

## Εφαρμογή Νέας Μεθόδου Ανάλυσης Ευαισθησίας σε ένα Μοντέλο Εδάφους -Βλάστησης - Ατμόσφαιρας (SVAT)

Γ. Πετρόπουλος<sup>1</sup>, M. Wooster<sup>2</sup>, T. Carlson<sup>3</sup>, M. Kennedy<sup>4</sup>,

M. Scholze<sup>1</sup>, Γ. Καραντούνιας<sup>5</sup>

1. Department of Earth Sciences, University of Bristol, QUEST, Willis Memorial Building, Queens Road, BS8 1RJ, Bristol, United Kingdom

2. Department of Geography, King's College London, London WC2R 2LS, United Kingdom

3. Department of Meteorology, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, United States

4. Central Science Laboratory, Department for Environment Food and Rural Affairs, Sand Hutton, YO41 1LZ, York, United Kingdom

5. Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 118 55, Αθήνα, Ελλάδα

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε στο μοντέλο εδάφους-βλάστησης-ατμόσφαιρας SimSphere η πλατφόρμα λογισμικού GEM SA για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου με χρήση της μεθόδου global sensitivity analysis (GSA). Ο στόχος ήταν η αναγνώριση των πιο ευαίσθητων μεταβλητών εισόδου του μοντέλου και των αλληλεπιδράσεών τους στο μοντέλο στην προσομοίωση συγκεκριμένων παραμέτρων. Τα γενικότερα συμπεράσματα από τα ευρήματα της παρούσας εργασίας συζητούνται εδώ. Σημειώνεται ότι η παρούσα εργασία είναι πολύ επίκαιρη σε σχέση με την συνολική εκτίμηση της ακρίβειας του συγκεκριμένου μοντέλου, καθώς το μοντέλο αυτό πρόσφατα προτάθηκε για την εκτίμηση της επιφανειακής εδαφικής υγρασίας μέσω μιας σειράς δορυφόρων, οι οποίοι θα τεθούν σε τροχιά μέσα στα επόμενα 12 έτη από την διαστημική εταιρία National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS) και, ξεκινώντας από το έτος 2009.

## Implementation of a New Sensitivity Analysis Method to a Land- Surface- Atmosphere (SVAT) Model

G. Petropoulos<sup>1</sup>, M. Wooster<sup>2</sup>, T. Carlson<sup>3</sup>, M. Kennedy<sup>4</sup>,

M. Scholze<sup>1</sup>, G. Karantounias<sup>5</sup>

1. Department of Earth Sciences, University of Bristol, QUEST, Willis Memorial Building, Queens Road, BS8 1RJ, Bristol, United Kingdom

2. Department of Geography, King's College London, London WC2R 2LS, United Kingdom

3. *Department of Meteorology, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, United States*

4. *Central Science Laboratory, Department for Environment Food and Rural Affairs, Sand Hutton, YO41 1LZ, York, United Kingdom*

5. *Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering., Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece*

## **Abstract**

A software platform called GEM SA was developed for performing a global sensitivity analysis (GSA) is tested herein in the 1d SVAT model SimSphere. The aim has been to identify the most responsive model inputs as well as detect their interactions as regards the simulation of specific outputs simulated by the model. This study is very timely in terms of the overall validation of the SVAT model, considering that its use was recently proposed in a methodology for the operational retrieval of surface moisture content by National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS) in a series of satellite platforms scheduled to be placed in orbit in the next 12 years starting from 2009. The implications of the findings from the present SA for the future use of the model are also discussed.

