

ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Γ.Ν.Ε. Παπασπύρος, Γ.Α. Σιδερίδης, Ε.Γ. Καστρινάκης και Σ.Γ. Νυχάς
Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54006 Θεσσαλονίκη

Κ.Δ. Καλαμποκίδης
Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 81100 Μυτιλήνη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζεται ένα απλό μοντέλο δασικών πυρκαγιών με φυσική βάση, το οποίο απαιτεί ελάχιστη πληροφορία, και έχει εφαρμογή σε διάφορα είδη βλάστησης. Το προτεινόμενο μοντέλο προσφέρει άμεση εκτίμηση των παραμέτρων των πυρκαγιών, τόσο της στερεάς, όσο και της αέριας φάσης. Οι προβλέψεις του μοντέλου συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα είναι ελπιδοφόρα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά την έρευνα 70 ετών, ακόμη απαιτείται ένα απλό μοντέλο δασικής πυρκαγιάς με φυσική βάση. Ένα εφαρμόσιμο μοντέλο θα απαιτούσε όσο το δυνατόν λιγότερα δεδομένα, ενώ θα έπρεπε να είναι άμεσης επίλυσης, αφού θα αποτελούσε τον πυρήνα μοντέλων μεγαλύτερης κλίμακας που θα συνεκτιμούσαν την τοπογραφία και τις καιρικές συνθήκες. Το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο σήμερα προτάθηκε το 1972 από τον RC Rothermel: πρόκειται για ένα ημιεμπειρικό μοντέλο εξαιρετικά επιτυχημένο, αλλά με μεγάλα περιθώρια βελτίωσης. Το μοντέλο Rothermel, στη μορφή που χρησιμοποιείται σήμερα, παρουσιάζεται από τον Wilson [1], και αποτελεί τη βάση του κώδικα BEHAVE, που γνωρίζει ευρύτατη εφαρμογή στην ανάλυση δασικών πυρκαγιών και την επεξεργασία σεναρίων πυρκαγιών, κυρίως σε Ευρώπη και Αμερική. Εκτός του BEHAVE χρησιμοποιούνται, κυρίως σε Καναδά και Αυστραλία, διάφορα μοντέλα καθαρά εμπειρικά, με εφαρμογή σε συγκεκριμένα είδη βλάστησης.

Το μοντέλο Rothermel στηρίζεται στο ισοζύγιο της ενέργειας που παράγεται κατά την καύση. Η ενέργεια αυτή εκλύεται κατά την οξειδωση των αερίων πυρόλυσης από τον περιβάλλοντα αέρα. Ένα μέρος των αερίων, έστω X , οξειδώνεται μέσα στην κλίνη καύσης. Ένα μέρος της εκλύομενης ενέργειας, έστω ξ , μεταφέρεται στο άκαυτο υλικό, ένα μέρος χάνεται, και η υπόλοιπη ενέργεια ανεβάζει τη θερμοκρασία του μίγματος αερίων πυρόλυσης, προϊόντων οξειδωσης, συμπαρασυρμένου αέρα και υδρατμών (από την εξάτμιση της υγρασίας του καυσίμου, έστω M_f , μάζα νερού ανά μονάδα μάζας στεγνού καυσίμου) στην τιμή T_f , που είναι η θερμοκρασία εξόδου της αέριας φάσης από την κλίνη καύσης. Τα αέρια πυρόλυσης που δεν έχουν οξειδωθεί στην κλίνη καύσης συνεχίζουν να οξειδώνονται στο πλούμι (φλόγα) που σχηματίζεται πάνω από την κλίνη. Η μεταφορά ενέργειας μέσα στην κλίνη πιστεύεται σήμερα πως γίνεται κυρίως με ακτινοβολία, αλλά σημαντικός είναι ο ρόλος της συναγωγής (ιδιαίτερα σε ισχυρό άνεμο), ενώ και η αγωγή μπορεί να είναι αξιόλογη σε πυκνές κλίνες. Μία ακόμη παράμετρος σχεδιασμού είναι ο στοιχειομετρικός λόγος, έστω Φ , της μάζας του αέρα που συμμετέχει στην διαδικασία οξειδωσης και στο πλούμι, προς τη μάζα των αερίων πυρόλυσης.

