Ένας Αλγόριθμος Μυρμηγκιών για τη Χωροθέτηση Προσωρινών Εγκαταστάσεων σε Εργοτάξιο

Κ. Π. ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Περίληψη
Η χωροθέτηση των εγαταστάσεων στο εργοτάξιο έχει σημαντική επίδραση στην εξοικονόμηση παραγωγικού χρόνου και κόστους, ιδίως σε μεγάλα έργα, καθώς και στην ασφάλεια των εργασιών και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευαστικής διαδικασίας. Η εργοταξιακή χωροθέτηση συνίσταται στον προσδιορισμό των προσωρινών εγκαταστάσεων που απαιτούνται για τη στήριξη των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και στην τοποθέτησή τους σε κατάλληλες τοποθεσίες. Στην εργασία το πρόβλημα της εργοταξιακής χωροθέτησης διατυπώνεται ως πρόβλημα χωροθέτησης-κατανομής. Ο στόχος είναι να προσδιοριστούν οι τοποθεσίες των εγκαταστάσεων έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος, το οποίο ισούται με το άθροισμα του κόστους κατασκευής και απομάκρυνσης μιας εγκατάστασης από μια τοποθεσία, και του κόστους μεταφοράς υλικών και μετακινήσεων του προσωπικού μεταξύ εγκαταστάσεων και χώρων εργασίας. Το πρόβλημα επιλύεται με έναν αλγόριθμο ενός συστήματος μυρμηγκιών, μια σχετικά πρόσφατα αναπτυγμένη μεταευρετική που έχει αποδειχθεί αποτελεσματική για πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης. Πραγματοποιήθηκε επίσης υπολογιστική ανάλυση σε τυχαία παραγόμενες περιπτώσεις του προβλήματος, από την οποία προσδιορίστηκαν τιμές των παραμέτρων του αλγορίθμου με τις οποίες βελτιώνεται η αποτελεσματικότητά του.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργοταξιακή χωροθέτηση συνίσταται στην ορθολογική χρήση περιορισμένου χώρου όπου θα τοποθετηθούν προσωρινές εγκαταστάσεις, οι οποίες θα συμβάλλουν στην αποτελεσματική λειτουργία του εργοταξίου. Έχοντας ως στόχο την υποστήριξη των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, οι προσωρινές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, αποθηκευτικούς χώρους, επειδή τα υλικά συχνά δεν χρησιμοποιούνται αμέσως και πρέπει να αποθηκευθούν· κτίρια διοίκησης και εγκαταστάσεις εξυπηρέτησης των εργαζομένων· εξοπλισμό, χώρους εργασίας· καθώς και δρόμους πρόσβασης και μετακίνησης προς και εντός του εργοταξίου [12].

Ο καλός σχεδιασμός είναι κρίσιμης σημασίας για την αύξηση της παραγωγικότητας στα εργοτάξια, δεδομένου ότι ο ανεπαρκής προγραμματισμός του χώρου συνεπάγεται διόγκωση του μη παραγωγικού χρόνου και αυξημένα κόστη μεταφοράς, καθώς και αναποτελεσματική χρήση των πόρων και συγκρούσεις μεταξύ υπεργολάβων. Εξάλλου, πρόσφατες μελέτες σε διάφορες χώρες αποδίδουν στην κακή οργάνωση του εργοταξίου ένα 20% των ατυχημάτων και μεγάλη σπατάλη υλικών και εργασίας [18]. Παρά τη σπουδαιότητά της, όμως, η χωροθέτηση των εγκαταστάσεων συχνά παραμελείται και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται από τους μηχανικούς εμπειρικά καθώς προχωρά η κατασκευή [7, 12].

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ο χωροταξικός σχεδιασμός εγκαταστάσεων είναι ευρύτερης σημασίας αφού αφορά γενικά τον διαμερισμό μιας περιοχής σε κέντρα εργασίας, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών των κέντρων. Υπ' αυτό το πρίσμα, η χωροθέτηση εγκαταστάσεων είναι ένα γενικό μοντέλο το οποίο, εκτός από την κατασκευαστική βιομηχανία, έχει σημαντικές εφαρμογές σε πολλούς τομείς: σχεδιασμός αρχιτεκτονικών χώρων, εργοστασιακών εγκαταστάσεων, νοσοκομείων, κέντρων υπηρεσιών και VLSI [8, 13].

