών αποβλήτων. Το 1953, η τοποθεσία παραχωρήθηκε στην πόλη Niagara Falls και εκεί οικοδομήθηκαν ένα καινούργιο σχολείο και μια ολόκληρη συνοικία. Το 1971, οι χημικές ουσίες που είχαν απορριφθεί εκεί πριν από χρόνια άρχισαν να διαρρέουν από το αργιλώδες κάλυμμα το οποίο στεγανοποιούσε τον χώρο απόρριψης. Η περιοχή ρυπάνθηκε από τουλάχιστον 82 χημικές ουσίες, μεταξύ των οποίων και κάποιες ύποπτες για καρκινογένεσεις, όπως βενζόλιο, ορισμένους χλωριωμένους υδρογονάνθρακες και διοξίνη. Οι συ-

νέπειες στην υγεία του τοπικού πληθυσμού, που συνδέθηκαν με τη συγκεκριμένη διαρροή, αφορούσαν υψηλά ποσοστά αποβολών και νεογέννητων με γενετικές ανωμαλίες, αυξημένα κρούσματα καρκίνου του ήπατος και υψηλή συχνότητα εκδήλωσης στα παιδιά μιας νευρολογικής πάθησης συνοδευόμενης από επιληπτικές κρίσεις. Η περιοχή θεωρήθηκε επίσημως ως πληγείσα από φυσική καταστροφή. Οι πολιτειακές αρχές δαπάνησαν 10 εκατομμύρια δολάρια για την αγορά ορισμένων κατοικιών και άλλα 10 εκατομμύρια σε μια προσπάθεια τερματισμού της διαρροής. Περίπου 1.000 οικογένειες χρειάστηκε να μετακομίσουν. Μέχρι το 1990, ορισμένα τμήματα της συνοικίας είχαν καθαριστεί σε ικανοποιητικό βαθμό, ώστε να επιτραπεί εκεί η πώληση ακινήτων.

Τα δύο αυτά περιστατικά, η Times Beach και το Love Canal, προκάλεσαν μεγάλη ανησυχία στην κοινή γνώμη, γεγονός που ώθησε το Κογκρέσο των Ηνωμένων Πολιτειών στη λήψη νομοθετικών μέτρων για την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων προβλημάτων, που βρίσκονταν στην πρώτη γραμμή της επικαιρότητας. Το αμερικανικό Κογκρέσο, λοιπόν, θέσπισε τον Νόμο για την Αποκατάσταση των Ρυπασμένων Εδαφών, που έγινε γνωστός ως «Superfund», ο οποίος καθιστούσε υποχρεωτικό τον καθαρισμό των θέσεων απόρριψης τοξικών αποβλήτων σε όλη την επικράτεια των ΗΠΑ.

Οι περιβαλλοντικές καταστροφές συχνά οδηγούν στη θέσπιση νέων νόμων ειδικού χαρακτήρα. Επί παραδείγματι, στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ο ποταμός Cuyahoga του Οχάιο (ΗΠΑ) είχε υποστεί τόσο σοβαρή ρύπανση ώστε ανεφλέγη. Η θέα ενός μεγάλου ποταμού τυλιγμένου στις φλόγες, εξαιτίας της χημικής ρύπανσης, επέβαλε τη λήψη νομοθετικών μέτρων για τον έλεγχο της καθαρότητας των υδάτινων πόρων. Οι εικόνες από το «νέφος» του Λος Άντζελες ή του Πίτσμπουργκ στα νυχτερινά δελτία ειδήσεων, τη δεκαετία του 1960 και του 1970, οδήγησαν στη θεσμοθέτηση πληθώ-

ρας νόμων για την προστασία της ατμόσφαιρας στις αστικές περιοχές, όπως ήταν ο Νόμος περί Καθαρού Αέρα (Clean Air Act). Τη δεκαετία του 1980, όταν με τη χρήση δορυφορικών φωτογραφιών και την εργασία των βραβευμένων με Nobel χημικών Rowland και Molina επιβεβαιώθηκε η καταστροφική επίδραση των χλωροφθορανθράκων (CFC) στη στρατοσφαιρική στιβάδα του όζοντος, υιοθετήθηκε τελικά το *Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ*, που υποδείκνυε τη σταδιακή κατάργηση της χρήσης των CFC. Συμφορές όπως το τραγικό περιστατικό στο Bhopal της Ινδίας, όπου εκατοντάδες άνθρωποι πέθαναν εξαιτίας ενός ατυχήματος σε μονάδα της εταιρείας Union Carbide, που παρήγε τον εξαιρετικά τοξικό ισοκυανικό μεθυλεστέρα, οδήγησαν στη νομοθεσία του 1986 για τον Σχεδιασμό Έκτακτης Ανάγκης και το Δικαίωμα της Κοινωνίας για Ενημέρωση (Emergency Planning and Community Right-to-Know Act).