Το μοντέλο Rothermel ξεκινά από την απλή περίπτωση επίπεδης κλίνης καύσης και άπνοιας. Το κλάσμα ξ της ενέργειας που μεταφέρεται στο άκαυτο υλικό θεωρείται συνάρτηση της δομής της κλίνης, η οποία χαρακτηρίζεται από το βάθος της, έστω δ , τον παράγοντα συμπίεσης β που εκφράζει το πορώδες της κλίνης, την ειδική επιφάνεια σ των στοιχείων του καυσίμου (επιφάνεια προς όγκο των βελονών, κλαδιών κλπ.), και την μάζα του (στεγνού) καυσίμου ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους, έστω w_0 . Εκτός των μεγεθών αυτών, το μοντέλο απαιτεί την

υγρασία Mf του καυσίμου και μια σειρά χαρακτηριστικών, κυρίως θερμοδυναμικών, με διαφορετική τιμή για κάθε καύσιμο. Με χρήση εμπειρικών συσχετίσεων υπολογίζεται η ενέργεια που μεταφέρεται στο άκαυτο υλικό, και αυτή που απαιτείται για την προθέρμανση, την ξήρανση, και την πυρόλυση του άκαυτου υλικού: το πηλίκιο των δύο αυτών ενεργειών δίνει την ταχύτητα διάδοσης της φλόγας, ROS. Άλλες σημαντικές παράμετροι, όπως το ύψος και το βάθος της φλόγας, υπολογίζονται εμπειρικά. Στο βασικό αυτό μοντέλο προστίθεται η επίδραση πνέοντος ανέμου με τη μορφή ενός συντελεστή, που εκφράζει την επιπλέον ενέργεια που μεταφέρεται, είτε με ακτινοβολία από την κεκλιμένη λόγω του ανέμου φλόγα είτε με συναγωγή στη βάση της φλόγας, στο άκαυτο υλικό. Η κλίση της κλίνης μοντελοποιείται ανάλογα με πνέοντα άνεμο, με χρήση ενός ακόμη εμπειρικού συντελεστή.

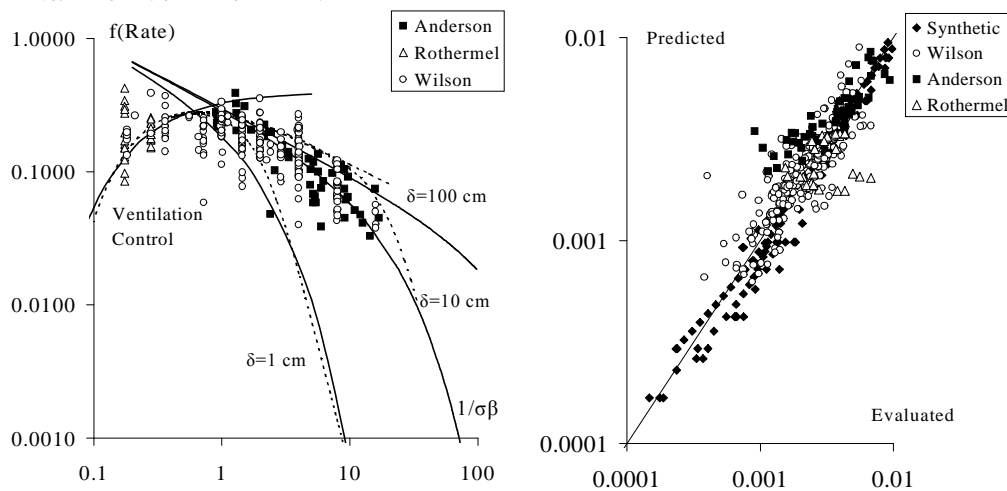
Οι συγγραφείς ανέλαβαν την ανάπτυξη του μοντέλου που παρουσιάζεται εδώ στα πλαίσια του Προγράμματος EFAISTOS της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σκοπός του Προγράμματος ήταν η δημιουργία βάσης πειραματικών δεδομένων δασικών πυρκαγιών, και η ανάπτυξη μοντέλων που θα περιέγραφαν πλήρως τη διεργασία της πυρκαγιάς, καλύπτοντας και την αέρια φάση. Στα αποτελέσματα του Προγράμματος περιλαμβάνεται μια επιτυχημένη αριθμητική προσομοίωση δασικών πυρκαγιών (βλέπε π.χ. *Porterie et al.*, [2]), η οποία έχει ωστόσο προς το παρόν μόνο θεωρητικό ενδιαφέρον. Το μοντέλο που προτείνεται εδώ μπορεί να θεωρηθεί συμπληρωματικό της αριθμητικής προσομοίωσης, προοριζόμενο για πρακτική εφαρμογή.

Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην παρατήρηση του Albin [3] πως οι φλόγες μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν ανωστικές φλέβες σε εγκάρσια ροή. Οι συγγραφείς έχουν αναπτύξει ένα μετασχηματισμό που επιτρέπει την παράσταση της τροχιάς και της συγκέντρωσης τέτοιων φλεβών με μία καμπύλη, κοινή για όλες τις φλέβες (*Paraspyros et al.*, [4]). Η ομοιότητα αυτή συσχετίζεται με δομές μεγάλης κλίμακας που έχουν εντοπίσει οι συγγραφείς στο εσωτερικό των φλεβών (*Paraspyros et al.*, [5]). Για την ανάλυση της φλόγας σαν ανωστικής φλέβας σε εγκάρσια ροή, απαιτείται η γνώση της θερμοκρασίας και της σύστασης της αέριας φάσης, κατά την έξοδο της από την κλίση καύσης: τα στοιχεία αυτά παρέχονται από το μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη διατήρηση συμβατότητας με το BEHAVE, με χρήση κοινών συμβόλων και αλγορίθμου, ώστε να είναι δυνατή η παράλληλη χρήση των δύο μοντέλων. Έτσι, στην παρούσα εργασία μελετάται ο πυρήνας του μοντέλου Rothermel, δηλαδή η περίπτωση επίπεδης κλίνης καύσης σε άπνοια.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το προτεινόμενο μοντέλο δεν απαιτεί εξειδικευμένα δεδομένα ανάλογα με το είδος του καυσίμου. Το μοντέλο στηρίζεται στην παρατήρηση των συγγραφέων πως ο ρυθμός απώλειας μάζας καιγόμενου υλικού, dwo/dt , αδιαστατοποιημένος σαν $f(\text{Rate}) = (dwo/dt) \cdot (1 + 3.2 \cdot Mf) / (\rho \cdot w)$, παριστάνεται ικανοποιητικά ως προς $1/(\sigma \cdot \beta)$ από μία οικογένεια καμπυλών, όπου η κάθε καμπύλη περιγράφει μια τιμή βάθους κλίνης δ , τόσο για τυπικά καύσιμα (πευκοβελόνες, πριονίδια κλπ.), όσο και για στάσιμη καύση δικτυωμάτων ευμεγεθών δοκιμίων (cigars), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 (οι πηγές των δεδομένων που παριστάνονται στα Σχήματα αναφέρονται στην [6]). Στην έκφραση του $f(\text{Rate})$, ρ είναι η πυκνότητα της αέριας φάσης σε μια τυπική θερμοκρασία, w η κατακόρυφη ταχύτητα της αέριας φάσης κατά την έξοδο από την κλίση (υπολογίζεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes για πλούμι), ενώ ο όρος $(3.2 \cdot Mf)$ περιγράφει την κατανάλωση ενέργειας από την υγρασία του καυσίμου, σύμφωνα με το θερμοδυναμικό ισοζύγιο της καύσης. Ο όρος $1/(\sigma \cdot \beta)$ είναι διαστατικός αλλά πολύπλοκος, καθώς εκφράζει αρκετές κλίμακες του πεδίου: εδώ είναι το αντίστροφο της καύσιμης επιφάνειας ανά μονάδα όγκου. Στην παράσταση του $f(\text{Rate})$ διακρίνονται δύο περιοχές: η περιοχή που σημειώνεται σαν “Ventilation Control” περιγράφεται από μία μόνο καμπύλη, και καθορίζεται από το βαθμό

επάρκειας του διαθέσιμου οξυγόνου στην κλίνη. Στο Σχήμα 1 φαίνεται επίσης η σύγκριση προβλεπόμενων και υπολογιζόμενων (από τα πειραματικά δεδομένα) ρυθμών απώλειας μάζας, η οποία είναι ικανοποιητική. Τα δεδομένα που χαρακτηρίζονται “synthetic” παρήχθησαν τεχνητά, με εφαρμογή των προβλέψεων του BEHAVE για τον ρυθμό απώλειας μάζας, ώστε να ελεγχθεί η συμβατότητα των μοντέλων.

