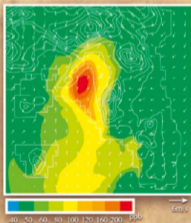


Αριστοτελείο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας
και Περιβαλλοντικής Μηχανικής

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Επιμέλεια: Καθηγητής Ν. ΜΟΥΣΙΟΠΟΥΛΟΣ



Β' ΕΚΔΟΣΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 1999

Περιεχόμενα

Πρόλογος	
Μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας σε αστικές περιοχές <i>N. Μουσιόπουλος</i>	1
Μοντέλα ατμοσφαιρικής διασποράς για ρυθμιστικούς σκοπούς <i>I. Γ. Μπάρτζης</i>	13
Έμπειρα συστήματα και μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης στην πρόγνωση επιπέδων αέριας ρύπανσης <i>N. Αβούρης και H. Καλαπανίδας</i>	21
Απογραφές πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης <i>Z. Σαμαράς, Γ. Τσίλιγκιρίδης και Π. Πιστικόπουλος</i>	37
Ο ρόλος των μοντέλων ποιότητας της ατμόσφαιρας στη βραχυπρόθεσμη πρόγνωση επιπέδων ρύπανσης <i>Σ. Παπαλεξίου και N. Μουσιόπουλος</i>	61
Η επίδραση των τοπικών συστημάτων κυκλοφορίας στην ποιότητα του αέρα <i>Δ. Μελάς</i>	77
Ολοκληρωμένη αποτίμηση ποιότητας ατμόσφαιρας <i>A. Βύρας και K. Καρατζάς</i>	95
Οι διαδικασίες για τις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων <i>Σ. Παπαγρηγορίου</i>	103
Παράρτημα Μέλη Ανθρωπίνου Δικτύου ΥΔΡΑ	111

Πρόλογος

Οι αρνητικές επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον άνθρωπο και το περιβάλλον του επιτάσσουν τον περιορισμό των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Τα μαθηματικά μοντέλα ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελούν σήμερα εύχρηστα και αποτελεσματικά εργαλεία για μία ολοκληρωμένη αποτίμηση τόσο των βραχυπρόθεσμων όσο και των μακροπρόθεσμων επεμβάσεων με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας. Υπολογισμός της έκθεσης οικοσυστημάτων σε υψηλές συγκεντρώσεις και εναποθέσεις αερίων ρύπων, διαχείριση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, βραχυπρόθεσμη πρόγνωση επιπέδων ρύπανσης, πληροφόρηση των πολιτών καθώς και έρευνα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα πεδίων εφαρμογής των μοντέλων αυτών.

Το Ανθρώπινο Δίκτυο Μεθόδων Υπολογισμού Διασποράς Ρύπων στην Ατμόσφαιρα (ΥΔΡΑ), που χρηματοδοτείται από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος Έρευνας και Τεχνολογίας ΕΠΕΤ II έχει ως κύριους στόχους

- τη διάχυση της επιστημονικής εμπειρίας και γνώσης στον τομέα της ανάπτυξης και εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων περιγραφής των φαινομένων διασποράς στην ατμόσφαιρα και
- την ενίσχυση της συνεργασίας τόσο ανάμεσα στους επιστήμονες που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον τομέα, όσο και μεταξύ επιστημόνων και χρηστών των μοντέλων αυτών.

Για την εφαρμογή των μοντέλων ποιότητας της ατμόσφαιρας, είναι απαραίτητη η συνεργασία τους με μετεωρολογικά μοντέλα, από τα οποία λαμβάνουν μετεωρολογικά στοιχεία εισόδου (παρελθόντα ή προγνωστικά, αναλόγως των αναγκών της συγκεκριμένης εφαρμογής). Στα μετεωρολογικά μοντέλα εντάσσονται και τα λεγόμενα μοντέλα πρόγνωσης καιρού, χαρακτηριστικό παράδειγμα για τα οποία αποτελεί το μοντέλο “ΣΚΙΡΩΝ” που είναι μία έκδοση του Eta/NMC όπως έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Το ΣΚΙΡΩΝ, για το οποίο υπεύθυνος είναι ο Επίκουρος Καθηγητής του Πανεπιστημίου Αθηνών και Αναπληρωτής Συντονιστής του Δικτύου ΥΔΡΑ κ. Γεώργιος Κάλλος, αποτελεί το ολοκληρωμένο σύστημα πρόγνωσης καιρού που χρησιμοποιείται από την ΕΜΥ για την περιοχική πρόγνωση.

Το παρόν τεύχος περιέχει εισηγήσεις οι οποίες δόθηκαν στα πλαίσια της ημερίδας του Δικτύου ΥΔΡΑ με τίτλο «Μαθηματικά μοντέλα ατμοσφαιρικής ρύπανσης - επιστημονικές βάσεις και πρακτική χρησιμότητα». Η ημερίδα αυτή έλαβε χώρα στην Αθήνα στις 22 Απριλίου 1997 και διοργανώθηκε από το Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και

Περιβαλλοντικής Μηχανικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης σε συνεργασία με το Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Με δεδομένη την ευρύτητα του θέματος, ιδιαίτερη προσπάθεια έγινε να καλυφθούν στην ημερίδα όσο περισσότερες πτυχές του ήταν δυνατό. Έτσι, το πρόγραμμα της ημερίδας περιελάμβανε εισηγήσεις που εστιάζουν σε αυτό καθαυτό το θέμα της παρουσίας των μοντέλων, των χαρακτηριστικών τους δυνατοτήτων και των εφαρμογών τους, αλλά και εισηγήσεις σχετικές με ειδικότερα θέματα όπως τα έμπειρα συστήματα και οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης στην πρόγνωση των επιπέδων ρύπανσης, οι απογραφές πηγών ρύπανσης ή η ολοκληρωμένη αποτίμηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Ιδιαίτερη προσπάθεια έγινε επίσης ώστε να αντιπροσωπευθούν στην ημερίδα αυτή ερευνητικοί φορείς από όλη την χώρα καθώς και φορείς-χρήστες. Έτσι, ως εισηγητές συμμετείχαν ερευνητές από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, από το Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, από το Πανεπιστήμιο Αιγαίου, από το Πανεπιστήμιο Πάτρας και από το ερευνητικό ίδρυμα ΕΚΕΦΕ/Δημόκριτος, ενώ ως φορείς-χρήστες συμμετείχαν επίσης η Διεύθυνση Ε.Α.Ρ.Θ. του ΥΠΕΧΩΔΕ και η εταιρία ENVECO ΑΕ.