Όλα τα παραπάνω αποτελούν παραδείγματα απρόσμενων συμβάντων τα οποία συνδέονται με χημικές ουσίες και είχαν τραγική κατάληξη. Κάθε τραγικό περιστατικό οδήγησε σε κοινωνική κατακραυγή και αυτή, με τη σειρά της, σε νομοθετικά μέτρα ελέγχου της παρασκευής, της χρήσης και της τελικής διάθεσης των χημικών ουσιών. Ωστόσο, θα πρέπει να αναρωτηθεί κανείς ποια ήταν η σκοπιμότητα αυτών των νέων νόμων ελέγχου των χημικών ουσιών και εάν τελικά αυτός είναι ο μόνος ή ο αποτελεσματικότερος τρόπος προστασίας της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος.

1.2.2 «Λύση για τη ρύπανση είναι η αραίωση»

Πριν την έλευση των νομοθετικών μέτρων ελέγχου της απελευθέρωσης χημικών ουσιών στο περιβάλλον και της έκθεσης των ανθρώπων σε αυτές, ήταν σύνηθες να καταλήγουν οι συγκεκριμένες ουσίες απευθείας στον αέρα, στο νερό, ή

στο έδαφος. Την εποχή εκείνη ήταν διαδεδομένη η άποψη ότι αρκεί η μείωση της συγκέντρωσης μιας χημικής ουσίας σε δεδομένο μέσο για να αμβλυνθεί η όποια ανεπιθύμητη επίδρασή της. Αυτή η πρακτική, αλλά και η σχετική νοοτροπία, συνοψίζεται στη φράση: «Λύση για τη ρύπανση είναι η αραίωση» (dilution is the solution to pollution). Όσο παράλογο κι αν φαίνεται σήμερα κάτι τέτοιο, η συγκεκριμένη άποψη είχε τότε υιοθετηθεί, δεδομένου ότι έννοιες όπως η χρόνια τοξικότητα, η βιοσυσσώρευση, ακόμα και η καρκινογένεση δεν ήταν τόσο σαφείς όσο στις μέρες μας.

1.2.3 Κατεργασία και περιορισμός των αποβλήτων μέσω μέτρων εποπτείας και ελέγχου

Η καλύτερη επίγνωση των τελικών επιπτώσεων της τοξικότητας και της επίδρασής της στο περιβάλλον άρχισε να επηρεάζει τους νόμους που αφορούσαν την προστασία του περιβάλλοντος, επιβάλλοντας τον αυστηρό έλεγχο των ποσοτήτων μιας χημικής ουσίας που μπορούσαν να απελευθερωθούν σε κάθε δεδομένο μέσο. Σε αυτή την πρώτη προσέγγιση της μεθόδου «εποπτείας και ελέγχου» μέσω περιβαλλοντικών κανονισμών, συχνά καθορίζονται αποδεκτά πρότυπα ή επίπεδα για τις συγκεντρώσεις των ουσιών: π.χ. ενδεικτικά επίπεδα μέγιστης συγκέντρωσης. Με αυτό τον τρόπο ορίζεται π.χ. το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο συγκέντρωσης μιας χημικής ουσίας στο νερό που δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στους ανθρώπους και στο περιβάλλον.

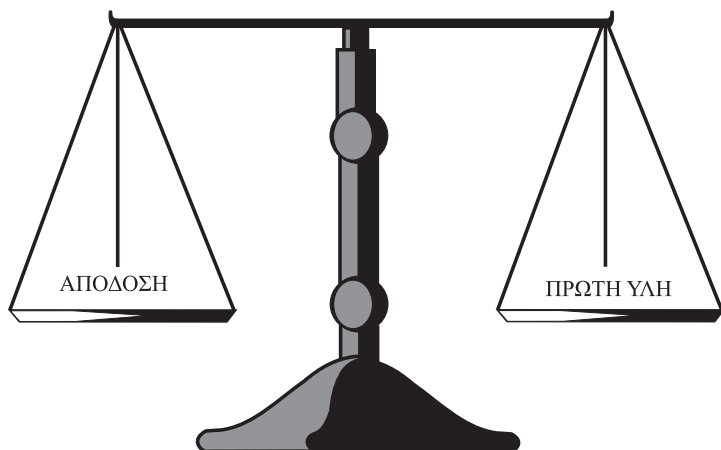
Μια από τις μεγαλύτερες αδυναμίες αυτής της προσέγγισης είναι ότι, συνήθως, δεν συνυπολογίζει τις συνεργιστικές επιδράσεις των άλλων χημικών ουσιών που υπάρχουν στο νερό, μαζί με την υπό έλεγχο ουσία. Επί παραδείγματι, μια τέτοια ουσία μπορεί να απαντά σε συγκεντρώσεις χαμηλότερες από τις προβλεπόμενες, αλλά να είναι δηλητηριώδης όταν