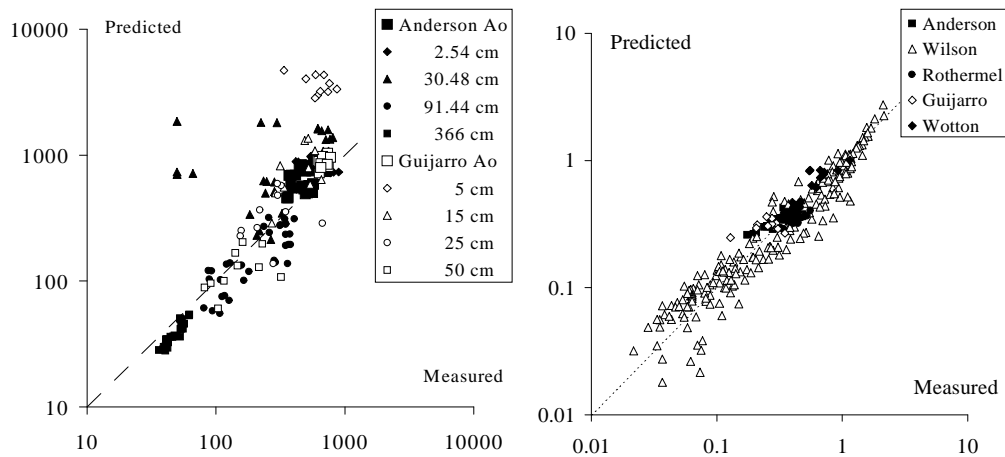


Σχήμα 1: Αριστερά, αδιάστατη έκφραση του ρυθμού απώλειας μάζας καιγόμενου υλικού σαν συνάρτηση της παραμέτρου κλίνης $1/(\sigma\beta)$ εκφρασμένης σε cm. Δεξιά, προβλεπόμενοι και υπολογιζόμενοι ρυθμοί απώλειας μάζας του καυσίμου, σε $g/(cm^2 s)$.

Γνωρίζοντας το ρυθμό απώλειας μάζας του καυσίμου, άρα τη μάζα των αερίων πυρόλυσης, και την ταχύτητα εξόδου της αέριας φάσης από την κλίνη, μπορεί κανείς να εκτιμήσει από την εξίσωση συνέχειας το στοιχειομετρικό λόγο Φ αέρα/αερίων πυρόλυσης. Στη συνέχεια, το κλάσμα X των αερίων πυρόλυσης που οξειδώνεται μέσα στην κλίνη θεωρείται, φαινομενολογικά, συνάρτηση του Φ , της παραμέτρου κλίνης β , και ενός αριθμού Reynolds για τη ροή μέσα στην κλίνη. Ανάλογα εκτιμάται το κλάσμα της εκλυόμενης ενέργειας που μεταφέρεται στο άκαυτο υλικό, ξ (η έκφραση που προκύπτει περιγράφει πολύ καλά τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εμπειρική συσχέτιση του BEHAVE για το ξ), καθώς και οι απώλειες ενέργειας στο περιβάλλον (οι οποίες θεωρούνται συνάρτηση της δομής της κλίνης). Αφαιρώντας τους δύο αυτούς ενεργειακούς όρους από την εκλυόμενη ενέργεια, προκύπτει η ενέργεια που ανεβάζει τη θερμοκρασία της αέριας φάσης σε T_f , οπότε είναι γνωστή η θερμοκρασία και η σύσταση του πλουμίου πάνω από την κλίνη καύσης, και μπορεί να εκτιμηθεί (με μοντελοποίηση του πλουμίου, όπως σε συστήματα combustion) η θέση στην οποία η θερμοκρασία του πλουμίου είναι 500 K, που θεωρείται το άκρο της φλόγας. Από τα υπολογιζόμενα μεγέθη της αέριας φάσης παριστάνεται στο Σχήμα 2 η θερμοκρασία στο κέντρο του πλουμίου, σε διάφορα ύψη πάνω από την κλίνη (η θέση “Ao” είναι το πάνω επίπεδο της κλίνης καύσης).