Ως Συντονιστής του Δικτύου ΥΔΡΑ επιθυμώ να ευχαριστήσω όλους τους εισηγητές για την συνεισφορά τους στην επιτυχία της ημερίδας. Θα ήθελα επίσης να απευθύνω θερμές ευχαριστίες στη συνεργάτιδά μου Δρα. Σοφία Παπαλεξίου για την ουσιαστική της συνδρομή στη σύνταξη του παρόντος τεύχους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας για την οικονομική υποστήριξη τόσο της διοργάνωσης της ημερίδας όσο και των υπολοίπων δραστηριοτήτων του Δικτύου ΥΔΡΑ.

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 1997

Καθηγητής Ν. Μουσιόπουλος

Μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας σε αστικές περιοχές

N. Μουσιόπουλος

Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και

Περιβαλλοντικής Μηχανικής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Περίληψη

Το πρόβλημα της αέριας ρύπανσης παρουσιάζεται εντονότερο σε αστικές περιοχές, όπου η συσσώρευση ανθρωπίνων δραστηριοτήτων οδηγεί κατά κανόνα σε αυξημένες εκπομπές αερίων ρύπων. Κάτω από την επήρεια δυσμενών μετεωρολογικών συνθηκών, τα επίπεδα συγκεντρώσεων ρύπων στις περιοχές αυτές ξεπερνούν όρια της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας (ΠΟΥ). Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος είναι απαραίτητη η ανάλυση και σωστή περιγραφή όλων των φαινομένων και παραγόντων που καθορίζουν τις σχέσεις πηγής-αποδέκτη ατμοσφαιρικών ρύπων. Για το σκοπό αυτό ενδείκνυται κυρίως μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης μετεωρολογικών φαινομένων και φαινομένων διασποράς και μετασχηματισμού ρύπων, τα λεγόμενα «μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας».

Το φάσμα των δυνατών εφαρμογών των μοντέλων αυτών είναι ευρύ. Σ' αυτές συγκαταλέγονται οι μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των επιπέδων αέριας ρύπανσης, η διαχείριση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, η πληροφόρηση των πολιτών και η έρευνα. Οι διάφορες απαιτήσεις για ρεαλιστική προσομοίωση της διασποράς ρύπων καλύπτονται κατά τρόπο που διαφέρει πολύ από μοντέλο σε μοντέλο. Έτσι, τα μοντέλα διαφοροποιούνται ως προς τη γεωγραφική κλίμακα εφαρμογής τους (τοπική, περιφερειακή, ηπειρωτική), τη χρονική κλίμακα, το χειρισμό των εξισώσεων μεταφοράς (Λαγκρανζιανά, Ούλεριανά), το χειρισμό διαφόρων διεργασιών (χημικού μετασχηματισμού, ξηρής και υγρής εναπόθεσης, κλπ) ή την πολυπλοκότητα της προσέγγισης.

Για την επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου για κάθε είδους εφαρμογή είναι απαραίτητη η ανάλυση των αναγκών του χρήστη. Προς υποβοήθηση υποψηφίων χρηστών ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος έχει αναπτύξει Κέντρο Τεκμηρίωσης Μοντέλων που είναι προσπελάσιμο μέσω του Internet. Στις βασικότερες ιδιότητες ενός μοντέλου συγκαταλέγεται η ακρίβειά του, η οποία μπορεί να εκτιμηθεί στην πορεία μιας διαδικασίας αποτίμησης του μοντέλου.

Πίνακας 1: Επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ρύποι που τις προκαλούν και κλίμακες αποτίμησης.

Επίδραση	Είδος ρύπου	Χρονική κλίμακα	Χωρική κλίμακα
Υγεία	Πρωτογενείς ρύποι SO ₂ TPM CO Pb Δευτερογενείς ρύποι O ₃ NO ₂	Ωρα και έτος 24ωρο και έτος Ωρα και 8ωρο Έτος Ωρα και 8ωρο Ωρα και 24ωρο	Τοπική-αστική Τοπική-αστική Τοπική-αστική Τοπική-αστική Τοπική-αστική Τοπική-αστική
Χλωρίδα	Πρωτογενείς ρύποι SO ₂ Δευτερογενείς ρύποι O ₃	Ωρα Ωρα	Τοπική-αστική Αστική-περιφερειακή
Υλικά	SO ₂ και υγρασία	Μακροπρόθεσμη (έτος και πλέον)	Τοπική-αστική
Έδαφος και περιβάλλον	Υγρή εναπόθεση Σουλφίδια, νιτρίδια και αμμώνιο Ξηρή εναπόθεση SO ₂ NH ₃ NO ₃ HNO ₃	Μακροπρόθεσμη (έτος και πλέον) Μακροπρόθεσμη (έτος και πλέον)	Περιφερειακή Τοπική-περιφερειακή

1 Ατμοσφαιρική ρύπανση σε αστικές περιοχές

1.1 Δυσμενείς επιδράσεις της ρύπανσης

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες (π.χ. η κυκλοφορία των οχημάτων, οι διεργασίες καύσης, η παραγωγική διαδικασία στη βιομηχανία) συνοδεύονται από εκπομπές αερίων ρύπων που οδηγούν σε αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Σε μία αστική περιοχή, όπου συνήθως υπάρχει συγκέντρωση μεγάλου αριθμού δραστηριοτήτων, η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι δυνατόν να έχει διάφορα δυσμενή αποτελέσματα: Προβλήματα υγείας που σχετίζονται κυρίως με την εισπνοή αερίων και σωματι-

δίων, επιτάχυνση της φθοράς αρχαίων μνημείων και άλλων κτιρίων, υποβάθμιση υλικών καθώς και βλάβες στη χλωρίδα μέσα και γύρω από τις αστικές περιοχές.