## **1. Εισαγωγή**

Τα μοντέλα Soil Vegetation Atmosphere Transfer (SVAT) δύνανται να παράγουν απεικονίσεις των φυσικών μηχανισμών που ελέγχουν την μεταφορά ενέργειας και μάζας ανάμεσα στο έδαφος, στη βλάστηση και στην ατμόσφαιρα σε ένα κατακόρυφο επίπεδο προσομοίωσης μεταξύ αυτών. Ένα τέτοιο μοντέλο SVAT είναι το ονομαζόμενο SimSphere των Gillies et al. (1997), το οποίο αποτελεί την πιο πρόσφατη έκδοση μοντέλου των Carlson and Boland (1978). Το μοντέλο αυτό, επιπλέον της χρήσης του ως ανεξάρτητου εργαλείου για μελέτες, έχει προταθεί να ενσωματωθεί με δορυφορικές παρατηρήσεις, προκειμένου να υπολογίσει χάρτες πυκνότητας ροής λανθάνουσας θερμότητας (latent heat flux) και πυκνότητας ροών αισθητής θερμότητας (sensible heat flux) μεταξύ της επιφάνειας της Γής και του κατώτερου επιπέδου ατμόσφαιρας καθώς επίσης και της περιεχόμενης εδαφικής επιφανειακής υγρασίας, μέσω μιας μεθοδολογίας που ονομάζεται “τριγωνική (triangle)” μέθοδος (Gillies et al., 1997). Μία διαφοροποίηση της τελευταίας μεθοδολογίας έχει προταθεί πρόσφατα από τους Chauhan et al. (2003) για την δημιουργία ενός προϊόντος που θα παρέχει σε παγκόσμιο επίπεδο εκτιμήσεις της διαθεσιμότητας επιφανειακής εδαφικής υγρασίας από τον συνδιασμό των δορυφορικών αισθητήρων Visible/Infrared Imager/Radiometer Sensor (VIIRS) and the Microwave Imager Sounder (MIS) της διαστημικής εταιρίας National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System

(NPOESS) στα πλαίσια μιας 12ετούς αποστολής, ξεκινώντας το 2012.

Η λειτουργία του μοντέλου SimSphere έχει γενικά επαληθευθεί από ένα μεγάλο αριθμό μελετών συμπεριλαμβανομένων και ορισμένων στις οποίες έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων (sensitivity analysis) στο προαναφερθέν μοντέλο. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι όλες οι μελέτες ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου αυτού έχουν βασιστεί μέχρι στιγμής σε μεθόδους local sensitivity analysis (LSA) (ή διαφορετικά ονομαζόμενες ως 'local perturbation'). Αν και χρήσιμες, οι μέθοδοι LSA έχουν ορισμένους περιορισμούς, όπως το γεγονός ότι τα αποτελέσματά τους αξιολογούνται στις κεντρικές, μέσες τιμές των μεταβλητών εισόδου του εξεταζόμενου μοντέλου, όπως επίσης και ότι οι μέθοδοι LSA δεν λαμβάνουν υπόψη τους τις τυχόν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων εισόδου ενός μοντέλου. Ως εναλλακτικές των LSA μεθόδων, μια άλλη προσέγγιση αποτελεί η χρήση των ονομαζόμενων μεθόδων global sensitivity analysis (GSA). Περιληπτικά να αναφέρουμε ότι οι μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων GSA εξετάζουν την μεταβλητότητα παραμέτρων εξαγωγής ενός μαθηματικού μοντέλου ως συνάρτηση της μεταβλητότητας όλων των παραμέτρων εισαγωγής του, οι οποίες παίρνουν τιμές που κυμαίνονται εντός των ορίων όλης της περιοχής αβεβαιότητάς τους. Μία ενδελεχής εξέταση των διαθέσιμων μεθόδων GSA και των εφαρμογών τους έχει γίνει για παράδειγμα από τους Saltelli et al. (2004). Η παρούσα μελέτη επίσης κρίνεται ως πολύ επίκαιρη λόγω της επικείμενης χρήσης του μοντέλου αυτού στην μέθοδο του Chauhan et al. (2003) για την εξαγωγή ενός παγκόσμιου διαθέσιμου προϊόντος που θα αφορά την εκτίμηση της περιεχόμενης επιφανειακής εδαφικής υγρασίας, βάση του 12ετούς σχεδίου που έχει ανακοινωθεί από την NPOESS.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να πραγματοποιήσει μια ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων σε επιλεγμένες παραμέτρους εξόδου του μοντέλου SimSphere με χρήση μιας μεθόδου GSA. Στην συγκεκριμένη εργασία η εφαρμογή της GSA μεθόδου γίνεται χρησιμοποιώντας μία πολύ σύγχρονη και εξελιγμένη μέθοδο που βασίζεται στην Bayesian Analysis of Computer Code Outputs (BACCO; Kennedy and O'Hagan, 2001). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εφαρμογή ενός Gaussian Emulation Machine for Sensitivity Analysis (GEM-SA) software tool Version 1.0 (<http://www.tonyohagan.co.uk/academic/GEM/index.html>). Η ανάπτυξη του λογισμικού αυτού χρηματοδοτήθηκε από το National Environmental Research Council (NERC) του Ηνωμένου Βασιλείου με αποκλειστικό στόχο την ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων και αβεβαιότητας μαθηματικών μοντέλων.