Στην εργασία το πρόβλημα της χωροθέτησης προσωρινών εγκαταστάσεων στο εργοτάξιο επιλύεται με έναν αλγόριθμο μυρμηγκιών. Μολονότι η διατύπωση του προβλήματος είναι ακριβώς αυτή που προτείνεται στο [1], η υπολογιστική διαδικασία είναι εντελώς διαφορετική. Διαφορετικές υπολογιστικές διαδικασίες δικαιολογούνται από τη φύση του προβλήματος, όπως εξηγείται στην ενότητα 1.2.

1.1. Η χωροθέτηση προσωρινών εγκαταστάσεων

Το πρόβλημα της χωροθέτησης ορίζεται γενικά ως ο προσδιορισμός του σχήματος και του μεγέθους των εγκαταστάσεων που πρέπει να τοποθετηθούν, καθώς και των σχετικών θέσεων τους ώστε, αφενός, να ικανοποιούνται οι περιορισμοί ανάμεσά τους και, αφετέρου, να λειτουργούν αποτελεσματικά [23]. Διάφοροι τύποι προβλημάτων χωροθέτησης έχουν μελετηθεί. Σε ορισμένες μελέτες το πρόβλημα χωροθέτησης μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα χωροθέτησης-κατανομής: να κατανεμηθεί ένα σύνολο προκαθορισμένων εγκαταστάσεων σε ένα σύνολο προκαθορισμένων τοποθεσιών, με δεδομένο ότι η μικρότερη τοποθεσία μπορεί να φιλοξενήσει τη μεγαλύτερη

Υποβλήθηκε: 2.6.2004 Έγινε δεκτή: 11.11.2005

εγκατάσταση [1, 9, 22]. Σε άλλα μοντέλα, μια εγκατάσταση μπορεί να πάρει οποιοδήποτε σχήμα που θα καθορίσει ο χρήστης [7]. τίθενται δισδιάστατοι γεωμετρικοί περιορισμοί ανάμεσα στις εγκαταστάσεις [23]. μία το πολύ εγκατάσταση μπορεί να εγκατασταθεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή ώστε να αποφεύγονται αλληλοκαλύψεις και ορισμένες εγκαταστάσεις δεν μπορούν να τοποθετούνται σε συγκεκριμένη απόσταση η μια από άλλες [12]. Η χωροθέτηση μπορεί επίσης να είναι δυναμική, με την έννοια ότι η διάταξη των εγκαταστάσεων αλλάζει καθώς προχωρά η κατασκευή [2, 24]. Επειδή τα κριτήρια της χωροθέτησης είναι γενικά περισσότερα του ενός, το πρόβλημα μπορεί επίσης να διατυπωθεί ως πολυκριτηριακό πρόβλημα αποφάσεων, όπως στο [17] όπου συνδυάζονται κρίσεις ειδικών με ένα σύστημα στήριξης αποφάσεων. Τέλος, σε άλλα μοντέλα η εκτίμηση της διαθεσιμότητας και των αναγκών σε χώρο γίνεται κατά τον χρονοπρογραμματισμό των δραστηριοτήτων, είτε κατά διαδραστικό (interactive) τρόπο με τον χρήστη είτε με μια πλήρως αυτοματοποιημένη υπολογιστική διαδικασία [19, 20].