Η ύπαρξη, η συχνότητα και η ένταση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μία αστική περιοχή εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους: Την ένταση και τη χωρική και χρονική κατανομή των πηγών ρύπανσης, την τοπογραφία της περιοχής, τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες (μέση ταχύτητα ανέμου, συχνότητα νηνεμίας, εμφάνιση θερμοκρασιακών αναστροφών κλπ) και τις διαδικασίες εναπόθεσης. Για κάθε ρύπο, ο βαθμός επικινδυνότητας της ρύπανσης εξαρτάται καθοριστικά από την λεγόμενη «έκθεση» σε αυτήν που είναι συνάρτηση της διάρκειας και της έντασης της ρύπανσης. Σε ό,τι αφορά επιδράσεις στον άνθρωπο, σημαντικό ρόλο παίζουν και τυχόν προϋπάρχοντα προβλήματα υγείας που σχετίζονται με την έκθεση στη συγκεκριμένη ρύπανση. Στον Πίνακα 1 ταξινομούνται οι κυριότεροι ρύποι με βάση τις επιδράσεις τους και δίδονται η χρονική και χωρική κλίμακα στις οποίες αποτιμούνται συνήθως οι επιδράσεις αυτές.

1.2 Χωρική και χρονική διακύμανση της ρύπανσης

Λόγω της χρονικής διακύμανσης των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, της φωτοχημικής δραστηριότητας και των συνθηκών διασποράς, η συγκέντρωση των αερίων ρύπων σε μία αστική περιοχή υπόκειται σε σημαντικές χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις (ημερήσια, εβδομαδιαία και εποχιακή). Στις λεγόμενες «*συναρτησιακές σχέσεις πηγής-αποδέκτη*» επιδρούν τα μορφολογικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής ενδιαφέροντος, η απόσταση από τις κύριες πηγές ρύπανσης και η τοποθεσία του αποδέκτη μέσα στην πόλη. Παράμετροι όπως η ρυμοτομία, η δόμηση, η διαφορετική ανακλαστικότητα, τραχύτητα και θερμοχωρητικότητα των διαφόρων επιφανειών (δρόμων, κτιρίων κλπ), έχουν ως αποτέλεσμα η χωρική κατανομή της αέριας ρύπανσης να είναι εξαιρετικά ανομοιογενής.

Τα επίπεδα ρύπανσης σε μία αστική περιοχή συχνά σχετίζονται και με τη ρύπανση σε μεγαλύτερη κλίμακα: Οι περισσότεροι ρύποι που ευθύνονται για τη ρύπανση σε περιφερειακή-ηπειρωτική κλίμακα προέρχονται από αστικές περιοχές. Από την άλλη μεριά, συγκεντρώσεις ρύπων σε περιφερειακή κλίμακα αποτελούν το «υπόβαθρο» πάνω στο οποίο προστίθεται η συνεισφορά των διαφόρων πηγών σε τοπικό επίπεδο. Αυτό το υπόβαθρο αποτελεί συχνά σημαντικό ποσοστό των συνολικών επιπέδων ρύπανσης. Ειδικότερα, κατά την αποτίμηση της αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορούν να αναλυθούν τα εξής επί μέρους μεγέθη:

- Το *φυσικό υπόβαθρο*, δηλαδή, η συγκέντρωση του ρύπου που θα υφίστατο χωρίς ανθρώπινες δραστηριότητες.
- Το *περιφερειακό υπόβαθρο*: Η μακράς κλίμακας μεταφορά ανθρωπογενών αερίων ρύπων που προέρχονται από διάφορες πηγές ρύπανσης, περιλαμβανομένων και αστικών περιοχών, οδηγεί σε αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης των αερίων ρύπων και των χημικά παραχθέντων προϊόντων τους σε περιφερειακό επίπεδο.
- Το *αστικό υπόβαθρο*: Με αυτόν τον όρο υπονοείται η συγκέντρωση των ρύπων σε τοποθεσίες μέσα στις πόλεις οι οποίες δεν υφίστανται άμεση επίδραση από έντονες πηγές ρύπανσης όπως η κυκλοφορία των οχημάτων και η βιομηχανία.

- Ρύπανση στα λεγόμενα «σημεία εξάρσεων», δηλαδή σε πολυσύχναστους δρόμους ή την εγγύς περιοχή βιομηχανικών μονάδων. Στα σημεία αυτά, οι συγκεντρώσεις ρύπων είναι κατά πολύ αυξημένες λόγω της άμεσης επίδρασης γειτονικών πηγών ρύπανσης.

1.3 Μεθοδολογία αποτίμησης της ρύπανσης

Για την αποτίμηση της αέριας ρύπανσης σε μία αστική περιοχή υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι:

- *Επιτόπιες παρατηρήσεις* με δίκτυα σταθμών μετρήσεων των επιπέδων των διαφόρων ρύπων καθώς και των μετεωρολογικών παραμέτρων.
- *Φυσικές προσομοιώσεις* του φαινομένου όπως είναι τα πειράματα ιχνηθετών, τα πειράματα σε αεροσήραγγες ή τα πειράματα σε υδραυλικά κανάλια.
- *Μαθηματικές προσομοιώσεις* με τη βοήθεια καταλλήλων υπολογιστικών προτύπων, των λεγομένων «μαθηματικών μοντέλων». Τα μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας αποτελούν το πλέον εύχρηστο εργαλείο αποτίμησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μία αστική περιοχή: Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προαναφερθείσες ιδιαιτερότητες του φαινομένου, τα μοντέλα αυτά είναι σε θέση να δώσουν μία πλήρη εικόνα της ποιότητας της ατμόσφαιρας σε μία αστική περιοχή.