## 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Περιγραφή του μοντέλου Simsphere

Το SVAT μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το μοντέλο SimSphere των Gillies et al. (1997), το οποίο αποτελεί την πιο πρόσφατη έκδοση του μοντέλου SVAT που αναπτύχθηκε αρχικά από τους Carlson and Boland (1978). Το SimSphere είναι ένα μονοδιάστατο μοντέλο που περιλαμβάνει προσομοίωση των φυσικών αλληλεπιδράσεων της βλάστησης με το έδαφος και το κατώτερο επίπεδο ατμόσφαιρας. Το μοντέλο εκτελεί προσομοιώσεις που καλύπτουν ένα 24ωρο κύκλο και με ένα επιλεγμένο χρονικό βηματισμό (μεγαλύτερο ή ίσο των 15'), ξεκινώντας από ένα σύνολο αρχικών συνθηκών νωρίς το πρωί (στις 06.00 τοπική ώρα) με μία συνεχώς εξελισσόμενη περιγραφή των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των στρωμάτων του εδάφους, του φυτού και της ατμόσφαιρας. Το μοντέλο προσομοιώνει αρκετές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων και των διακυμάνσεων της πυκνότητας ροής λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης και αισθητής θερμότητας (H, LE fluxes) στην επιφάνεια του εδάφους και εντός αυτού, γύρω και πάνω από την κόμη της βλάστησης, τη διακύμανση του διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ της ατμόσφαιρας και των φυτών και όζοντος της επιφάνειας, την θερμοκρασία της βλάστησης και του μείγματος εδάφους και βλάστησης, της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα πάνω από την κόμη της επιφάνειας της βλάστησης και πολλών άλλων παραμέτρων. Μία λεπτομερής μαθηματική περιγραφή του μοντέλου έχει γίνει από τους Carlson et al. (1981) και Olioso et al. (1986). Το μοντέλο είναι διαθέσιμο από το Κρατικό Πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια στις Ηνωμένες Πολιτείες (<http://www.e-education.psu.edu/simsphere/>) από όπου διανέμεται δωρεάν στους χρήστες.

### 2.2 Περιγραφή της εφαρμοζόμενης μεθόδου ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων

Λεπτομέρειες σχετικά με τη στατιστική διαδικασία της μεθόδου BACCO καθώς και του προσομοιωτή GEM SA μπορεί κανείς να βρεί στις εργασίες των Kennedy και O'Hagan (2000, 2001), ενώ περιγραφή της λειτουργίας της μεθόδου BACCO δίνεται από τον O'Hagan (2006).

Εν συντομία, η μέθοδος BACCO αποτελείται από δύο κύρια στάδια: το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την κατασκευή του προσομοιωτή από ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, ιδανικά σχεδιασμένου για να καλύπτει ένα πολυδιάστατο χώρο δεδομένων εισόδου χρησιμοποιώντας ένα αλγόριθμο για την συμπλήρωση κενών τιμών (space-filling algorithm). Το δεύτερο βήμα χρησιμοποιεί τον προσομοιωτή για τον υπολογισμό των τιμών ευαισθησίας για τις μεταβλητές ενδιαφέροντος. Τα δεδομένα εκπαίδευσης αποκτώνται από πραγματικές προσομοιώσεις του μοντέλου στο οποίο εφαρμόζεται η ανάλυση ευαισθησίας, οι οποίες πραγματοποιούνται για ένα συγκεκρι-

κριμένο σύνολο αρχικών συνθηκών ανάλογα με τη μέθοδο δειγματοληψίας που υιοθετείται κάθε φορά. Επιπλέον, ορίζεται μια συνθήκη κατανομής της πιθανότητας (probability distribution function) για κάθε παραμέτρο εισόδου του μοντέλου, προσδιορίζοντας την μέση τιμή (mean) και την τυπική απόκλιση (variance) της κάθε παραμέτρου εισόδου. Ο προσομοιωτής έχει την δυνατότητα να δίνει στατιστικές μετρήσεις (ονομάζόμενες ως cross-validation), οι οποίες χρησιμοποιούνται προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια με την οποία ο τελευταίος αναπαριστά το ίδιο το εξεταζόμενο μαθηματικό μοντέλο ελέγχοντας έτσι την ακρίβεια και των παραμέτρων εξόδου του προσομοιωτή.