συνυπάρχει στο νερό με μια δεύτερη, μη ελεγχόμενη χημική ουσία, δεδομένου επιπέδου συγκέντρωσης. Στην περίπτωση αυτή, η προστασία του κοινού θεωρείται ανεπαρκής και η έκθεση του στις εν λόγω ουσίες είναι επιβλαβής. Η αδυναμία επαρκούς πρόβλεψης των συνεργιστικών επιδράσεων χαρακτηρίζει πολλούς σύγχρονους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και δεν αποτελεί αποκλειστικά πρόβλημα της προσέγγισης που εξετάζουμε.

Με την εξέλιξη των περιβαλλοντικών κανονισμών άρχισε να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση είτε στην κατεργασία των αποβλήτων πριν την απελευθέρωσή τους είτε στον περιορισμό τους αμέσως μετά, ώστε να μετριάζονται οι κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Μέσω της χρήσης μεθόδων κατεργασίας, που ποικίλλουν από την εξουδετέρωση των οξέων ως τις συσκευές καθαρισμού καπνοδόχων και την αποτέφρωση, οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί απαιτούσαν τον μετασχηματισμό των αποβλήτων σε μορφές λιγότερο επιβλαβείς, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ενδεχόμενες επιπτώσεις τους.

1.2.4 Πρόληψη της ρύπανσης

Το 1990 υπερψηφίστηκε από το Κογκρέσο των Ηνωμένων Πολιτειών ο Νόμος για την Πρόληψη της Ρύπανσης (Pollution Prevention Act, PPA)⁵. Ο νόμος αυτός ήταν απότοκος της παραδοσιακής προσέγγισης «εποπτείας και ελέγχου» των αποβλήτων μέσω κατεργασίας και περιορισμού τους. Ο PPA διαμόρφωσε για πρώτη φορά στις ΗΠΑ μια εθνική περιβαλλοντική πολιτική, σύμφωνα με την οποία πρωταρχική επιλογή οφείλει να είναι η αποτροπή της δημιουργίας αποβλήτων. Η ρύπανση είναι κάτι που μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση σειράς μεθόδων και τεχνικών. Έτσι, αποφεύγεται η ανάγκη για περαιτέρω κατεργασία ή έλεγχο των χημικών ουσιών (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2 Ισοζύγιο πόρων και παραγωγικότητας.

Έχουν αναπτυχθεί πολλοί και διάφοροι τρόποι αποτροπής της ρύπανσης, όπως είναι οι έλεγχοι κατά την παραγωγική διαδικασία, οι οποίοι μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις ποσότητες μιας χημικής ουσίας που θα κατέληγε στα απόβλητα. Ο έλεγχος και οι τεχνικές διαχείρισης αποθεμάτων, με στόχο να αντιμετωπιστούν προβλήματα όπως η άσκοπη εξάτμιση των διαλυτών, αποδείχθηκαν ιδιαίτερα αποτελεσματικά όσον αφορά τη μείωση του συνολικού όγκου των χημικών ουσιών που καταλήγουν στους χώρους απόθεσης αποβλήτων.

1.2.5 Πράσινη χημεία

Η πράσινη χημεία^{6,7,8}, το αντικείμενο μελέτης αυτού του βιβλίου, είναι ένας ιδιαίτερος τρόπος πρόληψης της ρύπανσης. Παρ' ότι υπάρχουν και άλλες τέτοιες μέθοδοι, οι οποίες αποτελούν χρήσιμες και αναγκαίες εναλλακτικές επιλογές, η πράσινη χημεία είναι μια προσέγγιση που προσφέρει μια

θεμελιώδη μεθοδολογία αλλαγής της εγγενούς φύσης ενός χημικού προϊόντος ή μιας χημικής διαδικασίας, έτσι ώστε αυτά να ενέχουν λιγότερους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Η πράσινη χημεία περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και ανασχεδιασμό των χημικών συνθέσεων και των χημικών προϊόντων κατά τρόπο που να προλαμβάνει τη ρύπανση και να αντιμετωπίζει τα περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι συνθετικοί χημικοί διαδραματίζουν πρωταρχικό ρόλο στην ανάπτυξη «πράσινων» χημικών μεθόδων για την πρόληψη της ρύπανσης, αντί για τον εκ των υστέρων έλεγχό της. Το παρόν εγχειρίδιο ανακεφαλαιώνει την τεχνική πρόοδο και τις τρέχουσες εξελίξεις στις μεθόδους της πράσινης χημείας.