Η έντονη ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης σε θέματα σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος οδήγησε τα τελευταία χρόνια σε μια συνεχώς αυξανόμενη πολιτική πίεση για την βελτιωμένη διερεύνηση των συνεπειών έργων και δραστηριοτήτων στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Σε ό,τι αφορά το ατμοσφαιρικό περιβάλλον σε αστικές περιοχές, αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη καλύτερων και πιο αξιόπιστων μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας. Ευτυχώς, κατά την ίδια περίοδο επήλθε μια ραγδαία βελτίωση των υπολογιστικών συστημάτων και έτσι δόθηκε η δυνατότητα στην επιστημονική κοινότητα να επιταχύνει τους ρυθμούς ανάπτυξης των μοντέλων στα πλαίσια μεγάλων διεθνών ερευνητικών προγραμμάτων.

Οι δυνατότητες πρακτικής χρήσης των μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας προσδιορίζονται από το είδος των συμπερασμάτων που μπορούν να εξαχθούν από την εφαρμογή τους (ποιοτική σκοπιά) και από την ακρίβεια αυτών των συμπερασμάτων (ποσοτική σκοπιά). Προφανώς για μία ποιοτική προσέγγιση δεν απαιτείται τίποτε παραπάνω από την κατανόηση των χαρακτηριστικών και των ορίων εφαρμογής του μοντέλου. Για τον προσδιορισμό της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του μοντέλου απαιτείται επιπρόσθετα η γνώση

- (i) της ακρίβειας των δεδομένων εισόδου και του κατά πόσον αυτή επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του μοντέλου,
- (ii) της αβεβαιότητας στις προσεγγίσεις και στις παραμετροποιήσεις του μοντέλου και
- (iii) των μεθοδολογιών αποτίμησης του κατά πόσο τα αποτελέσματα του μοντέλου αναπαριστούν την πραγματικότητα.

Στη συνέχεια επιχειρείται σύντομη επισκόπηση της σημερινής κατάστασης των μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας που είναι δυνατόν να υποστηρίξουν τη διαχείριση του α-

ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος σε μία αστική περιοχή. Μια διεξοδικότερη επισκόπηση μπορεί να βρεθεί αλλού (Moussiopoulos et al., 1996).

2 Πεδία εφαρμογής μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας

Μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια μεγάλου αριθμού εφαρμογών. Πρώτα απ' όλα, η παρακολούθηση της ποιότητας αέρα μπορεί να υποστηριχθεί αποτελεσματικά με μοντέλα: Για την αξιόπιστη εκτίμηση των απαιτούμενων μεγεθών (π.χ. συγκεντρώσεων) έτσι ώστε αυτά να είναι αντιπροσωπευτικά στο χώρο και στο χρόνο, η καταγραφή δύσκολα μπορεί να βασιστεί μόνο στις μετρήσεις, καθώς αυτές λαμβάνονται σε συγκεκριμένες θέσεις και ως εκ τούτου δεν είναι απαραίτητα αντιπροσωπευτικές για μεγαλύτερες περιοχές. Μέσες τιμές για μεγαλύτερης κλίμακας πεδία έκθεσης και εναπόθεσης υπολογίζονται εύκολα με μοντέλα, που επίσης αποδεικνύονται χρήσιμα και για τη διερεύνηση της σχετικής επίδρασης διαφόρων πηγών ρύπανσης ή σεναρίων εκπομπών.

Στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες τα μοντέλα χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της περιβαλλοντικής αδειοδότησης βιομηχανικών μονάδων ή άλλων μείζονος σημασίας έργων (de Leeuw et al., 1995). Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα των μοντέλων χρησιμοποιούνται για την έκδοση αδειών ή σε μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Γενικά, τα μοντέλα αυτού του πεδίου εφαρμογών πρέπει να παρέχουν χωρικές κατανομές συγκεντρώσεων (ωριαίων τιμών ή μέσων όρων για μακρύτερο χρονικό διάστημα) προς σύγκριση με κείμενα όρια ποιότητας αέρα. Παρά τις κάποιες πρόσφατες ενέργειες για την αποτίμηση των μοντέλων που χρησιμοποιούνται σε μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η ακρίβεια των μοντέλων αυτών είναι κατά κανόνα άγνωστη.

Με δεδομένη την αυξανόμενη συχνότητα «επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης», δηλαδή υπερβάσεων των θεσμοθετημένων ορίων ποιότητας της ατμόσφαιρας, γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης των επιπέδων των ρύπων. Με τον τρόπο αυτό, θα καταστεί δυνατή η λήψη μέτρων αποφυγής των επεισοδίων καθώς και η πληροφόρηση του κοινού ώστε να μειωθεί η έκθεσή του στα αυξημένα αυτά επίπεδα. Μέχρι πρόσφατα, στις περισσότερες Ευρωπαϊκές πόλεις η πρόγνωση αυτή ήταν εμπειρική, αλλά το τελευταίο διάστημα η χρήση υπολογιστικών εργαλείων, κυρίως στατιστικών αλλά και προγνωστικών μοντέλων, επεκτείνεται όλο και περισσότερο καθώς δίνει πληρέστερες και πιο αξιόπιστες προγνώσεις.

Ένα άλλο σημαντικό πεδίο εφαρμογής μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας είναι η διαχείριση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος: Δεδομένου ότι συχνά πρέπει να προβλεφθεί το αποτέλεσμα των μέτρων αντιρρύπανσης, τα μοντέλα είναι στην περίπτωση αυτή προφανώς το πιο κατάλληλο εργαλείο. Σε αυτό το πλαίσιο, μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε συνδυασμό με μοντέλα για άλλους τομείς (π.χ. έδαφος, νερό αλλά και εκπομπές ρύπων), οδηγώντας στις λεγόμενες συνολικές προσεγγίσεις.

Ο ρόλος των μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας όσον αφορά στην πληροφόρηση των πολιτών αναμένεται να αυξηθεί. Ο κυριότερος στόχος είναι να προσφέρεται συνεχής πληροφόρηση στο κοινό για την ποιότητα του αέρα και για πιθανά επεισόδια νέφους.

Για τέτοιες εφαρμογές απαιτούνται γρήγορα μοντέλα πρόγνωσης της ποιότητας του αέρα.