Η βασική έξοδος από την εφαρμογή του λογισμικού GEM SA περιλαμβάνει τον υπολογισμό των κύριων επιδράσεων (main effects) και από κοινού (αλληλεπιδράσεις ως προς τα ζεύγη μόνο) επιδράσεων (joint effects) των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου, καθώς και των συνολικών επιδράσεων (total effects). Η πρώτη βαθμού αλληλεπίδραση της κάθε παραμέτρου εισόδου του μοντέλου (“first order interactions”) αποτελεί το αναμενόμενο ποσοστό της μεταβλητότητας το οποίο θα δύνατο να αφαιρεθεί από την συνολική αβεβαιότητα της παραμέτρου εξόδου εάν θεωρητικά είμασταν σε θέση να γνωρίζουμε την πραγματική τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου εισόδου του μοντέλου μέσα στα όρια της αβεβαιότητάς της. Οι ανωτέρου βαθμού αλληλεπιδράσεις (“higher-order interactions”) εκφράζουν την ευαισθησία της παραμέτρου εξόδου του μοντέλου σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου. Ο δείκτης ολικής ευαισθησίας (“total sensitivity index”) συλλέγει σε ένα μόνο διάστημα όλες τις αλληλεπιδράσεις που αφορούν την κάθε παράμετρο εισόδου του μοντέλου (κύριες επιδράσεις και αλληλεπίδρασης) προσφέροντας μία αποτελεσματική μέθοδο υπολογισμού για την διερεύνηση των συνολικών αποτελεσμάτων της ευαισθησίας (higher order sensitivity effects), σχετικά με οποιαδήποτε από τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου που εξετάζεται κάθε φορά. Το μέρος εκείνο της μεταβλητότητας της κάθε παραμέτρου εισόδου είναι ίσο με το μέγεθος με το οποίο η κύρια επίδραση αυτής κυμαίνεται μέσα στην κλίμακα της αβεβαιότητας προσδιορισμού της κάθε παραμέτρου εισόδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά πρόσθεση των κύριων επιδράσεων δεν οδηγεί σε αποτέλεσμα ίσο με 100%, λόγω αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου. Παρόλα αυτά η πρόσθεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει το βαθμό (ποσοστό) των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραμέτρων εισόδου στο μοντέλο.

### 3. Μεθοδολογία

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο BACCO GEM SA, εξετάστηκε η ευαισθησία των ακόλουθων παραμέτρων εξόδου του μοντέλου SimSphere λόγω της σημασίας τους στην

“τριγωνική” μέθοδο των Gillies et al. (1997) και Carlson (2007) και στην μέθοδο των Chauhan et al. (2003): Μέση ημερήσια πυκνότητα ροής καθαρής ακτινοβολίας (Net Radiation,  $\overline{Rn_{daily}}$ ), Μέση ημερήσια πυκνότητα ροής λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης (Latent Heat flux,  $\overline{LE_{daily}}$ ), Μέση ημερήσια πυκνότητα ροής αισθητής θερμότητας (Sensible Heat flux,  $\overline{H_{daily}}$ ) και Μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα (Air Temperature ( $\overline{T_{air_{daily}}}$ )).

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο δειγματοληψίας LP-tau δημιουργήθηκαν και εκτελέστηκαν με το μοντέλο SimSphere 400 σενάρια προσομοιώσεων. Έτσι έγινε δυνατό όλες οι παράμετροι εισόδου του SimSphere (30 συνολικά) να κυμανθούν εντός των θεωρητικών τιμών που αυτές μπορούν να πάρουν στο μοντέλο. Σταθερές έμειναν μόνο οι τιμές της γεωγραφικής θέσης (πλάτος/μήκος) και του ατμοσφαιρικού κατακόρυφου, για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν εκ των προτέρων τιμές που ελήφθησαν από πραγματικές παρατηρήσεις κατά την 17<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2004 από την τοποθεσία Borgo Cioffi Italian CarboEurope (που βρίσκεται στην Κεντρική Ιταλία). Όλες οι παράμετροι εισόδου του μοντέλου (30 τον αριθμό) θεωρήθηκαν ότι είχαν κανονική κατανομή, χρησιμοποιώντας την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση, που ελήφθησαν από ολόκληρο το θεωρητικό φάσμα τιμών το οποίο μπορούν να δεχθούν οι παράμετροι αυτές στο SimSphere.