1.2. Μέθοδοι επίλυσης

Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την επίλυση του προβλήματος της χωροθέτησης εγκαταστάσεων. Το πρόβλημα της χωροθέτησης ανήκει στα NP-hard προβλήματα [14, 15, 24]. Ως εκ τούτου, η χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης περιορίζεται σε προβλήματα σχετικά μικρών διαστάσεων, ενώ για μεγάλων διαστάσεων προβλήματα χρησιμοποιούνται ευρετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι αντίθετα με τους ακριβείς αλγόριθμους βελτιστοποίησης, δεν εξασφαλίζουν την εύρεση της βέλτιστης λύσης ή υβριδικοί αλγόριθμοι, που συνδυάζουν ευρετικές και ακριβείς μεθόδους, με τους οποίους επιδιώκεται να βρεθούν ικανοποιητικές λύσεις σε αποδεκτό υπολογιστικό χρόνο [14, 15, 24]. Κεντρικό χαρακτηριστικό των ευρετικών προσεγγίσεων είναι, πρώτον, η αξιοποίηση χαρακτηριστικών του προβλήματος όσον αφορά τα κριτήρια και τη σειρά με την οποία επιλέγονται οι υποψήφιες λύσεις και επαληθεύονται οι περιορισμοί. Δεύτερον, ενδέχεται στο ίδιο πρόβλημα αλλά για ορισμένες τιμές των παραμέτρων να παρέχει καλύτερες λύσεις κάποιος ευρετικός αλγόριθμος ενώ για άλλες τιμές άλλος ευρετικός αλγόριθμος. Γενικά, διάφορες ευρετικές έχουν διατυπωθεί σε εφαρμογές της επιχειρησιακής έρευνας και της τεχνητής νοημοσύνης για τον προγραμματισμό του χώρου [3, 8, 21, 24].

Τα τελευταία χρόνια προτάθηκαν νέες υπολογιστικές τεχνικές, κυρίως μεταευρετικοί αλγόριθμοι. Ο I. C. Yeh χρησιμοποίησε μια υβριδική διαδικασία, στην οποία συνδυάζονται τεχνητά νευρονικά δίκτυα και προσομοιωμένη ανόπτηση [22]. Πάντως, κυρίως εφαρμόστηκαν γενετικοί αλγόριθμοι για την επίλυση του προβλήματος της χωροθέτησης των εγκαταστάσεων με ή χωρίς γεωμετρικούς περιορισμούς [7, 9, 12, 23].

Πρόσφατα εφαρμόστηκε η *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) για την επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης. Ο παραδοσιακός GRASP αλγόριθμος εμπλουτίστηκε με έναν μηχανισμό μάθησης και με μια συνάρτηση μεροληψίας (bias function) για τον προσδιορισμό του επόμενου στοιχείου το οποίο θα εισέρχεται στην τρέχουσα λύση [1]. Μολονότι η διατύπωση του προβλήματος που επιλύεται στην παρούσα εργασία είναι ίδια με εκείνη της [1], η υπολογιστική διαδικασία είναι εντελώς διαφορετική. Ο GRASP αλγόριθμος και τα συστήματα μυρμηγκιών είναι δύο εντελώς διαφορετικοί μεταευρετικοί αλγόριθμοι. Η μεταευρετική GRASP είναι μια επαναληπτική διαδικασία η οποία αποτελείται από δύο φάσεις: α. Τη *φάση της κατασκευής* στην οποία κατασκευάζεται μια εφικτή λύση με έναν «λαίμαργο» (greedy) αλγόριθμο. β. Τη *φάση της τοπικής αναζήτησης* στην οποία βελτιώνεται η εφικτή λύση εξετάζοντας συστηματικά τη γειτονιά της [16]. Ο GRASP δουλεύει με μία λύση κάθε φορά την οποία βελτιώνει τοπικά, ενώ στους αλγόριθμους μυρμηγκιών η βελτίωση απορρέει, όπως θα εξηγηθεί στην ενότητα 3, από την ταυτόχρονη εξέλιξη ενός πληθυσμού λύσεων.

2. ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στην παρούσα εργασία αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της εγκατάστασης ενός συνόλου n προκαθορισμένων εγκαταστάσεων σε n προκαθορισμένες τοποθεσίες στο εργοτάξιο. Κάθε εγκατάσταση πρέπει να τοποθετηθεί σε μία και μόνο μία τοποθεσία, και κάθε τοποθεσία πρέπει να αντιστοιχηθεί σε μία και μόνο μία εγκατάσταση. Υποθέτουμε ότι κάθε μία από τις προκαθορισμένες τοποθεσίες μπορεί να φιλοξενήσει οποιαδήποτε εγκατάσταση.