Πράσινη χημεία είναι η χρήση αρχών και μεθοδολογιών της χημείας για τη μείωση της ρύπανσης στην πηγή της, δηλ. για τον πιο επιθυμητό τρόπο αποτροπής της. Η πράσινη χημεία περιλαμβάνει όλες τις πρακτικές αποτροπής της ρύπανσης κατά την παρασκευή χημικών προϊόντων, προάγοντας ταυτοχρόνως την πρόληψή της και τη βιομηχανική οικολογία. Η πράσινη χημεία είναι ένας νέος τρόπος θεώρησης των χημικών ουσιών και των διαδικασιών παρασκευής τους, που οδηγεί σε ελαχιστοποίηση των όποιων αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η επανάσταση της πράσινης χημείας έχει μόλις αρχίσει. Είναι μια συναρπαστική εποχή με νέες προκλήσεις για τους χημικούς που συμμετέχουν στην ανακάλυψη, παρασκευή και χρήση των χημικών ουσιών.

1.3 Ο ρόλος των επιστημόνων της χημείας

Οι χημικοί διαδραματίζουν πάντοτε σημαντικό ρόλο στην περιβαλλοντική χημεία. Παραδοσιακά, η περιβαλλοντική χημεία σήμαινε παρακολούθηση και καταγραφή των προβλημάτων, και αποκατάσταση. Οι αναλυτικοί χημικοί συμμετείχαν πάντα

στην ανίχνευση και καταγραφή των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Οι φυσικοχημικοί ενεπλάκησαν στην ανάπτυξη μοντέλων για τα περιβαλλοντικά φαινόμενα, ενώ οι χημικοί της ατμόσφαιρας μελέτησαν τη μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος και το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Ιστορικά, οι συνθετικοί χημικοί, δηλαδή εκείνοι που σχεδιάζουν τα νέα χημικά προϊόντα, αλλά και τις διαδικασίες παρασκευής τους, δεν χαρακτηρίζονταν από ιδιαίτερη περιβαλλοντική ευαισθησία. Αυτό κατά κύριο λόγο οφειλόταν στο γεγονός ότι ο ρόλος τους είναι περισσότερο σημαντικός στα αρχικά στάδια, όταν καταβάλλονται προσπάθειες να βρεθούν τρόποι παρασκευής συγκεκριμένων χημικών ουσιών. Κατά κανόνα, όμως, τα προβλήματα ανακύπτουν στο τέλος της όλης διεργασίας, όταν φθάσουμε στα απόβλητα. Ρόλος των συνθετικών χημικών υπήρξε ανέκαθεν ο σχεδιασμός συνθετικών οδών για την παραγωγή συγκεκριμένων μορίων-στόχων με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Εύλογα, λοιπόν, έφθασε το ευρύ κοινό να θεωρεί τους επιστήμονες αυτούς υπεύθυνους για τα τοξικές χημικές ενώσεις και τα χημικά απόβλητα που δημιουργούνται κατά τη βιομηχανική παρασκευή των εν λόγω ουσιών. Ωστόσο, σήμερα γνωρίζουμε ότι αν και η αντιμετώπιση των προβλημάτων γινόταν πάντοτε στο τέλος της παραγωγικής διαδικασίας, ο συνθετικός χημικός των αρχικών σταδίων της διαδικασίας αυτής μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην επίλυση τους.

Στις μέρες μας, το συνολικό κόστος μιας συνθετικής διαδικασίας για την παραγωγή κάποιας χημικής ένωσης περιλαμβάνει όχι μόνο το κόστος των πρώτων υλών και του εξοπλισμού, αλλά και το κόστος εναρμόνισης στο ισχύον πλαίσιο κανονισμών: κόστος διάθεσης αποβλήτων, δαπάνες αστικής ευθύνης, κόστος επεξεργασίας αποβλήτων συμπεριλαμβανομένων των τροποποιήσεων στη μονάδα παραγωγής. Όλες αυτές οι πρόσθετες δαπάνες έχουν οδηγήσει το συνολικό κόστος

πολλών συνθετικών διαδικασιών σε εξωφρενικά επίπεδα. Η λογιστική αποτίμηση του συνολικού κόστους διαμορφώνει νέα δεδομένα για την οικονομική της μεταποίησης. Οι χημικοί επιστήμονες έχουν τη δύναμη να μειώσουν δραστικά αυτά τα έμμεσα κόστη, ξανασχεδιάζοντας τις χημικές ουσίες και τις διαδικασίες παρασκευής τους.