## 4. Αποτελέσματα και συζήτηση

### 4.1. Αξιοπιστία προσομοιωτή

Στατιστική εκτίμηση της ακρίβειας του προσομοιωτή έγινε βάσει της ποσοτικής εκτίμησης του συνόλου των στατιστικών μετρήσεων που υπολογίστηκαν από το GEM-SA. Αυτές περιλάμβαναν για κάθε μια από τις παραμέτρους του μοντέλου, τις παραμέτρους τραχύτητα (“roughness”) (– σημειώνουμε εδώ ότι η roughness αυτή είναι διαφορετική από την παράμετρο τραχύτητα επιφανείας, surface roughness, η οποία είναι μια από τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου), την “sigma-squared” και ένα σύνολο άλλων στατιστικών παραμέτρων “επαληθεύσεων”. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις στατιστικές αυτές για κάθε έναν από τους ελέγχους ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν. Όπως φαίνεται, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν γενικά μια ακριβή προσέγγιση του προσομοιωτή στα δεδομένα εκπαίδευσης και κατά συνέπεια μια πετυχημένη κατασκευή του προσομοιωτή. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της GSA μεθόδου σε κάθε μία από τις μελετώμενες παραμέτρους εξόδου του μοντέλου, των οποίων εξετάστηκε η ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων.

Πίνακας 1. Σύνοψη των στατιστικών αποτελεσμάτων της ακρίβειας του προσομοιωτή.

Model Input		Roughness				
		$Rn_{daily}$	$LE_{daily}$	$H_{daily}$	$Tair_{daily}$	$Mo_{daily}$
X1	Slope	2.6660	0.2491	1.0044	1.1963	0.4268
X2	Aspect	16.9225	8.1534	4.9068	6.5718	0.0786
X3	Station Height	0.0078	0.9689	0.2072	0.0010	0.3230
X4	Fractional Vegetation Cover	0.6988	1.9564	1.0975	1.8938	0.0116
X5	LAI	0.9337	0.0111	0.2063	0.0828	0.0010
X6	Foliage emissivity	0.0502	0.0078	0.1355	0.0301	0.0026
X7	[Ca]	0.0083	0.0710	0.0048	0.1500	0.0366
X8	[Ci]	0.0722	0.0843	0.0035	0.0172	0.0081
X9	[O3] in the air	0.1042	0.1284	0.0338	0.0010	0.0001
X10	Vegetation height	0.1933	0.0268	0.7700	0.7651	0.0001
X11	Leaf width	0.0001	0.0555	0.0007	0.0031	0.0001
X12	Minimum Stomatal Resistance	0.0001	0.0102	0.0004	0.0127	0.0074
X13	Cuticle Resistance	0.0452	0.0604	0.1886	0.0569	0.0072
X14	Critical leaf water potential	0.0289	0.0023	0.0388	0.2143	0.0083
X15	Critical solar parameter	0.0001	0.0001	0.0062	0.0001	0.0036
X16	Stem resistance	0.0002	0.1568	0.0022	0.0198	0.1686
X17	Surface Moisture Availability	0.4368	1.4709	0.4533	0.1154	3.1706
X18	Root Zone Moisture Availability	0.0293	0.0387	0.0317	0.0759	0.0543
X19	Substr. Max. Volum. Water Cont.	0.0001	0.0118	0.0001	0.0923	0.0129
X20	Substrate clim. mean temper.	0.0333	0.3054	0.2938	0.1741	0.0011
X21	Thermal inertia	0.2169	0.2840	0.2754	0.2514	0.0001
X22	Ground emissivity	0.0001	0.0001	0.0682	0.0722	0.0333
X23	Atmospheric Precipitable water	0.0218	0.0106	0.0140	0.0066	0.0001
X24	Surface roughness	0.2668	0.0077	0.8880	0.7983	0.0001
X25	Obstacle height	0.0001	0.0001	0.0064	0.0001	0.0001
X26	Fractional Cloud Cover	0.0224	0.0037	0.0001	0.0001	0.0031
X27	RKS	0.0069	0.0003	0.0001	0.0001	3.7857
X28	CosbyB	0.0766	0.0049	0.0156	0.0001	1.1833
X29	THM	0.0301	0.0001	0.0005	0.0100	0.5326
X30	PSI	0.0517	0.0968	0.0213	0.0001	2.9997

