**Parameterization Schemes**

**Μάθημα : Ατμοσφαιρικές Προσομοιώσεις**

**Εαρινό εξάμηνο 2024-2025**

**Καϊρακτίδη Νάντια**

**ΑΜ : 1068622**

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι μέθοδοι παραμετροποίησης στη μοντελοποίηση της ατμόσφαιρας, με έμφαση στη σημασία τους για την πρόβλεψη και κατανόηση των μετεωρολογικών και κλιματικών διεργασιών σε υποπλεγματική (subgrid) κλίμακα.

Κατά τη δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης της ατμόσφαιρας, είναι σημαντική η παραμετροποίηση ορισμένων παραγόντων που επηρεάζουν διεργασίες που συμβαίνουν σε υποπλεγματική κλίμακα, καθώς οι διεργασίες αυτές επηρεάζουν την ακρίβεια των αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού και κλίματος. Το πρόβλημα της παραμετροποίησης περιλαμβάνει την αλγοριθμική ή στατιστική συσχέτιση των αποτελεσμάτων των φυσικών διεργασιών οι οποίες δεν δύνανται να αναπαρασταθούν άμεσα σε ένα μοντέλο, με μεταβλητές οι οποίες μπορούν να συμπεριληφθούν στο μοντέλο. Μερικοί από τους λόγους για τους οποίους είναι απαραίτητη η παραμετροποίηση των φυσικών διεργασιών είναι το γεγονός ότι οι μικρές κλίμακες που εμπλέκονται καθώς και η περιπλοκότητα αυτών καθιστούν υπολογιστικά πολύ δαπανηρή την αναπαράστασή τους και επιπρόσθετα δεν υπάρχουν επαρκείς γνώσεις για ορισμένες διεργασίες έτσι ώστε αυτές να αναπαρασταθούν ρητά με μαθηματικό τρόπο.

Η διακριτοποίηση της συνεχούς εξίσωσης που περιγράφει την ατμόσφαιρα περιορίζεται από την ακρίβεια του εκάστου μοντέλου δηλαδή από το μέγεθος της μικρότερης επιλύσιμης κλίμακας. Σε ένα σχήμα πεπερασμένων διαφορών, οι μικρότερες κλίμακες της κίνησης που μπορούν να επιλυθούν, είναι εκείνες που έχουν μήκος κύματος ίσο με 2 μεγέθη του πλέγματος (grid). Επομένως, οι διαδικασίες μικρής κλίμακας δεν επιλύονται από μοντέλα μεγάλης κλίμακας καθώς είναι υποπλεγματικές. Αυτές οι διεργασίες εξαρτώνται και επηρεάζουν τις διεργασίες εκείνες που επιλύονται αποκλειστικά από αριθμητικά μοντέλα. Η επίδραση των υποπλεγματικών διεργασιών σε μεγάλη κλίμακα μπορεί να αναπαρασταθεί μόνο στατιστικά. Η διαδικασία της έκφρασης της επίδρασης των υποπλεγματικών διεργασιών ονομάζεται παραμετροποίηση.

Παρόλο που οι φυσικές διαδικασίες είναι παραμετροποιημένες σε μεγάλο βαθμό, η σωστή απόδοσή τους από ένα μοντέλο είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη σχεδόν όλων των εξαρτημένων μεταβλητών. Οι διεργασίες μικρής κλίμακας που παραμετροποιούνται είναι οι εξής 5 :

* Οριακό στρώμα : Συνεισφέρει στην θερμοκρασία και την υγρασία λόγω της έντονης ανάμιξης που συμβαίνει στο στρώμα αυτό. Συνδέεται με τον υπολογισμό της επιφανειακής ροής.
* Επιφάνεια εδάφους : Υπολογίζει το ισοζύγιο ενέργειας, την αισθητή θερμοκρασία και την εξατμισοδιαπνοή.
* Μικροφυσική των νεφών και του υετού : Συνεισφέρει στην θερμοκρασία και την υγρασία λόγω της βροχόπτωσης στην κλίμακα του πλέγματος (ολόκληρη η κυψελίδα είναι κορεσμένη)
* Cumulus convection: Συμβάλλει στη θερμοκρασία και την υγρασία σε κλίμακα πλέγματος λόγω της μεταφοράς νεφών cumulus σε subgrid κλίμακα (η κυψελίδα δεν είναι ολόκληρη κορεσμένη)
* Ακτινοβολία : Μόρια, σωματίδια και σταγονίδια στα νέφη επηρεάζουν την ατμόσφαιρα μέσω των διεργασιών απορρόφησης, σκέδασης και επανεκπομπής της ακτινοβολίας.