Όταν ο χημικός πιάνει χαρτί και μολύβι για να σχεδιάσει μια νέα χημική σύνθεση, λαμβάνει ταυτοχρόνως θεμελιώδεις αποφάσεις: αν θα χρησιμοποιηθούν επικίνδυνες χημικές ουσίες, αν θα είναι αναγκασμένοι οι εργαζόμενοι να διαχειρίζονται επικίνδυνα υλικά, αν θα δημιουργούνται επικίνδυνα απόβλητα ή παραπροϊόντα που θα απαιτούν ειδικούς τρόπους απομάκρυνσης κ.λπ. Όλες αυτές οι αποφάσεις είναι ενσωματωμένες άτυπα στη συνθετική διαδικασία. Τελικός στόχος της πράσινης, ή «ήπιας», χημείας είναι να προτείνει συνθετικές μεθοδολογίες που μειώνουν ή εξαλείφουν τη χρήση ή δημιουργία τοξικών πρώτων υλών, παραπροϊόντων, διαλυτών και άλλων συναφών προϊόντων. Ο συνθετικός χημικός που θα αναπτύξει μια σύνθεση συμβατή με τα κριτήρια της πράσινης χημείας ενδέχεται να έχει επιτύχει την παραγωγή ανταγωνιστικότερων προϊόντων από άποψη κόστους, εάν συνυπολογιστούν τόσο τα άμεσα όσο και τα έμμεσα κόστη.

2 *Τι είναι η πράσινη χημεία;*

2.1 Ορισμός

Πράσινη χημεία, περιβαλλοντικά ήπια χημική σύνθεση, εναλλακτικές συνθετικές οδοί για πρόληψη της ρύπανσης, σχεδιασμένη ως περιβαλλοντικά φιλική: όλες αυτές οι εκφράσεις περιγράφουν ουσιαστικά την ίδια έννοια.

Η πράσινη χημεία συνίσταται στην εφαρμογή ενός συνόλου αρχών που μειώνουν ή εξαλείφουν τη χρήση ή την παραγωγή επικίνδυνων ουσιών τόσο κατά τον σχεδιασμό όσο και κατά την παρασκευή και χρήση των χημικών προϊόντων.

Η πράσινη χημεία δεν είναι περίπλοκη, αν και συχνά χαρακτηρίζεται από κομπόχτη. Σκοπός της δεν είναι τίποτα λιγότερο από την τελειότητα, παρ' ότι είναι σαφές πως η πρόοδος και οι καινοτομίες για την επίτευξη αυτού του σκοπού ενέχουν κάποιον ελάσσονα κίνδυνο. Οι αντικειμενικοί στόχοι της πράσινης χημείας θα επιτευχθούν με τη συσσώρευση τέτοιων μικρών σταδιακών βελτιώσεων. Οι χημικοί προσπαθούσαν πάντα να επινοούν αποτελεσματικές συνθετικές μεθοδολογίες. Η διεκπεραίωση ενός μετασχηματισμού ή ο σχεδιασμός μιας οδού σύνθεσης κάποιου μορίου με αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα αποτελούσαν ανέκαθεν θεμελιώδεις συστατικό της τέχνης του συνθετικού χημικού. Η αποδοτικότητα είναι

σημαντική, όχι μόνο ως κριτήριο της ποιότητας μιας συνθετικής μεθόδου, αλλά και για πρακτικούς και οικονομικούς λόγους. Οι οικονομικοί λόγοι έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό συνθέσεων στις οποίες χρησιμοποιούνται οι πλέον άφθονες ή/και οι φθηνότερες πρώτες ύλες.

Η διεύρυνση των παραπάνω κριτηρίων και η προσθήκη νέων, που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, απλά εμπλουτίζουν τον ορισμό της συνθετικής κομψότητας. Η στερεοχημική εξειδίκευση, επί παραδείγματι, συντελεί στην αύξηση της απόδοσης. Η έννοια της «οικονομίας του ατόμου» (atom economy) αντικατέστησε την καθιερωμένη μέτρηση της «απόδοσης», με την οποία γινόταν αξιολόγηση της ποιότητας της συνθετικής μεθοδολογίας⁹.

Η πράσινη χημεία αναγνωρίζει ότι αυτά τα πρότυπα εργασίας δεν θα είναι πλήρη αν δεν προχωρήσουν ένα βήμα παραέρα. Για να είναι πράγματι «κομψή» η χημική συνθετική μεθοδολογία, οφείλει «πρωτίστως, να είναι αβλαβής», κάτι που παραπέμπει στην ιατρική δεοντολογία του Ιπποκράτη. Αυτό το κριτήριο σημαίνει ότι επιβάλλεται οι συνθετικοί χημικοί να ενσωματώνουν στον σχεδιασμό οιασδήποτε νέας μεθοδολογίας την μέριμνα για τις τελικές επιπτώσεις της στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον.