	$Rn_{daily}$	$LE_{daily}$	$H_{daily}$	$Tair_{daily}$
<b>FITTED MODEL PARAMETERS</b>				
sigma-squared:	0.5229	0.8752	1.4494	1.6321
<b>CROSS-VALIDATION RESULTS:</b>				
Cross-validation root mean squared-error (Wm-2):	23.0515	20.2858	18.1837	0.8349
Cross-validation root mean squared relative error (%):	25.2553	24.4602	36.0452	6.4749
Cross-validation root mean squared standardised error:	1.3367	1.1569	1.4070	1.5411

## 4.2. Αποτελέσματα

Η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου ως προς τις διαφορετικές παραμέτρους εξόδου του μοντέλου που εξετάστηκαν, συνοψίζονται στον Πίνακα 2. Στον πίνακα αυτό όλες οι παράμετροι εισόδου που έχουν δείκτη κύριων επιδράσεων (main effects) και συνολικών επιδράσεων (total effects) μεγαλύτερο από 1% σημειώνονται με γκρι χρώμα. Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων αυτών μας επέτρεψαν να διαχωρίσουμε τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου που επηρεάζουν περισσότερο την προσομοίωση των παραμέτρων εξόδου του μοντέλου που εξετάστηκαν.

Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει εύκολα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που φαίνονται στον Πίνακα 2, παρουσιάζεται γενικά μεγάλη διακύμανση τόσο στις τιμές των κύριων επιδράσεων όσο και των συνολικών επιδράσεων μεταξύ των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου για όλες τις εξεταζόμενες παραμέτρους εξόδου του μοντέλου. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει επίσης ότι μόνο μία μικρή ομάδα από τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου συμβάλλει σημαντικά στην ανάλυση της διακύμανσης των παραμέτρων εξόδου που εξετάστηκαν. Επιπλέον, όπως προκύπτει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, το σύνολο των κύριων επιδράσεων των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου αθροίζονται πάντα λιγότερο από 100% σε όλες τις περιπτώσεις των εξεταζόμενων παραμέτρων εξόδου. Αυτό υποδηλώνει την παρουσία αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραμέτρων εισόδου στην προσομοίωση των εξεταζόμενων παραμέτρων από το μαθηματικό μοντέλο.

Συνολικά, σχεδόν όλες οι παράμετροι εξόδου του μοντέλου των οποίων ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, βρέθηκαν να παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία στις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου άποψη αναγλύφου (aspect), τμήμα εδάφους καλυπτόμενο από βλάστηση (fractional vegetation cover), επιφανειακή εδαφική υγρασία (surface moisture availability) και κλίση (slope). Άλλες παράμετροι εισόδου του μοντέλου, με υψηλή ευαισθησία βρέθηκαν να είναι η τραχύτητα εδάφους (surface roughness), το ύψος βλάστησης (vegetation height), η μέση κλιματολογική θερμοκρασία υποστρώματος (substrate climatological mean temperature) και η θερμική αδράνεια (thermal inertia). Τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας δεν μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα από άλλες προηγούμενες ανάλογες δημοσιευμένες εργασίες. Αυτό οφείλεται στο ότι η παρούσα εργασία παρουσιάζει αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας βασισμένη σε απόλυτα διαφορετική μέθοδο συγκριτικά με ανάλογες προηγούμενες εργασίες. Παρόλα αυτά, σημειώνεται ότι τα γενικότερα αποτελέσματα από την παρούσα εργασία είναι σε συμφωνία με εκείνα από άλλες δημοσιεύσεις όσον αφορά την σημαντικότητα κάποιων εκ των παραμέτρων εισόδου στην προσομοίωση συγκεκριμένων παραμέτρων (e.g. Taconet et al., 1986, Carlson and Boland, 1978).



**Πίνακας 2.** Συνοπτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου *BACCO GEM SA* στις διάφορες παραμέτρους εξόδου του μοντέλου *SimSphere*.