Οι διεργασίες αυτές δεν είναι ανεξάρτητες αλλά αλληλεπιδρούν η μία με την άλλη και συνεπώς η ρεαλιστική αναπαράσταση αυτής της αλληλεπίδρασης καθορίζει την ακρίβεια του μοντέλου. Η απόδοση ορισμένων παραμετροποιήσεων επίσης, μπορεί να εξαρτάται από την εποχή και τις μετεωρολογικές διεργασίες που επικρατούν σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές. Για παράδειγμα, η παραμετροποίηση του cumulus convection που θα μελετήσουμε στην συνέχεια, είναι περισσότερο εφαρμόσιμη στα μέσα πλάτη. Επιπρόσθετα, η ίδια παραμετροποίηση ορισμένες φορές τροποποιείται έτσι ώστε να ικανοποιεί ορισμένες ανάγκες. Ένα προφανές σχετικό ζήτημα είναι ότι τα παγκόσμια μοντέλα πρέπει να χρησιμοποιούν τις ίδιες παραμετροποιήσεις για όλες τις γεωγραφικές περιοχές, αποκλείοντας έτσι την επιλογή αυτών που ταιριάζουν καλύτερα σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Στην διπλανή φωτογραφία απεικονίζεται ένα σχεδιάγραμμα που παρουσιάζει το πως οι παραμετροποιήσεις εντάσσονται στα ατμοσφαιρικά μοντέλα. Με τον όρο resolved processes αναφερόμαστε στις διαδικασίες κλίμακας πλαισίου εκείνες που δεν χρειάζεται να παραμετροποιηθούν. Τα κύρια inputs για την παραμετροποίηση οποιουδήποτε τύπου είναι οι δομές της ατμόσφαιρας που ελέγχουν την διαδικασία η οποία παραμετροποιείται. Έτσι, μία παραμετροποίηση μπορεί να συσχετίζει τις μεταβλητές εισόδου επιλυμένης κλίμακας με τα αποτελέσματα (∂ΦP/∂t) της παραμετροποιημένης διαδικασίας. Οι διεργασίες που αναπαρίστανται με αλγοριθμικό τρόπο μπορεί να είναι ένας απλός πίνακας αναζήτησης ή μπορεί να είναι τόσο υπολογιστικά δύσκολες ώστε να μην είναι δυνατό να υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα.

A diagram of a algorithm

AI-generated content may be incorrect.

Schematic showing how a predictive equation for a dependent variable has contributions from terms that correspond to resolved processes (subscript R) and parameterized processes (subscript P). The inputs to the parameterizations are the resolved-scale atmospheric variables.

Οι παρακάτω εξισώσεις, μας δείχνουν το πώς οι επιδράσεις των παραμετροποιημένων διαδικασιών περιλαμβάνονται στις προγνωστικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις κίνησης περιλαμβάνουν όρους τριβής που αντιστοιχούν σε ιξώδεις και τυρβώδεις τάσεις. Η αριθμητική μορφή των υπολοίπων εξισώσεων, αποτελεί μέρος του δυναμικού πυρήνα του μοντέλου.

**A math equations on a white background

AI-generated content may be incorrect.**

Οι παραμετροποιήσεις επίσης, αναπτύσσονται λαμβάνοντας υπόψιν ορισμένες προσαυξήσεις πλέγματος (grid increments), δηλαδή λαμβάνοντας υπόψιν τις πτυχές εκείνες του φυσικού συστήματος οι οποίες δεν επιλύονται από το μοντέλο αλλά χρειάζεται να παραμετροποιηθούν. Κατά την ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων, πρέπει να γνωρίζουμε αυτές τις παραδοχές έτσι ώστε να αποφασίσουμε ποιες παραμετροποιήσεις θα αξιοποιήσουμε για έναν ορισμένο σκοπό. Όσο οι προσαυξήσεις του πλέγματος μικραίνουν, τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη υπολογιστική δύναμη και τα μοντέλα αρχίζουν να επιλύουν ορισμένες παραμετροποιημένες διαδικασίες, κάτι που δεν είναι θεμιτό καθώς διατρέχουμε τον κίνδυνο να λάβουμε υπόψιν κάποια διαδικασία δύο φορές. Συνεπώς, υπάρχει μια περιοχή προσαυξήσεων πλέγματος για την οποία μια διεργασία δεν έχει επιλυθεί επαρκώς για να αναπαρασταθεί ρητά, αλλά δεν υπάρχει επαρκής διαχωρισμός μεταξύ επιλυμένης και παραμετροποιημένης κλίμακας έτσι ώστε οι παραμετροποιήσεις να είναι έγκυρες.

Diagram of a diagram showing different types of waves

AI-generated content may be incorrect.

**Convective Parameterization CP (subgrid scale)**

Στην συνέχεια, στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε στο κομμάτι των παραμετροποίησεων που αφορά την μεταφορά. Η μεταφορά λαμβάνει χώρα σε χωρικές και χρονικές κλίμακες που δεν μπορούν να λυθούν άμεσα από τα αριθμητικά μοντέλα λόγω περιορισμένης ανάλυσης και υπολογιστικών πόρων. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η χρήση παραμετροποιήσεων που αναπαριστούν στατιστικά ή εμπειρικά τις επιδράσεις της. Η μεταφορά επηρεάζει τις διεργασίες μεγαλύτερης κλίμακας με τους εξής τρόπους :

* Ανακατανομή θερμότητας, υγρασίας, ορμής
* Αποτροπή μη ρεαλιστικών ασταθειών και σταθεροποίηση της ατμόσφαιρας
* Δημιουργία βροχόπτωσης σε ακόρεστα πλέγματα του μοντέλου
* Δημιουργία σημαντικών μετεωρολογικών χαρακτηριστικών

Τα μοντέλα αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού (NWP) και της κλιματικής προσομοίωσης δεν μπορούν να επιλύσουν ρητά τη μεταφορά όταν η ανάλυση του πλέγματος υπερβαίνει τα 10-20 km. Η παραμετροποίηση συνεπώς προσπαθεί να εκτιμήσει την καθαρή επίδραση της μεταφοράς μάζας, θερμότητας και υγρασίας σε κάθε βήμα πρόγνωσης. Το σχήμα CP δημιουργεί βροχοπτώσεις λόγω συστημάτων υετού που είναι ανεπίλυτα στο πλέγμα. Το σχήμα αυτό συνήθως δεν προβλέπει το πεδίο των νεφών αλλά αφαιρεί τους υδρατμούς από το πλέγμα και εναποθέτει τον υετό που συμβαίνει ενώ το πλέγμα δεν είναι πλήρως κορεσμένο. Για πλέγματα μικρότερα των 4-5 km δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση του σχήματος CP, όπως φαίνεται και από τις παρακάτω εικόνες.