Αν και είναι πολύ εύκολο να απορριφθεί αυτό το κριτήριο, με την πρόφαση ότι αποτελεί ευθύνη κάποιου άλλου, οι χημικοί δεν έχουν πλέον αυτή την πολυτέλεια. Την εποχή που το σιφώνιο χρησιμοποιούταν ακόμα με το στόμα, υπήρχε η εύλογη ίσως πεποίθηση ότι οι γνώσεις των χημικών για την επικινδυνότητα των χημικών ουσιών ήταν τόσο περιορισμένες ώστε δεν θα είχε νόημα να αποδοθούν ευθύνες. Ωστόσο, η εποχή αυτή έχει παρέλθει οριστικά. Δεδομένα για την επικινδυνότητα συγκεντρώνονται και καταγράφονται με ρητή επιταγή του νόμου. Επομένως, οι σημερινοί χημικοί είναι ενήμεροι τόσο για τις δυνατότητες όσο και για τις πραγματι-

κές επιπτώσεις της δουλειάς τους. Αν είναι ασυγχώρητο να αγνοεί ένας πυροσβέστης ότι η φωτιά καίει, ή ένας μάγειρας ότι το μαχαίρι κόβει, άλλο τόσο ασυγχώρητο είναι να μη γνωρίζουν οι χημικοί τη φύση των εργαλείων της δουλειάς τους.

Οπλισμένος με αυτή τη γνώση, ή απλά δεσμευόμενος από αυτήν, ο χημικός οφείλει να αντιμετωπίσει τις ευθύνες του. Δεν είναι πια δυνατόν να κατηγορούνται επιχειρηματίες και βιομήχανοι για τις επιπτώσεις της δικής του δουλειάς. Οι χημικοί κατέχουν την επιστημονική γνώση για τον χειρισμό των μορίων και έχουν την αναγκαία πληροφόρηση για να εκτιμήσουν εάν συγκεκριμένοι χειρισμοί μπορούν να απειλήσουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Κατά συνέπεια, έχουμε πια φθάσει στην εποχή που η γνώση και η πληροφόρηση αυτή πρέπει να παίζουν πρωταρχικό ρόλο στην εφαρμογή της χημείας.

Η συνειδητοποίηση του πώς έχουν σήμερα τα πράγματα αντιμετωπίζεται από τους λειτουργούς της πράσινης χημείας ως ευκαιρία μάλλον, παρά ως περιορισμός.

2.2 Γιατί προκαλεί τόσο ενδιαφέρον αυτό το νέο πεδίο της χημείας;

Για να δοθεί απάντηση σε αυτό το ερώτημα, χρειάζεται πρώτα και κύρια να γίνει το πρόβλημα κατανοητό σε βάθος. Κατά την τελευταία τριακονταετία ξέσπασαν πολλές διαμάχες για την ακριβή φύση των περιβαλλοντικών κινδύνων που προκλήθηκαν από την απελευθέρωση διαφόρων συνθετικών χημικών στο περιβάλλον. Είναι σχεδόν σίγουρο ότι μέχρι να τεκμηριωθούν όλα τα τοξικολογικά δεδομένα (έκθεση στην χημική ουσία, τελική κατάληξή της, δεδομένα μεταφοράς) και να οριστικοποιηθεί κάθε ανάλυση κινδύνων, η διαμάχη αυτή θα συνεχίζεται, ίσως και για άλλη μια τριακονταετία. Κατά συνέπεια, η επιστημονική κοινότητα έχει μπροστά της

δύο εναλλακτικές επιλογές. Η πρώτη είναι να οδηγηθεί στην απραξία, λόγω της απουσίας πλήρους τεκμηρίωσης που προαναφέρθηκε, δηλ. σε μειωμένη ανταπόκριση στις ανησυχίες για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Η δεύτερη επιλογή, την οποία έχουν υιοθετήσει οι θιασώτες του νέου πεδίου της πράσινης χημείας, είναι να γίνει αποδεκτό το γεγονός ότι η απελευθέρωση χημικών ουσιών οδηγεί σε σταδιακή αύξηση των κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Εφόσον ο κίνδυνος μπορεί να εξαλειφθεί με ριζικές, αλλά τεχνικά και οικονομικά εφαρμόσιμες, καινοτομίες στις χημικές μεθοδολογίες, οι χημικοί επιστήμονες οφείλουν να επιδιώξουν κάτι τέτοιο.

Όπως σε κάθε επιστημονικό πεδίο, έτσι και στην πράσινη χημεία, είναι αλήθεια ότι τα περιθώρια δράσης του επιστήμονα είναι τα όρια των επιστημονικών γνώσεων της εποχής του. Πάντως, με τις γνώσεις που ήδη έχουμε αναφορικά με τους κινδύνους χημικής προέλευσης, οι χημικοί μπορούν να επιδιώξουν την ελαχιστοποίηση των κινδύνων αυτών.