Μέχρι πρόσφατα, τα λεγόμενα *ερευνητικού τύπου μοντέλα* θεωρούνταν ως ακατάλληλα για πρακτικές εφαρμογές εξαιτίας των υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεών τους. Χάρη στην αλματώδη ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων, η κατάσταση εξελίσσεται ταχύτατα. Έτσι, τα μοντέλα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σήμερα για την εκτίμηση σφαλμάτων των απλουστερών μοντέλων, αποτελώντας παράλληλα τη βάση για μια αποτελεσματική υποστήριξη της περιβαλλοντικής πολιτικής στο απώτερο μέλλον.

Για τη σωστή επιλογή καταλλήλου μοντέλου για οποιαδήποτε από τις παραπάνω εφαρμογές πρέπει να προηγηθεί ανάλυση των αναγκών του χρήστη. Κατά την ανάλυση αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη το είδος της εφαρμογής, τα χαρακτηριστικά των πηγών ρύπανσης, ποιός είναι ο ρύπος που πρώτιστα ενδιαφέρει, ποιά θα είναι η διάρκεια της προσομοίωσης καθώς και ποιές θα είναι οι διεργασίες που θα πρέπει να συνεκτιμηθούν (για παράδειγμα η ανομοιογενής ή όχι τοπογραφία, η πολυπλοκότητα της μετεωρολογίας κλπ). Θα πρέπει επίσης να έχει προδιαγραφεί το παραδοτέο ως προς τη μορφή, πώς δηλαδή θα δίδονται οι τιμές της συγκέντρωσης ή της εναπόθεσης των ρύπων (π.χ. επιλεγμένοι μέσοι όροι, εκατοστημόρια κλπ) καθώς και η επιθυμητή ακρίβεια του αποτελέσματος. Βασικός παράγοντας για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου είναι επίσης τα διαθέσιμα μέσα, όπως το προσωπικό, η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς και ο προϋπολογισμός.

Σημαντική βοήθεια για υποψήφιους χρήστες κατά τη διαδικασία επιλογής του μοντέλου ποιότητας ατμόσφαιρας που προσφέρεται για την εφαρμογή τους αποτελεί το Κέντρο Τεκμηρίωσης Μοντέλων Ποιότητας Αέρα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (ΕΟΠ). Έχοντας σχεδιασθεί και υλοποιηθεί από το Θεματικό Κέντρο Ποιότητας Αέρα του ΕΟΠ, το Κέντρο είναι προσπελάσιμο μέσω του Internet (<http://aix.meng.auth.gr/lhtee/database.html>).

3 Διαθέσιμα μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας

Τα μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας μπορούν να ταξινομηθούν με βάση διάφορα κριτήρια, όπως για παράδειγμα:

- τη χωρική κλίμακα (τοπική, τοπική έως περιφερειακή, περιφερειακή έως ηπειρωτική, παγκόσμια),
- τη χρονική κλίμακα (μοντέλα επεισοδίων, στατιστικά μοντέλα για μακροχρόνιες περιόδους),
- τον χειρισμό των εξισώσεων μεταφοράς (Ουλεριανά και Λαγκρανζιανά μοντέλα),
- τη μεταχείριση διαφόρων διεργασιών (χημικός μετασχηματισμός, υγρή και ξηρή εναπόθεση) και
- την πολυπλοκότητα της προσέγγισης (Γκαουσιανός τύπος, ημιεμπειρικά, μοντέλα, μοντέλα καννάβου).

Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για την εφαρμογή μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας κατά κανόνα παρέχονται από κατάλληλα μετεωρολογικά μοντέλα. Τα τελευταία συνήθως κατατάσσονται με μέτρο τη χωρική τους κλίμακα (L).

Είναι γενικά αποδεκτή η εξής κατάταξη: (i) *μακροκλίμακα* ($L > 1000$ km), (ii) *μικροκλίμακα* ($L < 1$ km) και (iii) *μεσοκλίμακα* ($1 \text{ km} \leq L \leq 1000$ km).

Στη συνέχεια εξετάζεται η σημερινή κατάσταση μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας για αστικές περιοχές τα οποία εντάσσονται στις κλίμακες «τοπική» και «τοπική έως περιφερειακή».

3.1 Τοπική κλίμακα

Για σχεδόν 40 χρόνια η προσομοίωση της διασποράς στην ατμόσφαιρα για τις ανάγκες μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων βασίστηκε στα ημιεμπειρικά μοντέλα (δείκτες ατμοσφαιρικής ρύπανσης, απλά μοντέλα επιφανειακών πηγών, μοντέλα κυψελίδας, απλά φωτοχημικά μοντέλα) καθώς και στα *μοντέλα Γκαουσιανού τύπου* και στην ταξινόμηση της ευστάθειας της ατμόσφαιρας κατά Pasquill-Gifford. Η καταλληλότητα χρήσης τέτοιου είδους μοντέλων ωστόσο περιορίζεται πολύ από γεγονός ότι, για να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα, τα μοντέλα αυτά προϋποθέτουν ομοιογενείς συνθήκες τοπογραφίας και μετεωρολογίας, γεγονός που δεν ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις.

Η συνεχώς αυξανόμενη κατανόηση της δομής του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος οδήγησε τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη νέας γενιάς μοντέλων διασποράς, τα οποία βασίζονται στην παραμετροποίηση του οριακού στρώματος. Σε αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται νέες μεθοδολογίες για τον καθορισμό των μετεωρολογικών δεδομένων εισόδου. Οι κατακόρυφες κατατομές της ταχύτητας, θερμοκρασίας και τύρβης θεωρείται ότι εξαρτώνται από το ύψος του οριακού στρώματος και από το μήκος Monin-Obukhov που καθορίζεται από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα τριβής και τη ροή θερμότητας.