A diagram of a storm

AI-generated content may be incorrect.

A diagram of a diagram

AI-generated content may be incorrect.

A diagram of a cell

AI-generated content may be incorrect.

A diagram of a cell

AI-generated content may be incorrect.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους η υγρή μεταφορά (= μεταφορά που οδηγεί σε σχηματισμό νεφών και, ενδεχομένως, βροχοπτώσεων) πρέπει να προσομοιώνεται με ακρίβεια. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι η έντονη υγρή μεταφορά μπορεί να οδηγήσει σε πλημμύρες, μέτωπα ριπών, και ανεμοστρόβιλους. Επιπρόσθετα, η συνολική επίδραση των μεμονωμένων στοιχείων μεταφοράς είναι σημαντικό συστατικό των κυκλοφοριών των μουσώνων, των κυκλοφοριών Hadley και Walker και του ENSO. Αυτές οι διαδικασίες μεγάλης κλίμακας πρέπει να προσομοιώνονται σωστά στις κλιματικές προβλέψεις και στις προβλέψεις καιρού μεγάλης εμβέλειας.

Οι παραμετροποιήσεις μεταφοράς, ενεργοποιούν την υγρή μεταφορά σε σχετικές υγρασίες μικρότερες από το σημείο κορεσμού των υδρατμών σε ένα πλεγματικό σημείο. Αυτό συμβαίνει καθώς οι στήλες μεταφοράς είναι σε υποπλεγματική κλίμακα οπότε η μέση σχετική υγρασία του πλέγματος θα είναι μικρότερη από το σημείο κορεσμού παρότι μέσα στο πλέγμα υπάρχουν και κορεσμένες περιοχές. Επιπρόσθετα, τα μοντέλα καθορίζουν επίσης τις επιδράσεις της μεταφοράς σε υποπλεγματική κλίμακα σε άλλες μεταβλητές κλίμακας πλέγματος. Ο γενικός στόχος είναι ο καθορισμός της μεταφοράς στο σωστό μέρος και στην σωστή χρονική στιγμή με σωστή εξέλιξη και ένταση. Η παραμετροποίηση θα πρέπει να καθορίζει την κατάλληλη τροποποίηση από τη μεταφορά στο περιβάλλον μεγάλης κλίμακας, έτσι ώστε η επακόλουθη μεταφορά να μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια. Σε γενικές γραμμές, οι διαδικασίες μεγάλης κλίμακας ελέγχουν την υγρή μεταφορά η οποία με την σειρά της μεταβάλει την μεγάλη αυτή κλίμακα πιθανώς με την συσσωμάτωση της λανθάνουσας θερμότητας από τα κύτταρα μεταφοράς, διατηρώντας έτσι την κυκλοφορία μεγαλύτερης κλίμακας. Σκοπός της παραμετροποίησης είναι η προσομοίωση της διαδικασίας αυτής.

Η υγρή μεταφορά στην ατμόσφαιρα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στους εξής 2 τύπους :

* Βαθιά μεταφορά η οποία εκτείνεται κατακόρυφα σ’ ένα μεγάλο μέρος του βάθους της τροπόσφαιρας και συνδέεται με την σύγκλιση χαμηλού επιπέδου που υπάρχει σε κλίμακα μεγαλύτερη από τα επιμέρους ανοδικά ρεύματα και στην βαθιά υπό συνθήκες αστάθεια.
* Ρηχή μεταφορά η οποία εκτείνεται σε μικρό μονάχα μέρος αυτού του βάθους, με κορυφές νεφών σε μερικά χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

Η κατακρήμνιση βαθιάς μεταφοράς στεγνώνει το περιβάλλον αφαιρώντας τους υδρατμούς και το θερμαίνοντας το ως αποτέλεσμα της αντισταθμιστικής καθίζησης. Ωστόσο, η μη κατακρημνιζόμενη ρηχή υγρή μεταφορά δεν έχει άμεση επίδραση στο περιβάλλον. Η επίδρασή της επηρεάζει έμμεσα το περιβάλλον καθώς τα νέφη ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία και η σκίαση αυτή συνεπάγεται πιο ψυχρό οριακό στρώμα.

Τα μοντέλα επίλυσης νεφών, τα οποία είναι ικανά να επιλύουν κυκλοφορίες κλίμακας μεταφοράς, χρησιμοποιούν προσαυξήσεις πλέγματος 1 km και χρησιμοποιούνται συνήθως στην έρευνα. Ωστόσο, επειδή η υγρή μεταφορά αποτελείται από ένα μίγμα ανοδικών και καθοδικών ρευμάτων τα οποία συχνά έχουν κλίμακες από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα, θα χρειαστούν χρόνια έως ότου τα μοντέλα να είναι σε θέση να την επιλύσει. Και θα περάσουν δεκαετίες μέχρι τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα να έχουν επαρκή ανάλυση για την επίλυση της υγρής μεταφοράς. Επομένως, η παραμετροποίηση της μεταφοράς είναι απαραίτητη για το άμεσο μέλλον.