2.3 Γιατί πρέπει οι χημικοί να επιδιώκουν τους στόχους της πράσινης χημείας;

Ο Ρόμπερτ Κένεντυ έλεγε χαρακτηριστικά το εξής: «Μερικοί βλέπουν τα πράγματα όπως είναι και αναρωτιούνται γιατί. Εγώ βλέπω τα πράγματα όπως θα έπρεπε να είναι και αναρωτιέμαι γιατί όχι». Οι χημικοί οφείλουν να επιδιώκουν τόσο η δουλειά τους όσο και οι ουσίες που χρησιμοποιούν να είναι φιλικές προς το περιβάλλον, διότι κάτι τέτοιο είναι πλέον εφικτό. Αυτό έχει θεμελιώδη σημασία. Με τις διαθέσιμες γνώσεις για τον χειρισμό και τον μετασχηματισμό των χημικών ουσιών, σε συνδυασμό με τα βασικά δεδομένα για την επικινδυνότητά τους –είναι άμεσα διαθέσιμα από ποικίλες πηγές– οι χημικοί έχουν τη δύναμη να περιορίσουν ή και

να εξαλείψουν τον κίνδυνο που απορρέει από τη χημική βιομηχανία, για τους ίδιους και για την κοινωνία γενικότερα.

Οι πρωτοπόροι ερευνητές αυτού του νέου πεδίου γνωρίζουν πως οι συγκεκριμένοι στόχοι μπορούν να εκπληρωθούν. Ο καθένας αντιλαμβάνεται ότι καμιά δραστηριότητα δεν μπορεί να είναι εντελώς ακίνδυνη. Ωστόσο, οι στόχοι που έχουν επιτευχθεί, σε επίπεδο έρευνας αλλά και σε επίπεδο βιομηχανικής παραγωγής, αμβλύνουν σημαντικά τις ανησυχίες μας για το περιβάλλον και την υγεία, καθώς την ίδια στιγμή αναπτύσσονται ολοένα αποτελεσματικότερες διεργασίες και μεθοδολογίες.

Ένας πρόσθετος λόγος για τον οριστικό προσανατολισμό της επιστημονικής κοινότητας προς την πράσινη χημεία είναι ότι αυτή, για την επίλυση κάθε προβλήματος, αξιοποιεί τις θεμελιώδεις επιστημονικές αρχές που διέπουν τη συμπεριφορά των μορίων, δεν αρκείται σε μπαλώματα για τη μείωση του κινδύνου. Ο κίνδυνος μπορεί να περιγραφεί ως συνάρτηση της επικινδυνότητας μιας χημικής ουσίας και της έκθεσης στην ουσία αυτή, με τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο (Εικόνα 2.1).

$$\text{Κίνδυνος} = f [\text{επικινδυνότητα, έκθεση}]$$

Εικόνα 2.1 Μαθηματικός τύπος που εκφράζει τον κίνδυνο.

Παραδοσιακός τρόπος μείωσης του κινδύνου σε επίπεδο κοινωνίας και χημικής βιομηχανίας, με εργαλείο την εθνική περιβαλλοντική πολιτική, είναι ο περιορισμός της έκθεσης. Με δεδομένη επικινδυνότητα και μειούμενη έκθεση, το ρίσκο θα πρέπει να περιορίζεται αναλογικά. Με τη χρήση αξιόπιστων δεδομένων τοξικότητας και γνωρίζοντας την αποτελεσματικότητα κάθε εφαρμοζόμενης μεθόδου ελέγχου της έκθεσης, μπορούμε να περιορίσουμε τον κίνδυνο κάτω από

κάποιο προσδιορίσιμο, αποδεκτό επίπεδο. Αυτό το «αποδεκτό επίπεδο» είναι εξ ορισμού αυθαίρετο, αφού αμέσως γεννά το ερώτημα «αποδεκτό από ποιον;».

Μπορεί η «μία πιθανότητα στο εκατομμύριο», για την προσβολή κάποιου ατόμου από καρκίνο λόγω έκθεσής του σε δεδομένο επίπεδο μιας χημικής ουσίας, να θεωρείται «αποδεκτή» από την κοινωνία, όπως προκύπτει από το ισχύον νομοθετικό και ρυθμιστικό πλαίσιο, όμως τα πράγματα αλλάζουν αν εσύ είσαι αυτός ο ένας στο εκατομμύριο.