Τα στοχαστικά μοντέλα ξεκινούν από εντελώς διαφορετική βάση. Δεν αποτελούν προσομοιώσεις μετεωρολογικών φαινομένων ή φαινομένων διασποράς, αλλά κάνουν ανάλυση κατανομής συχνοτήτων εμφάνισης συγκεκριμένων μετεωρολογικών χαρακτηριστικών ή παραμέτρων ποιότητας ατμόσφαιρας. Ως στοιχεία εισόδου απαιτούν χρονοσειρές πειραματικών μετρήσεων των παραπάνω παραμέτρων. Το αποτέλεσμά τους είναι στατιστικά στοιχεία ως προς τις συγκεντρώσεις και τις ενδεχόμενες υπερβάσεις των ορίων ποιότητας ατμόσφαιρας.

3.2 Τοπική έως περιφερειακή κλίμακα

Η αστική ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ίσως το πιο σημαντικό παράδειγμα αντικειμένου μελέτης φαινομένων διασποράς στην τοπική έως περιφερειακή κλίμακα η οποία, σε γενικές γραμμές, αντιστοιχεί στην μεσοκλίμακα. Μέχρι τώρα η αντιμετώπιση των *προβλημάτων αστικής κλίμακας* με μοντέλα μεσοκλίμακας προσέκρουε σε δυσκολίες, γιατί είτε έπρεπε να εξετασθεί μια αρκετά μεγάλη περιοχή, είτε έπρεπε να προσδιορισθούν ακριβείς οριακές συνθήκες. Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω δυσκολίες απαιτείται η εφαρμογή «τηλεσκοπικού» μοντέλου, είδους που μόνο πρόσφατα έχει γίνει διαθέσιμο.

Τα μοντέλα μεσοκλίμακας απαιτούν ως δεδομένα εισόδου σημαντικές μετεωρολογικές πληροφορίες. Τα τελευταία χρόνια ακολουθήθηκαν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις:

Διαγνωστικοί υπολογισμοί πεδίων ανέμου, σε συνάρτηση με μια εμπειρική παραμετροποίηση των τυρβωδών μεγεθών, και *προγνωστικοί* υπολογισμοί. Η πρώτη προσέγγιση, η οποία κυρίως υιοθετείται στις ΗΠΑ, προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα πολύ λεπτομερών δεδομένων από παρατηρήσεις που να επιτρέπουν μια ακριβή αναπαράσταση του πεδίου ανέμου. Αυτό κάτω από κανονικές συνθήκες είναι πρακτικά αδύνατο. Επομένως, η τελευταία προσέγγιση, δηλ. η προγνωστική προσομοίωση των πεδίων ανέμου και των τυρβωδών μεγεθών στην περιοχή ενδιαφέροντος, είναι σήμερα ευρέως αποδεκτή ως η προσφορότερη.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, ένα μοντέλο μεσοκλίμακας συνήθως αντιπροσωπεύει ένα σύστημα που αποτελείται από ένα μοντέλο ανέμου (διαγνωστικό ή προγνωστικό) και από ένα μοντέλο διασποράς. Για την περίπτωση των αδρανών ρύπων χρησιμοποιούνται είτε Ουλεριανοί είτε Λαγκρανζιανοί τύποι μοντέλων. Ένα Ουλεριανό μοντέλο διασποράς εύκολα ενσωματώνεται σε ένα προγνωστικό μοντέλο ανέμου. Ο συνδυασμός αυτός συχνά καλείται *προγνωστικό μοντέλο μεσοκλίμακας*. Τα Ουλεριανά μοντέλα διασποράς κυριαρχούν στην περίπτωση των χημικών ρύπων, για παράδειγμα του όζοντος και των προδρομών του. Συνήθης πρακτική είναι εδώ η εφαρμογή αρχικά του μοντέλου ανέμου και μετά του φωτοχημικού μοντέλου διασποράς.

Ως ελάχιστη απαίτηση για μια ρεαλιστική προσομοίωση μεταφοράς της αέριας ρύπανσης σε τοπική έως περιφερειακή κλίμακα, το προγνωστικό μοντέλο μεσοκλίμακας θα πρέπει να περιλαμβάνει μια ικανοποιητική παραμετροποίηση σε ό,τι αφορά το *ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα*. Η δυναμική του τελευταίου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της τύρβης, τα οποία μεταβάλλονται με το ύψος και το χρόνο. Στα φωτοχημικά μοντέλα διασποράς είναι σημαντική η σωστή παραμετροποίηση της κινητικής του συστήματος χημικών αντιδράσεων με τη βοήθεια κατάλληλων μηχανισμών, η εγκυρότητα των οποίων πρέπει να επιβεβαιώνεται με εργαστηριακές μετρήσεις.

Βασικός στόχος των μοντέλων μεσοκλίμακας είναι να περιγράψουν τον τρόπο με τον οποίο οι μεταβλητές του προβλήματος επηρεάζονται από τις λεγόμενες *επιδράσεις μεσοκλίμακας* (π.χ. εκείνες που συνδέονται με την ορογραφία και την ανομοιογένεια του ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια). Για το σκοπό αυτό, στα προγνωστικά μοντέλα μεσοκλίμακας οι χωρο-χρονικές κατανομές μεγάλης κλίμακας όλων των μεταβλητών θεωρούνται γνωστές, ενώ οι διαταράξεις μεσοκλίμακας απορρέουν από την επίλυση καταλλήλων εξισώσεων διατήρησης.

Τα προγνωστικά μοντέλα μεσοκλίμακας διαφοροποιούνται σε ό,τι αφορά τη μεταχείριση της πίεσης. Εάν η χαρακτηριστική οριζόντια κλίμακα μήκους είναι μεγάλη (π.χ. άνω των 10 km), οι μη υδροστατικές επιδράσεις μπορούν να αγνοηθούν. Στα μοντέλα που υιοθετούν αυτήν την προσέγγιση, τα λεγόμενα *υδροστατικά μοντέλα*, η πίεση προκύπτει απλά από την υδροστατική εξίσωση. Αντιθέτως, στα *μη υδροστατικά μοντέλα* πρέπει να επιλυθεί η ελλειπτική διαφορική εξίσωση για την πίεση. Ευτυχώς, σήμερα είναι διαθέσιμοι ελλειπτικοί επιλυτές μεγάλης ταχύτητας και έτσι οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ των μη υδροστατικών μοντέλων δεν είναι πολύ υψηλότερη από εκείνη των υδροστατικών.