A diagram of a cloud formation

AI-generated content may be incorrect.

*Τύποι παραμετροποίησης της μεταφοράς*

Ένα κοινό χαρακτηριστικό των περισσότερων παραμετροποιήσεων που αφορούν την μεταφορά είναι ότι υπολογίζουν την Convective Available Potential Energy (CAPE) και την Convective INhibition (CIN) του περιβάλλοντος προκειμένου να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει γραφικά τις δύο αυτές μεταβλητές για μία τυπική ραδιοβόλιση θερμής περιόδου σε ένα θερμοδυναμικό διάγραμμα. Κάτω από τα 800 hPa η θερμοβαθμίδα είναι ξηρή αδιαβατική, ανάμεσα στα 800 και 700 hPa είναι ισόθερμη και σχεδόν ξηρή αδιαβατική πάνω από το σημείο αυτό και μέχρι τα500 hPa περίπου. Η έντονη γραμμή, υποδεικνύει την θερμοκρασία ενός πακέτου που ανέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους μέσω του Lifting Condensation Level (LCL) στο Level of Free Convection (LFC).

A graph showing the pressure of a gas station

AI-generated content may be incorrect.

*Example of a warm-season temperature sounding (fine line) with a dry adiabatic layer below 800 hPa, an isothermal layer from 800 to 700 hPa, and another near-dry-adiabatic layer up to about 500 hPa. The heavy solid line defines the temperature of a parcel that is lifted from the surface through the Lifting Condensation Level (LCL) and the Level of Free Convection (LFC), to the Equilibrium Level (EL). The areas are shown that define the Convective Available Potential Energy (CAPE) and the Convective INhibition (CIN). The surface temperature is TSF*

Μεταξύ του LCL και του LFC το πακέτο είναι ψυχρότερο και πιο πυκνό από το περιβάλλον του και συνεπώς τείνει να πέφτει προς τα κάτω αντί να συνεχίζει ανοδικά. Για να συνεχίσει το πακέτο να ανέρχεται, απαιτείται ορισμένη ενέργεια, η οποία είναι ανάλογη του εμβαδού της σκιαγραφημένης με ρίγες περιοχής, η οποία περιγράφεται από την εξής σχέση :

A math equations and formulas

AI-generated content may be incorrect.

όπου θ η δυναμική θερμοκρασία ενός πακέτου που ανέρχεται με την ξηρή ή υγρή αδιαβατική από το σημείο εκκίνησής του (SL) στο LFC, theta bar η δυναμική θερμοκρασία περιβάλλοντος και το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η CIN είναι θετική όταν απαιτείται ενέργεια για να μεταφέρει το πακέτο στο LFC. Αν υπάρχει αρκετή ενέργεια έτσι ώστε το πακέτο να ανέλθει πάνω από το LFC, τότε αυτό θα ανέλθει δυναμικά κατά μήκος της έντονης γραμμής μέχρι να φτάσει στο επίπεδο ισορροπίας (EL) όπου πλέον το πακέτο είναι ουδέτερο. Μία υπόθεση που έχουμε κάνει για την θεωρία αυτή είναι ότι δεν υπάρχει ανάμιξη μεταξύ του πακέτου και του περιβάλλοντος. Η CAPE είναι η διαθέσιμη ενέργεια σε ένα ανερχόμενο πακέτο το οποίο ανέρχεται από το LFC στο επίπεδο ισορροπίας του όπου χάνει την άνωσή του και είναι ανάλογη του εμβαδού της σκιαγραφημένης περιοχής στο γράφημα. Ορίζεται ως εξής :

A math equations and formulas

AI-generated content may be incorrect.

Συνεπώς, για να υπάρξει μεταφορά, πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη CAPE για να προσφέρει ανοδική ενέργεια που θα επιταχύνει το πακέτο προς τα πάνω και επιπρόσθετα θα πρέπει να υπάρχει μηχανισμός έτσι ώστε το πακέτο να υπερνικά την επικρατούσα CIN.

Μερικοί από τους τρόπους κατηγοριοποίησης των σχημάτων παραμετροποίησης της μεταφοράς είναι οι εξής :