Model inputs		$Rn_{daily}$		$LE_{daily}$		$H_{daily}$		$Tair_{daily}$	
		main effects (%)	total effects (%)	main effects (%)	total effects (%)	main effects (%)	total effects (%)	main effects (%)	total effects (%)
X1	Slope	4.942	21.781	1.391	6.549	3.170	13.447	9.280	21.649
X2	Aspect	66.007	84.948	22.888	36.702	25.969	43.711	26.873	45.933
X3	Station Height	0.017	0.053	1.231	4.547	0.105	2.182	0.034	0.036
X4	Fractional Vegetation Cover	5.182	6.963	20.875	30.004	16.265	25.303	14.672	23.264
X5	LAI	1.507	3.367	0.028	0.123	0.217	2.370	0.061	1.086
X6	Foliage emissivity	0.049	0.240	0.073	0.142	0.275	2.103	0.077	0.547
X7	[Ca]	0.013	0.055	0.026	0.436	0.048	0.125	0.088	1.638
X8	[C]	0.013	0.300	0.025	0.720	0.115	0.169	0.271	0.499
X9	[O3] in the air	0.019	0.347	0.059	0.859	0.099	0.604	0.062	0.063
X10	Vegetation height	0.176	0.695	0.169	0.380	2.169	8.438	1.728	6.688
X11	Leaf width	0.021	0.022	0.107	0.629	0.076	0.088	0.056	0.103
X12	Minimum Stomatal Resistance	0.009	0.010	0.034	0.130	0.045	0.052	0.038	0.239
X13	Cuticle Resistance	0.028	0.220	0.237	0.761	0.510	3.040	0.334	1.145
X14	Critical leaf water potential	0.009	0.126	0.064	0.087	0.078	0.656	0.082	2.319
X15	Critical solar parameter	0.013	0.013	0.041	0.042	0.378	0.136	0.029	0.030
X16	Stem resistance	0.011	0.012	0.026	0.904	0.075	0.110	0.126	0.392
X17	Surface Moisture Availability	0.146	0.321	24.767	33.749	7.277	11.830	4.195	5.370
X18	Root Zone Moisture Availability	0.041	0.175	0.023	0.350	0.337	0.767	0.240	1.095
X19	Subst. Max. Volum. Water Cont.	0.013	0.013	0.168	0.272	0.058	0.060	0.047	1.167
X20	Subst. Climatol. Mean Temp.	0.223	0.358	4.060	6.095	8.624	11.666	10.187	12.084
X21	Thermal inertia	0.761	1.320	1.276	3.632	0.998	4.303	0.740	3.757
X22	Ground emissivity	0.012	0.012	0.020	0.021	0.107	1.023	0.112	0.972
X23	Atmospheric Precipitable water	0.012	0.103	0.030	0.123	0.046	0.253	0.062	0.162
X24	Surface roughness	0.117	0.925	0.124	0.188	1.706	8.970	1.990	7.825
X25	Obstacle height	0.009	0.010	0.025	0.026	0.113	0.209	0.034	0.035
X26	Fractional Cloud Cover	0.012	0.136	0.062	0.096	0.039	0.041	0.040	0.041
X27	RKS	0.015	0.049	0.017	0.019	0.028	0.029	0.046	0.048
X28	CosbyB	0.038	0.301	0.075	0.123	0.152	0.391	0.038	0.039
X29	THM	0.017	0.140	0.020	0.021	0.050	0.058	0.223	0.367
X30	PSI	0.023	0.281	0.049	0.735	0.073	0.436	0.062	0.064
Total % variance (main effects only)		79.45		77.99		68.86		71.83	
Total % variance (including first order interactions)		97.64		94.57		90.45		91.26	
Total % variance (2 <sup>nd</sup> or higher order interactions)		2.36		5.43		9.55		8.74	

Τα γενικότερα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας είναι πολλαπλά: πρώτα απ' όλα, ένα σημαντικό εύρημα είναι ότι σχεδόν όλες οι παράμετροι εξόδου του μοντέλου οι οποίες εξετάστηκαν παρουσίασαν υψηλή ευαισθησία στην παράμετρο εισόδου του μοντέλου ονομάζομενη τμήμα εδάφους καλυπτόμενο από βλάστηση (fractional vegetation cover). Αυτό είναι σημαντικό, διότι η παράμετρος αυτή εμπεριέχεται επίσης και στις εξισώσεις που έχουν προταθεί για τον υπολογισμό των ροών ενέργειας και επιφανειακής εδαφικής υγρασίας στην “τριγωνική” μέθοδο των Gillies et al. (1997).