Στα περισσότερα από τα σύγχρονα προγνωστικά μοντέλα μεσοκλίμακας πραγματοποιείται μετασχηματισμός των συντεταγμένων σε εξάρτηση από το υψόμετρο, έτσι ώστε να αποφεύγονται δυσκολίες στην διατύπωση των οριακών συνθηκών στην επιφάνεια.

νεια. Μερικά μοντέλα χρησιμοποιούν συντεταγμένη πίεσης στην κατακόρυφη διεύθυνση. Τα διάφορα μοντέλα μεσοκλίμακας διαφοροποιούνται επίσης και σε ό,τι αφορά τη δομή της υπό μελέτη περιοχής (διάσταση, καθορισμός καννάβου), τις χρησιμοποιούμενες παραμετροποιήσεις, τη μέθοδο καθορισμού αρχικών συνθηκών, τις οριακές συνθήκες καθώς και τις εφαρμοζόμενες αριθμητικές τεχνικές.

4 Έλεγχος ποιότητας των μοντέλων αέριας ρύπανσης

Η ποιότητα ενός μοντέλου αέριας ρύπανσης μπορεί να ελεγχθεί ως συνάρτηση της *συμβατότητας* του μοντέλου (δηλ. του τρόπου με τον οποίο η «πραγματικότητα» αντικατοπτρίζεται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης) και της *ακρίβειάς* του, η οποία μπορεί να εκτιμηθεί στην πορεία μιας διαδικασίας αποτίμησης του μοντέλου. Προφανώς, ο ποιοτικός έλεγχος μοντέλων αέριας ρύπανσης πρέπει να επικεντρωθεί σε εμπειρισταωμένες περιγραφές των ίδιων των μοντέλων (Noordijk, 1992) και στη διαδικασία που χρησιμοποιείται για την αποτίμησή τους.

Προς αποτίμηση ενός μοντέλου αέριας ρύπανσης, οι προβλέψεις του συγκρίνονται με μετρήσεις και οι υπολογιζόμενες αποκλίσεις αναλύονται στατιστικά επιτρέποντας ποσοτική εκτίμηση του σφάλματος του μοντέλου. Παρά την απλότητα αυτής της μεθόδου, υπάρχουν σημαντικές δυσκολίες στο σωστό καθορισμό της διαδικασίας αποτίμησης και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων:

- Για τις διάφορες κατηγορίες μοντέλων πρέπει να χρησιμοποιούνται διαφορετικές διαδικασίες αποτίμησης. Με άλλα λόγια, τα πειραματικά δεδομένα που απαιτούνται για την αποτίμηση των μοντέλων καθώς και η μεθοδολογία αποτίμησης πρέπει να ταιριάζουν με την συγκεκριμένη εφαρμογή.
- Αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των παρατηρήσεων μπορούν να προκληθούν από πολλές αιτίες όπως ατέλειες στις προσεγγίσεις και τις παραμετροποιήσεις του μοντέλου, λάθη και ανακρίβειες στα δεδομένα εισόδου (ιδιαίτερα στα δεδομένα εκπομπών και μετεωρολογίας), ανακρίβειες που σχετίζονται με την στοχαστική φύση των ατμοσφαιρικών διεργασιών, σφάλματα στις παρατηρήσεις, έλλειψη αντιπροσωπευτικότητας των παρατηρουμένων δεδομένων κλπ.

4.1 Τοπική κλίμακα

Πολύτιμη εμπειρία σε ό,τι αφορά την αποτίμηση μοντέλων υπάρχει ήδη στην περίπτωση των σχετικά απλών μοντέλων: Σειρά συνεδρίων έχει οργανωθεί από την Επιτροπή για την «Εναρμόνιση των Ατμοσφαιρικών Μοντέλων Διασποράς για Ρυθμιστικούς Σκοπούς» με σειρά αντικειμένων, ένα από τα οποία ήταν ο έλεγχος των διαδικασιών αποτίμησης των μικρής εμβέλειας ατμοσφαιρικών μοντέλων διασποράς (Olesen και Mikkelsen, 1992). Με αυτό τον τρόπο έχει συντελεσθεί πρόοδος σε ό,τι αφορά τα μοντέλα διασποράς αδρανών ρύπων που υποθέτουν ομοιογένεια στην επιφάνεια του εδάφους. Από μία πρώτη σύγκριση μοντέλων προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με:

- την αναγνώριση δυνατοτήτων και αδυναμιών των μοντέλων,
- την διαλεύκανση των προβλημάτων με διαδικασίες αποτίμησης μοντέλων και

- την αναγνώριση της απαίτησης για διαρκή αποτίμηση των μοντέλων.

4.2 Τοπική έως περιφερειακή κλίμακα

Μόνο προκαταρκτικές ενέργειες έχουν λάβει χώρα για την αποτίμηση μοντέλων τοπικής έως περιφερειακής κλίμακας. Ο κύριος λόγος γι' αυτό είναι ότι τα μέχρι τώρα προγράμματα μετρήσεων πεδίου για τη συγκεκριμένη κλίμακα επικεντρώνονταν κυρίως στην μετεωρολογία, με πρωταρχικό σκοπό να περιγραφούν τα κατά περίπτωση φαινόμενα μεταφοράς στην ατμόσφαιρα. Περισσότερο σαν άσκηση επίδειξης παρά σαν σε βάθος αποτίμηση, το πρόγραμμα APSIS σχεδιάστηκε για τον έλεγχο του κατά πόσο σύγχρονα μοντέλα είναι σε θέση να περιγράψουν τη ροή του ανέμου και τον σχηματισμό όζοντος σε αστική περιοχή (Moussiopoulos, 1993). Τα κύρια συμπεράσματα του APSIS συνοψίζονται ως εξής:

- Τα σύγχρονα προγνωστικά μοντέλα μεσοκλίμακας είναι ικανά να αναπαραγάγουν τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του πεδίου ανέμου τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τις συγκεντρώσεις των αερίων ρύπων σε βεβαρημένες αστικές περιοχές με έντονα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά.
- Τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα δεν είναι επαρκή για την τελική αποτίμηση των φωτοχημικών μοντέλων διασποράς. Συνεπώς, χρειάζονται λεπτομερή προγράμματα μετρήσεων προκειμένου να δημιουργηθούν πλήρεις βάσεις πειραματικών δεδομένων για μια εμπειριστατωμένη αποτίμηση των σημερινών και μελλοντικών μοντέλων αέριας ρύπανσης σε τοπική και περιφερειακή κλίμακα.