* Υπάρχουν γενικές προσεγγίσεις για το πρόβλημα της παραμετροποίησης της μεταφοράς και τα σχήματα (μέθοδοι ή αλγόριθμοι) προσδιορίζονται ανάλογα με το αν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη προσέγγιση. Μερικές φορές επίσης, προσδιορίζονται και ανάλογα με τον πρώτο author που δημοσίευσε την προσέγγιση.
* Μια κατηγοριοποίηση που προτάθηκε από τον Mapes (1997) βασίζεται στο αν η ανάπτυξη της μεταφοράς ελέγχεται από την δημιουργία της CAPE ή την αφαίρεση της CIN. Αυτά τα σχήματα βαθιάς μεταφοράς, τα οποία ονομάζονται και σχήματα ελέγχου της ισορροπίας, συνδέουν την ανάπτυξη της μεταφοράς με την δημιουργία της CAPE μέσω διαδικασιών μεγάλης κλίμακας. Στις μεθόδους αυτές, η μεταφορά θεωρείται ότι διατηρεί την αστάθεια σε ένα περιβάλλον μεγάλης κλίμακας που βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας κοντά στην ουδετερότητα. Εναλλακτικά, σχήματα ελέγχου χαμηλού επιπέδου, τα οποία ονομάζονται επίσης και σχήματα ενεργοποίησης ελέγχου, συσχετίζουν την μεταφορά με την αφαίρεση της CIN. Στην πραγματικότητα, πολλές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν στοιχεία τόσο της βαθιάς μεταφοράς όσο και του ελέγχου χαμηλού επιπέδου.
* Κάποιες παραμετροποιήσεις της μεταφοράς αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα μόνο της βαθιάς, υγρής μεταφοράς, άλλες εφαρμόζονται μόνο στην ρηχή μεταφορά (π.χ. Albrecht et al. 1979, Deng et al. 2003, Bretherton et al. 2004) και τέλος κάποιες εφαρμόζονται και στους δύο τύπους (π.χ. Tiedtke 1989, Gregory and Rowntree 1990, Betts and Miller 1993, and Kain 2004).
* Τα σχήματα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις περιβαλλοντικές μεταβλητές κλίμακας πλέγματος που επηρεάζονται από την μεταφορά. Τα περισσότερα σχήματα καθορίζουν μόνο την επίδραση στην υγρασία και θερμοκρασία του περιβάλλοντος αλλά κάποια αντιμετωπίζουν επίσης και τις επιπτώσεις στην ορμή (π.χ. Fritsch and Chappell 1980, Han and Pan 2006).
* Κάποιες μέθοδοι καθορίζουν άμεσα την τελική κατάσταση του περιβάλλοντος αφού η μεταφορά έχει επιδράσει, ενώ άλλες προσπαθούν να προσομοιώσουν την διαδικασία με την οποία πραγματοποιείται η αλλαγή αυτή λόγω της μεταφοράς. Οι πρώτες, που γενικά είναι πιο απλές, αποκαλούνται στατικά σχήματα, ενώ οι δεύτερες αναφέρονται ως δυναμικά σχήματα.
* Μία διάκριση μεταξύ των μεθόδων αποτελεί η συνάρτηση ενεργοποίησης. Αυτή είναι ένα σύνολο κριτηρίων στην παραμετροποίηση που καθορίζει το που και το πότε η παραμετροποιημένη μεταφορά θα ενεργοποιηθεί.
* Οι κλίμακες που επιλύονται από τα μοντέλα αποτελούν έναν τρόπο ταξινόμησης των σχημάτων αυτών. Υπάρχουν παραμετροποιήσεις μοντέλων μεσοκλίμακας και παραμετροποιήσεις coarse-grid μοντέλων. Η ιδιαίτερη διάκριση είναι ότι τα μοντέλα μεσοκλίμακας (αυξήσεις κλίμακας 5–50 km) έχουν επαρκή οριζόντια ανάλυση για να επιλύσουν ρητά τις κυκλοφορίες μεσοκλίμακας που συσχετίζονται με την μεταφορά (π.χ. καταιγίδες, mesohighs, mesolows κλπ). Συνεπώς, τα μοντέλα μεσοκλίμακας πρέπει να παραμετροποιούν τις διαδικασίες αυτές που είναι ίδιας κλίμακας με την μεταφορά (π.χ. Stensrud and Fritsch 1994, Zheng et al. 1995) ενώ τα coarse-grid μοντέλα πρέπει να παραμετροποιούν τόσο την μεσοκλίμακα όσο και τις διαδικασίες που είναι ίδιας κλίμακας με την μεταφορά καθώς και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις (π.χ. Frank 1983).

*Ζητήματα κλίμακας*

Παραπάνω αναπτύχθηκε η σχέση μεταξύ της ανάλυσης του μοντέλου και της φύσης της παραμετροποίησης της μεταφοράς. Όμως η παραμετροποίηση εξαρτάται και από άλλα θέματα σχετικά με την κλίμακα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι περιοχές κλίμακας που σχετίζονται με την παραμετροποίηση της μεταφοράς .

A diagram of a number of objects

AI-generated content may be incorrect.

*Schematic showing three regimes (I, II, III) of atmospheric circulation, defined in terms of the prevailing physical length scale (abscissa) and the dynamic length scale (ordinate), where the latter is represented by the Rossby radius of deformation. The intervals defined on the ordinate indicate the values of R that are typical at the noted latitudes. Adapted from Frank (1983), and originally from Ooyama (1982).*

Η τετμημένη αποτελεί την φυσική κλίμακα μήκους (L) της διαδικασίας και η τεταγμένη είναι η δυναμική κλίμακα μήκους εκφρασμένη σε όρους της ακτίνας παραμόρφωσης Rossby (R). Η δυναμική κλίμακα μήκους ορίζεται ως εξής :

A black text with black text

AI-generated content may be incorrect.

όπου Ν είναι η συχνότητα Brunt–Väisälä, Η η κλίμακα ύψους της κυκλοφορίας, ζ ο σχετικός στροβιλισμός, f η παράμετρος Coriolis, V η περιστροφική συνιστώσα του ανέμου και r η ακτίνα καμπυλότητας.