Δεύτερον, η υψηλή ευαισθησία που βρέθηκε για όλες της προσομοιούμενες παραμέτρους εξόδου στις παραμέτρους εισόδου κλίση (slope) και άποψη αναγλύφου (aspect) του μοντέλου υποδηλώνει ότι τα αποτελέσματα της “τριγωνικής” μεθόδου μπορεί ενδεχόμενα να επηρεάζονται σημαντικά από την τοπογραφία της περιοχής όπου εφαρμόζεται η μέθοδος αυτή. Ένα τρίτο συμπέρασμα είναι ότι η αποτελεσματικότητα του μοντέλου *SimSphere* μπορεί πιθανώς να βελτιωθεί, μειώνοντας την διά-

σταση που αφορά την παραμετροποίησή του, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στον προσδιορισμό των παραμέτρων εισόδου, οι οποίες παραπάνω αναφέρθηκε ότι καθορίζουν περισσότερο τις προσομοιώσεις των παραμέτρων εξόδου του μοντέλου.

## 5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία για την εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων του SVAT μοντέλου SimSphere μέσω μιας ανάλυσης ευαισθησίας. Σε αντίθεση με όλες τις προηγούμενες μελέτες ανάλυσης ευαισθητοποίησης που είχαν πραγματοποιηθεί μέχρι τώρα στο συγκεκριμένο μοντέλο, η μέθοδος που ακολουθήθηκε εδώ βασίστηκε σε μία μέθοδο γνωστή ως global sensitivity analysis (GSA). Η μέθοδος GSA εφαρμόστηκε στο μοντέλο SimSphere κάνοντας χρήση του λογισμικού GEM-SA (έκδοση 1.1), το οποίο αναπτύχθηκε ειδικά για την εκτέλεση ενός GSA μέσω της Bayesian ανάλυσης κάνοντας χρήση της μεθόδου BACCO, επιτρέποντας την δημιουργία ενός προσομοιωτή από πολλαπλές προσομοιώσεις του ίδιου του μαθηματικού μοντέλου. Αυτό που είναι επίσης σημαντικό είναι ότι η μέθοδος που παρουσιάζεται εδώ μπορεί να προσαρμοσθεί και να εφαρμοσθεί σε ένα μεγάλο αριθμό μαθηματικών μοντέλων συμπεριλαμβανομένων και άλλων SVAT μοντέλων ανάλογων με αυτό του SimSphere. Επίσης τα αποτελέσματα από την παρούσα εργασία αναμένεται να είναι σημαντικά για την μελλοντική χρήση του μοντέλου, συμπεριλαμβανομένης της επικείμενης χρήσης του από την διαστημική εταιρία NPOESS για την δημιουργία του παγκόσμια διατιθέμενου προϊόντος επιφανειακής εδαφικής υγρασίας από τον συνδιασμό των δορυφορικών αισθητήρων VIIRS και MIS, ξεκινώντας από το 2012.

## Βιβλιογραφία

1. Carlson, T. N., Dodd, J. K., Benjamin, S. G. and Cooper, J. N., 1981. Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia, *J. Appl. Meteorol*, 20: 6-87.
2. Carlson, T. N and Boland, F. E., 1978. Analysis of urban-rural canopy using a surface Heat flux/Temperature model. *Journal of Applied Meteorology*, 17: 998-1014.
3. Chauhan, N. S., Miller S. and Ardanuy, P., 2003. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 4599-46.
4. Gillies, R. R., Carlson, T. N., Cui, J., Kustas, W. P. and Humes, K. S., 1997. Verification of the "triangle" method for obtaining surface soil water content and energy

- fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index NDVI and surface radiant temperature. *Int. J. Remote Sens*, 18: 3145-3166.
5. Kennedy, MC. and O'Hagan, A., 2001. Bayesian calibration of computer models. *J R Stat Soc Ser B Stat Methodol*, 63(3): 425-64.
  6. Kennedy, M. C. and O'Hagan, A., 2000. Predicting the output from a complex computer code when fast approximations are available. *Biometrika*, 87: 1-13.
  7. O'Hagan, A., 2006. Bayesian analysis of computer code outputs: a tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, 91: 1290-1300.
  8. Oliosio, A., Carlson, T. N. and Brisson, N., 1986. Simulation of diurnal transpiration and photosynthesis of a water stressed soybean crop. *Agric. Forest Meteor.*, 81: 41-59
  9. Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F. and Ratto, M., 2004. Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models. Wiley & Sons, Ltd, UK, 217 pp.
  10. Taconet, O., Carlson, T. N., Bernard, R. and Vidal-Madjar, D., 1986. Evaluation of a Surface/Vegetation parameterisation using satellite measurements of surface temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25: 1752-176.