Από τις παραμέτρους της κλίνης, η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας υπολογίζεται όπως στο μοντέλο Rothermel, με νέο στοιχείο την εισαγωγή μιάς κλίμακας ταχύτητας για τη διάχυση θερμότητας στο εσωτερικό των στοιχείων του καυσίμου: έτσι, προσδιορίζεται με φυσική βάση το βάθος θερμικής προσβολής των σωματιδίων που απαιτείται για την ανάφλεξή τους. Ο εμπειρικός υπολογισμός του βάθους αυτού, ϵ , είναι από τις αδυναμίες του BEHAVE. Από τις παραμέτρους της κλίνης καύσης παριστάνεται στο Σχήμα 2 η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας (ROS).

Τα αποτελέσματα θεωρούνται εξαιρετικά ικανοποιητικά, με τυπικό σφάλμα του ROS μικρότερο από 40% (κατά τον Wilson [1]: “we consider models successful if the relationships predict fire behavior within a factor of two or three over a range of two or three decades”).



Σχήμα 2: Αριστερά, προβλεπόμενη και μετρηθείσα θερμοκρασία (σε βαθμούς Κελσίου) στο κέντρο του πλουμίου, σε διάφορα ύψη πάνω από την κλίνη καύσης. Δεξιά, προβλεπόμενη και μετρηθείσα ταχύτητα διάδοσης φλόγας, ROS (cm/s), σε 296 πειράματα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε εδώ, αν και απαιτεί ελάχιστα δεδομένα εισόδου (μόνο τις παραμέτρους σ , β και δ της κλίνης, τη μάζα του καυσίμου w_0 , και την υγρασία του καυσίμου M_f : τυπικές τιμές των παραμέτρων αυτών είναι διαθέσιμες για τα περισσότερα πεδία καύσης), παρέχει εκτιμήσεις ικανοποιητικής ακρίβειας όλων των παραμέτρων της διεργασίας. Το μοντέλο είναι γενικό, δηλαδή ανεξάρτητο του είδους του καυσίμου, άμεσης επίλυσης (explicit), δηλαδή εξαιρετικά γρήγορο, συμβατό με το BEHAVE, και διαθέτει φυσική βάση, παρέχοντας απλές φαινομενολογικές συσχετίσεις για μια σειρά μεγεθών που μέχρι σήμερα υπολογίζονται εμπειρικά, ή με αριθμητικές προσομοιώσεις.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ

Η εργασία υποστηρίχθηκε από τη Γενική Διεύθυνση XII της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσω του Ερευνητικού Προγράμματος EFAISTOS (ENV4-CT96-0299).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Wilson RA Jr, 1990. Reexamination of Rothermel's fire spread equations in no-wind and no-slope conditions. Res. Pap. INT-434. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- [2] Porterie B, Morvan D, Loraud JC, Larini M, 2000. Firespread through fuel beds: Modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics. *Phys Fluids* 12 (7): 1762-1782.
- [3] Albin FA, 1981. A model for the wind-blown flame from a line fire. *Combust. Flame* 43: 155-174.
- [4] Papaspyros JNE, Papanicolaou PN, Kastrinakis EG, Nychas SG, 1995. Experimental simulation of turbulent dispersion of air pollutant releases. In "Air Pollution Engineering and Management", H. Power *et al.* (eds), Computational Mechanics Publications, pp. 185-192.
- [5] Papaspyros JNE, Kastrinakis EG, Nychas SG, 1997. Coherent Contribution to Turbulent Mixing of a Jet in Cross Flow. *Applied Scientific Research* 57: 291-307.
- [6] Kalabokidis K, Papaspiros I, Sideridis G, Konstantinidis P, Gounaris N, 1998. EFAISTOS Intermediate Report, September 1st 1997 to August 31st 1998. National Agricultural Research Foundation, Forest Research Institute, Forest Fire Laboratory, Thessaloniki.