Στην περιοχή Ι, με κλίμακες μήκους μικρότερες των 10 km, υπάρχουν μεμονωμένα κύτταρα μεταφοράς και νέφη. Οι περιοχές Ι και ΙΙ αφορούν φαινόμενα τα οποία αναφέρονται ως δυναμικά μικρά όπου L < R και η περιοχή ΙΙΙ αναφέρεται σε δυναμικά μεγάλα φαινόμενα όπου L > R. Στην δημοσίευσή του, ο Frank (1983) ισχυρίζεται ότι το πρόβλημα της παραμετροποίησης είναι απλούστερο για διαδικασίες της περιοχής ΙΙΙ καθώς υπάρχει ισχυρότερη σχέση ανάμεσα στην ροή μεγάλης κλίμακας και στην μεταφορά.

*Σχέση ανάμεσα στην παραμετροποίηση του υποπλεγματικού υετού και του υετού επιλυμένης κλίμακας*

Τα μοντέλασυνήθως αξιοποιούν παραμετροποιήσεις τόσο της μεταφοράς όσο και της μικροφυσικής. Αυτό συνεπάγεται ότι ο υετός μπορεί να παραχθεί από το μοντέλο τόσο όταν ενεργοποιείται η παραμετροποίηση της μεταφοράς όσο και όταν οι διεργασίες που αναπαρίστανται από την μικροφυσική παραμετροποίηση παράγουν επιλυμένης κλίμακας υετό που φτάνει στο έδαφος. Στην πρώτη περίπτωση, ο υετός υποπλέγματος αναπαρίσταται από παραμετροποίηση στην κλίμακα πλέγματος για ένα επιλυμένο μοντέλο και για συνθήκες υποκορεσμένου πλέγματος. Στην δεύτερη περίπτωση, ο κορεσμός του πλέγματος είναι αναγκαίος για κάποιο σημείο στην στήλη. Υπάρχουν δύο μεταβλητές υετού που ορίζονται στο πλέγμα μοντέλου στην επιφάνεια: η μία είναι ο υετός μεταφοράς και η άλλη ο υετός επιλυμένης κλίμακας. Παρόλο που το άθροισμα των μεταβλητών αυτών δίνει το συνολικό πεδίο βροχόπτωσης, συνήθως οι δημιουργοί των μοντέλων εξετάζουν τα δύο πεδία ανεξάρτητα έτσι ώστε να κατανοήσουν καλύτερα τις εσωτερικές διεργασίες του μοντέλου. Αυτή η διπλή αντιμετώπιση των διεργασιών υετού οδηγεί σε εννοιολογικές και πραγματικές δυσκολίες. Για παράδειγμα, η παραμετροποίηση μεταφοράς συχνά δεν παράγει νερό νεφών και πάγο στην κλίμακα πλέγματος, παρόλο που η βροχόπτωση έχει δημιουργηθεί, και έτσι δεν αποδίδονται οι ακτινοβολούσες επιδράσεις των νεφών στο μοντέλο. Και ο υετός που παράγεται σε μία γεωγραφική περιοχή ενός μετεωρολογικού γεγονότος θα παράγεται από την μικροφυσική παραμετροποίηση σε διαφορετική γεωγραφική περιοχή. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα μεταφοράς μεσοκλίμακας, η παράμετρος μικροφυσικής μπορεί να παράγει υετό στην περιοχή στρωματοειδούς υετού ενώ η παραμετροποίηση μεταφοράς να αντιπροσωπεύει τον υετό αλλού. Οι παρακάτω εικόνες απεικονίζουν το πώς ο διαχωρισμός του υετού από τις δύο αυτές πηγές μπορεί να εξαρτάται από το μετεωρολογικό γεγονός και από την παραμετροποίηση μεταφοράς. Και στις 2 εικόνες απεικονίζεται η αναλογία του συνολικού υετού ως προς τον υετό που οφείλεται στην μεταφορά για προσομοιώσεις 36 ωρών που χρησιμοποίησαν τέσσερα διαφορετικά σχήματα παραμετροποίησης μεταφοράς σε ένα μοντέλο που ήταν κατά τ’ άλλα το ίδιο. Η αριστερή εικόνα αναφέρεται σε προσομοιώσεις ενός συστήματος μεταφοράς μεσοκλίμακας που συνέβη την άνοιξη και η δεξιά εικόνα αφορά ένα αρκτικό μέτωπο το χειμώνα, με κάποια μεταφορά μάζας θερμού αέρα. Υπάρχουν σαφώς μεγάλες διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων όσον αφορά την κατανομή του υετού μεταξύ των επιλυμένων συνιστωσών και των συνιστωσών υποπλέγματος. Οι σχέσεις μεταξύ των δύο τμημάτων του μοντέλου που προσομοιώνουν τις διαδικασίες υετού σαφώς δεν είναι απλές, ούτε είναι πάντα εύκολο να προβλεφθεί ποιο μέρος θα κυριαρχήσει για μια συγκεκριμένη περίπτωση. Και συνεπώς δεν είναι λογικό να εξισώνουμε τον υετό επιλυμένης κλίμακας και τoν υετό υποκλίμακας που παράγεται στο μοντέλο με τον στρωματοειδή και μεταφερόμενο υετό της ατμόσφαιρας. Παρά την έλλειψη άμεσης σύνδεσης μεταξύ της μεταφοράς και της επιλυμένης κλίμακας υετού σε ένα μοντέλο, υπάρχουν ορισμένες εξαιρέσεις. Για παράδειγμα, υβριδικά μοντέλα διαχωρίζουν ένα μέρος του παραμετροποιημένου υετού από το σχήμα μεταφοράς στον υετό της κλίμακας πλέγματος που ορίζεται από το σχήμα μικροφυσικής.