5 Τάσεις ανάπτυξης των μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας

5.1 Τοπική κλίμακα

Προγενέστερες προσπάθειες αποτίμησης των μοντέλων σ' αυτή την κλίμακα έδειξαν ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα των διαφόρων μοντέλων. Ως προϋπόθεση της περαιτέρω ανάπτυξης των μοντέλων τοπικής κλίμακας, τα επόμενα χρόνια είναι σκόπιμο να εκτιμηθεί το κατά πόσο οι διαφορές αυτές μπορούν να αναχθούν στις διάφορες απλοποιήσεις των μοντέλων (π.χ. στη χρήση των σχημάτων ταξινόμησης της ευστάθειας της ατμόσφαιρας και στις σχετιζόμενες παραμέτρους διασποράς, στην διακριτοποίηση των μετεωρολογικών δεδομένων).

Επιπλέον, η ανάπτυξη των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθιστά δυνατή την ανάπτυξη νέων, λειτουργικότερων και πρακτικότερων μοντέλων τοπικής κλίμακας, τα οποία κατά πάσα πιθανότητα θα εμπεριέχουν και μια καλύτερη περιγραφή της φυσικής της ατμόσφαιρας.

5.2 Τοπική έως περιφερειακή κλίμακα

Με δεδομένη τη σημασία του να λαμβάνονται υπόψη διεργασίες μεγαλύτερης κλίμακας στα λεγόμενα «τηλεσκοπικά» μοντέλα και χάρη στην έντονη διεθνή δραστηριότητα με στόχο τη συνεχή βελτίωση των τελευταίων, αναμένεται σημαντική βελτίωση στον το-

μέα των αριθμητικών προσομοιώσεων που εκτείνονται σε παραπάνω από μία κλίμακες. Αντίστοιχα εξελίσσεται και η έρευνα σχετικά με τις μεθόδους σύνδεσης των προγνωστικών μοντέλων μεσοκλίμακας με τα τρισδιάστατα μοντέλα μικροκλίμακας.

Από τη σκοπιά της παραμετροποίησης των φυσικών διεργασιών, η περαιτέρω ανάπτυξη των μοντέλων επικεντρώνεται στη βελτίωση της περιγραφής της τυρβώδους μεταφοράς. Τέλος, υπάρχει προφανής τάση για πιο ρεαλιστική περιγραφή των χημικών μετασχηματισμών στα μοντέλα μεσοκλίμακας, ειδικότερα όσον αφορά στην αλληλεξάρτηση ομοιογενών και ετερογενών χημικών διεργασιών.

6 Συμπεράσματα

Τα μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας είναι σημαντικά εργαλεία για την εκτίμηση της ποιότητας του αέρα και τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών αντιρρύπανσης. Υπάρχει μια τάση ενίσχυσης του ρόλου των μοντέλων αυτών στην διαδικασία λήψης αποφάσεων. Στην πράξη μοντέλα είναι ήδη διαθέσιμα για τα περισσότερα πεδία εφαρμογής, ενώ συγχρόνως η τεκμηρίωσή τους θεωρείται ικανοποιητική. Όμως, μέχρι τώρα οι περισσότεροι διαχειριστές περιβάλλοντος δεν είναι καλά πληροφορημένοι για τις δυνατότητες των υπαρχόντων μοντέλων. Επιπρόσθετα, η ακρίβεια των μοντέλων δεν φαίνεται να είναι θέμα που τους απασχολεί ιδιαίτερα, ούτε καν στις χώρες όπου τα μοντέλα χρησιμοποιούνται εκτενώς για ελεγκτικούς σκοπούς.

Οι μελλοντικές εκδόσεις των μοντέλων πρέπει να είναι συμβατές με τις απαιτήσεις των χρηστών. Πρέπει να εγκαθιδρυθεί συνεχής επικοινωνία και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των διαχειριστών περιβάλλοντος και των ερευνητών που αναπτύσσουν μοντέλα. Ανάμεσα στα κυριότερα αντικείμενα μια τέτοιας επικοινωνίας πρέπει να είναι ο προσδιορισμός συγκεκριμένων δραστηριοτήτων που θα στοχεύουν στην μελλοντική βελτίωση της τεκμηρίωσης των μοντέλων και στην καλύτερη εκτίμηση της ακρίβειάς τους. Μόνο με αυτές τις δραστηριότητες θα καταστεί δυνατό να βελτιωθεί το επίπεδο αποτίμησης των μοντέλων, που δείχνει να μην είναι προς το παρόν ικανοποιητικό.

Η τάση για ακριβέστερα μοντέλα αέριας ρύπανσης οδήγησε στην ανάγκη να εγκαταλειφθεί ο συμβατικός αυστηρός διαχωρισμός των ατμοσφαιρικών διεργασιών σε ξεχωριστές κλίμακες. Η προσέγγιση πολλαπλών κλιμάκων θα είναι αναπόφευκτη στο μέλλον και η τεχνική «τηλεσκοπικών» μοντέλων είναι απαραίτητη έτσι ώστε μοντέλα που αναπτύχθηκαν για ξεχωριστές κλίμακες να μπορούν να συνδυασθούν για την περιγραφή διαδικασιών που εκτείνονται σε περισσότερες κλίμακες.

Με δεδομένο ότι η αποτίμηση μοντέλων δε μπορεί να γίνει παρά μόνο με βάση πειραματικά δεδομένα αυξημένης ακρίβειας, απαιτείται η δημιουργία κατάλληλων βάσεων δεδομένων στοιχείων ρύπανσης σε περιοχές με έντονα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, που θα προέρχονται από υψηλής ποιότητας μετρήσεις πεδίου σε κατάλληλες θέσεις.