Ένα άλλο μειονέκτημα της μείωσης του κινδύνου μέσω ελέγχου της έκθεσης είναι ότι η χρήση και η απελευθέρωση μιας χημικής ουσίας μπορεί να επιβαρύνει άτομα που δεν εφαρμόζουν μέτρα ελέγχου της έκθεσης. Επί παραδείγματι, ένας χημικός μπορεί να φοράει γάντια, προστατευτικά γυαλιά κ.λπ. προκειμένου να προστατευθεί από την έκθεσή του σε υψηλά επίπεδα κάποιας ουσίας που γνωρίζει ότι είναι επιβλαβής. Ωστόσο, αυτά τα μέτρα ελέγχου της έκθεσης δεν προστατεύουν κάποιον που βρίσκεται μακρύτερα, αλλά έστω τυχαία θα έλθει σε επαφή με τη συγκεκριμένη ουσία. Με δεδομένες τις μεγάλες αβεβαιότητες που υπάρχουν όσον αφορά τις χρόνιες, βιοσυσσωρευτικές και συνεργιστικές επιπτώσεις για ευρύ φάσμα χημικών ουσιών, και σε συνάρτηση με τις σημερινές συνθήκες που επικρατούν στη χημική επιστήμη, η χρήση μέτρων ελέγχου της έκθεσης για τη μείωση του κινδύνου σε επίπεδο κοινωνίας τίθεται υπό αμφισβήτηση.

Ένα τελευταίο επιχείρημα κατά της εφαρμογής μέτρων ελέγχου της έκθεσης είναι το ενδεχόμενο αυτά να αποτύχουν. Κανένας αναπνευστήρας ή προστατευτική μάσκα, γυαλιά, γάντια, ή φόρμα δεν προσφέρει απόλυτη προστασία. Έτσι, κάθε πιθανότητα αποτυχίας του προστατευτικού εξοπλισμού να μειώσει την έκθεση θέτει το άτομο σε πολύ σοβαρό κίνδυνο.

Συγκρίνοντας τους παραπάνω περιορισμούς με τις αρχές της πράσινης χημείας για τη μείωση της επικινδυνότητας, δια-

πιστώνουμε πως η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων είναι ότι –υπό την προϋπόθεση της ορθής εφαρμογής της– ο περιορισμός της επικινδυνότητας μέσω της πράσινης χημείας είναι αποτελεσματικός σε κάθε περίπτωση. Εάν ο κίνδυνος περιοριστεί, με μία από τις πολλές τεχνικές και μεθοδολογίες που θα παρουσιάσουμε σε αυτό το βιβλίο (π.χ. εναλλακτικές πρώτες ύλες, διαλύτες κ.ά.), δεν υπάρχει περίπτωση αύξησης του κινδύνου μέσω απρόβλεπτης αύξησης της επικινδυνότητας (βλ. Εικόνα 2.1). Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει περίπτωση μια αβλαβής ουσία να γίνει απρόσμενα τοξική και να επιδράσει αρνητικά στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Βέβαια, όπως υπάρχει πιθανότητα να βάλει κάποιος ανάποδα τα προστατευτικά γυαλιά ή να φορέσει τα ελαστικά γάντια στα πόδια του, έτσι και η πράσινη χημεία μπορεί να εφαρμοστεί λανθασμένα. Αυτό θα ισοδυναμούσε με την αντικατάσταση μιας μη τοξικής χημικής ουσίας από μια ιδιαιτέρως τοξική. Αν εξαιρέσουμε αυτό το παράλογο ενδεχόμενο, η μείωση της επικινδυνότητας μέσω της πράσινης χημείας περιορίζει σίγουρα τον κίνδυνο. Επομένως, σε αντίθεση με τη χρήση μέτρων ελέγχου της έκθεσης για τη μείωση του κινδύνου, η έκθεση ενέχει στη συγκεκριμένη περίπτωση μικρότερο κίνδυνο για τους πιο απομακρυσμένους αποδέκτες. Επειδή η φύση μιας χημικής ουσίας που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της πράσινης χημείας είναι εγγενώς λιγότερο επικίνδυνη, ο κίνδυνος είναι ίδιος για κάποιον που χρησιμοποιεί στη δουλειά του τη συγκεκριμένη ουσία και για κάποιον που εκτίθεται δευτερογενώς σε αυτήν. Τέλος, η έννοια του «αποδεκτού επιπέδου κινδύνων» ακυρώνεται και αντικαθίσταται από την έννοια του «περιβαλλοντικά φιλικού».

Η προαπαιτούμενη των επόμενων σελίδων δεν είναι διαθέσιμη

Αν και αργότερα θα επεκταθούμε σ' αυτό, ο στόχος της παρασκευής ενός «περιβαλλοντικά φιλικού» χημικού προϊόντος ή της επινόησης μιας διαδικασίας «φιλικής προς το περιβάλλον» είναι μάλλον μια δεοντολογική διακήρυξη περί διαρκούς βελτίωσης παρά μέτρο της βελτίωσης αυτής.