A graph of different types of data

AI-generated content may be incorrect.

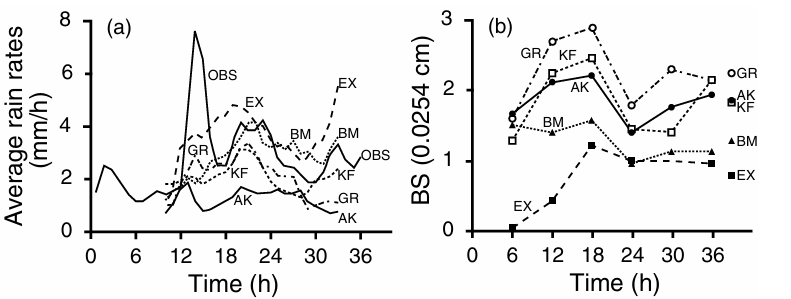
*Ratio (percentage) of subgrid-scale precipitation to total precipitation (sum of subgrid and resolved precipitation) for simulations of two meteorological cases, where four different convective parameterizations were used for each case. The horizontal grid increment was 36 km, and the ratios are based on totals for the computational area. Panel (a) pertains to simulations of a mesoscale convective system that occurred in May, and panel (b) pertains to simulations of an Arctic front in February, with some convection in the warm air mass. The four convective parameterizations were the Grell (GR; Grell 1993, Grell et al. 1994), Kain–Fritsch (KF; Kain and Fritsch 1993), Betts–Miller (BM; Betts and Miller 1986), and Anthes–Kuo (AK; Anthes 1977, Grell et al. 1994) schemes. Adapted from Wang and Seaman (1997).*

*Η επιλογή της παραμετροποίησης μεταφοράς και η επίδρασή της στην προσομοίωση*

Οι παραμετροποιήσεις μεταφοράς χρησιμοποιούν μία ευρεία ποικιλία προσεγγίσεων για ένα πρόβλημα, καθώς και υποθέσεις και συνεπώς αναπόφευκτα αποδίδουν καλύτερα για τις καταστάσεις εκείνες όπου οι υποθέσεις αυτές ικανοποιούνται βέλτιστα. Αυτό ενδεχομένως τις καθιστά εξαρτημένες από την γεωγραφική περιοχή και τις επικρατούσες μετεωρολογικές διαδικασίες. Όμως, οι παραμετροποιήσεις σε διεθνή μοντέλα πρέπει να ανταποκρίνονται επαρκώς για όλα τα κλίματα και για όλα τα σενάρια καιρού.

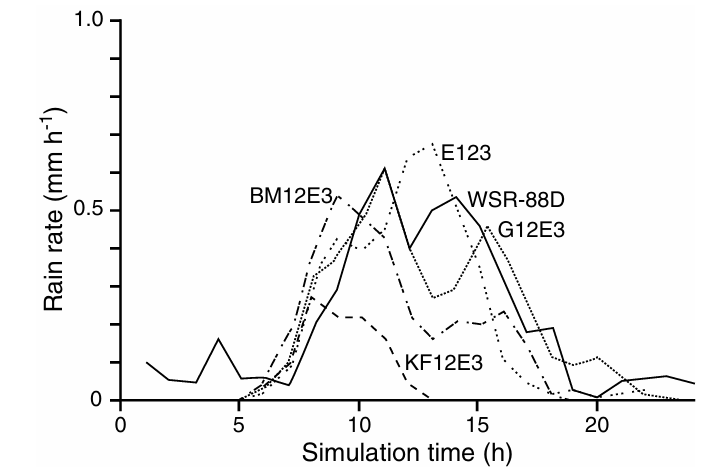
Νωρίτερα αναφέραμε το ότι οι μέθοδοι παραμετροποίησης που χρησιμοποιούνται για μοντέλα coarse-grid ανάλυσης πρέπει να αναπαριστούν και τις διεργασίες κλίμακας μεταφοράς όσο και τις διεργασίες μεσοκλίμακας που σχετίζονται με την μεταφορά. Εν αντιθέσει, σχήματα που χρησιμοποιούνται σε μοντέλα μεσοκλίμακας χρειάζεται να παραμετροποιήσουν μόνο τις διεργασίες κλίμακας μεταφοράς. Σε ένα σύνθετο (nested) σύστημα πλεγμάτων δεν είναι μη ρεαλιστική η χρησιμοποίηση διαφορετικών παραμετροποιήσεων για διαφορετικά πλέγματα. Για ένα υψηλής ανάλυσης πλέγμα που επιλύει αποκλειστικά την μεταφορά, θα ήταν κατάλληλο να μην χρησιμοποιηθεί καμία παραμετροποίηση. Δυστυχώς όμως, οι περισσότερες παραμετροποιήσεις σχεδιάστηκαν για μοντέλα με προσαυξήσεις πλέγματος ίσες με 20–30 km ή και μεγαλύτερες. Παρόλο που υπάρχουν ενδείξεις ότι κάποιες παραμετροποιήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για μικρότερες προσαυξήσεις (π.χ. 10 km), προς το παρόν δεν υπάρχει κάποια καλή λύση για το πρόβλημα του τρόπου αναπαράστασης της μεταφοράς αυτής της ανάλυσης και εκείνων των παραμέτρων που απαιτούνται για να επιλυθεί ρητά η μεταφορά.

Η παρακάτω εικόνα αντικατοπτρίζει την δυναμική ευαισθησία της ακρίβειας της πρόγνωσης υετού ανάλογα με την επιλογή της παραμετροποίησης της μεταφοράς. Το μέσο σύνολο (μεταφορά και επιλυμένη κλίμακα) απεικονίζεται για ένα γεγονός μεταφοράς κατά την ανοιξιάτικη περίοδο (εικόνα a) βασισμένο σε παρατηρήσεις και για 5 προσομοιώσεις (μία χωρίς παραμετροποίηση για την μεταφορά και 4 με διαφορετικές παραμετροποιήσεις). Για όλες τις προσομοιώσεις, η αύξηση του πλέγματος του μοντέλου ήταν 12 χλμ. Σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές στις προσομοιώσεις, ο ρυθμός υετού παρουσίαζε διαφοροποίηση έως και τρεις ή τέσσερις φορές μεταξύ των διαφορετικών παραμετροποιήσεων. Απεικονίζεται επίσης το μέσο bias score για 3 γεγονότα μεταφοράς θερμής περιόδου (εικόνα b). Η οριζόντια προσαύξηση του πλέγματος ήταν 36 km, αντιπροσωπεύοντας μια κατάλληλη ανάλυση για τη χρήση οποιασδήποτε από τις παραμετροποιήσεις που δοκιμάστηκαν. Τα παραπάνω μας δείχνουν μία σημαντική εξάρτηση του ποσού υετού από την παραμετροποίηση η οποία χρησιμοποιήθηκε. Η προσομοίωση που δεν χρησιμοποίησε καμία παραμετροποίηση (EX) υποπροέβλεψε σημαντικά τα πρώιμα ποσά υετού λόγω του χρόνου που απαιτείται για την ανάπτυξη κορεσμού πλεγματικής κλίμακας.



*Average rain rate for a spring-season convective event (a), based on observations (OBS), and for five simulations that used different treatments for the convection – four different parameterizations, and no parameterization (EX). For all simulations the model grid increment was 12 km. Also depicted is the bias score averaged for three warm-season con vective events (b), again for each of the four parameterizations and for the use of no parameterization. The horizontal grid increment was 36 km. The four convective parameterizations were the Grell (GR), Kain–Fritsch (KF), Betts–Miller (BM), and Anthes–Kuo (AK) schemes. Adapted from Wang and Seaman (1997).*

Όχι μόνο η προσομοίωση υετού είναι ευαίσθητη στο σχήμα παραμετροποίησης που αξιοποιείται στο συγκεκριμένο πλέγμα, αλλά επιπρόσθετα έχει αποδειχθεί ότι ο υετός από προσομοιώσεις επίλυσης νεφών σε ένα fine, σύνθετο πλέγμα είναι ευαίσθητος στην παραμετροποίηση μεταφοράς που χρησιμοποιείται στα γύρω χονδροειδή πλέγματα. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τον μέσο ωριαίο ρυθμό υετού που παράγεται σε ένα πλέγμα κλίμακας μεταφοράς για ένα μοντέλο προσομοίωσης θερινής μεταφοράς στις νοτιοδυτικές ΗΠΑ όταν 3 διαφορετικές παράμετροι μεταφοράς χρησιμοποιούνται για τα γειτονικά πλέγματα. Επιπλέον απεικονίζεται και ο υετός σε ένα πλαίσιο όπου καμία παραμετροποίηση δεν έχει αξιοποιηθεί για τα εξωτερικά πλέγματα καθώς και επίσης ο υετός που έχει εκτιμηθεί από την ανακλαστικότητα ενός WSR-88D ραντάρ. Παρόλο που το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο εσωτερικό πλέγμα ήταν πανομοιότυπο και στις τέσσερις προσομοιώσεις, υπήρξε σαφώς μεγάλη επίδραση της επιλογής της παραμέτρου μεταφοράς που χρησιμοποιείται στα άλλα πλέγματα. Οι παραμετροποιήσεις στα coarse πλέγματα προκάλεσαν σταθεροποίηση και ξήρανση σε διάφορους βαθμούς στο πλέγμα επίλυσης μεταφοράς με αποτέλεσμα σημαντικές διαφορές στον προσομοιωμένο υετό.



*Grid-average hourly rain rates on the inner, convection-resolving grid (grid 3) of a nested LAM, when three different convective parameterizations were used on the surrounding grids (grids 1 and 2). Also shown is the rainfall on that grid when no parameterization was used on the outer grids (E123), as well as the rainfall estimated by the reflectivity from the WSR-88D radar. The lines are labelled in terms of the convective parameterization used: BM is Betts–Miller, G is Grell, KF is Kain–Fritsch, and E is explicit. The model configuration used on the inner grid was identical in all four simulations. Adapted from Warner and Hsu (2000).*

Συνεπώς, από τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κατάλληλη παραμετροποίηση των διεργασιών είναι κρίσιμη για την ακριβή αναπαράσταση του καιρού και του κλίματος. Η επιλογή κατάλληλων σχημάτων παραμετροποίησης ανάλογα με την ανάλυση και τον σκοπό του μοντέλου διαδραματίζει βασικό ρόλο στην επιτυχία της προσομοίωσης.