Το πρόβλημα της χωροθέτησης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\min TC = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} c_{ik}x_{ik} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n}\sum_{r=1}^{v} p_{ijr}q_{ijr}d_{kl}x_{ik}x_{jl} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{l=1}^{n} u_{ij}f_{ij}d_{kl}x_{ik}x_{jl} \quad (1)$$

με περιορισμούς

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ik} = 1 \qquad k = 1,\ldots,n \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{n} x_{ik} = 1 \qquad i = 1,\ldots,n \quad (3)$$

$$x_{ik} = 0-1 \qquad i,k = 1,\ldots,n \quad (4)$$

όπου:

TC : συνολικό κόστος

x_{ik} = 1 αν η εγκατάσταση i τοποθετείται στην τοποθεσία k, 0 ειδάλλως.

c_{ik} : κόστος κατασκευής και απομάκρυνσης της εγκατάστασης i όταν τοποθετείται στην τοποθεσία k.

d_{kl} : απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών k και l.

p_{ijr} : κόστος μετακίνησης ανά μονάδα απόστασης μιας μονάδας του υλικού r από την εγκατάσταση i στην j (ν υλικά).

q_{ijr} : ποσότητα του υλικού r μετακινούμενη από την εγκατάσταση i στην j.

f_{ij} : συχνότητα των μετακινήσεων του προσωπικού από την εγκατάσταση i στην j.

u_{ij} : κόστος μετακίνησης ανά μονάδα απόστασης μιας μετακίνησης προσωπικού από την εγκατάσταση i στην j.

Ο στόχος είναι να βρεθεί μια κατανομή των εγκαταστάσεων στις τοποθεσίες, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος TC (σχ. 1).

Στο συνολικό κόστος ο πρώτος όρος είναι το συνολικό κόστος κατασκευής και απομάκρυνσης των εγκαταστάσεων· ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει το συνολικό κόστος μεταφοράς των υλικών μεταξύ των εγκαταστάσεων· και ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει το συνολικό κόστος μετακίνησης του προσωπικού μεταξύ των εγκαταστάσεων. Οι δύο πρώτοι περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι μία και μόνο μία εγκατάσταση θα τοποθετηθεί σε μία και μόνο μία τοποθεσία (σχ. 2 και 3), ενώ οι σχέσεις (4) καθορίζουν ότι οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν μία από τις δύο τιμές 0 ή 1.

Δύο παρατηρήσεις σχετικά με τη διατύπωση του προβλήματος. Πρώτον, το μοντέλο με μικρές προσαρμογές μπορεί να ενσωματώσει διάφορες πρόσθετες απαιτήσεις. Για παράδειγμα: α. Αν μια τοποθεσία δεν ταιριάζει σε μια εγκατάσταση, εξαιτίας είτε του σχήματος είτε του μεγέθους της, ο συνδυασμός μπορεί να αποκλειστεί από την τελική λύση αν θεωρήσουμε ένα πολύ υψηλό κατασκευαστικό κόστος για την εγκατάσταση. β. Αν ο αριθμός των τοποθεσιών είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των εγκαταστάσεων, μπορούν να προστεθούν πλασματικές εγκαταστάσεις με μηδενικό κόστος κατασκευής και μεταφοράς.

Δεύτερον, κανένας περιορισμός δεν τίθεται όσον αφορά τη γεωμετρία των εγκαταστάσεων ή των σχετικών θέσεων των εγκαταστάσεων. Παρά την απλοποίηση αυτή, η προτεινόμενη διατύπωση εμπερικλείει ένα από τα «δυσκολότερα» προβλήματα της συνδυαστικής βελτιστοποίησης, το τετραγωνικό *πρόβλημα εκχώρησης* (quadratic assignment problem), του οποίου μερική περίπτωση είναι το γνωστό πρόβλημα του «περιοδεύοντος πωλητή» (the traveling salesman problem) [14, 15].

Εγκατάσταση \ τοποθεσία	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	0
3	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1
5	0	0	0	1	0

Σχήμα 1: Πίνακας διατάξεων με 5 εγκαταστάσεις.
Figure 1: Permutation matrix with 5 facilities.

Μια εφικτή λύση ορίζεται ως μια (πλήρης) διάταξη, δηλαδή όταν κάθε εγκατάσταση τοποθετηθεί σε μία και μόνο μία τοποθεσία. Μπορεί να παρασταθεί με έναν n×n πίνακα εγκαταστάσεων-τοποθεσιών, στον οποίο κάθε γραμμή και στήλη περιλαμβάνει ακριβώς ένα στοιχείο ίσο με 1, τα δε άλλα στοιχεία είναι ίσα με 0 (σχήμα 1). Φυσικά είναι αδύνατον να απαριθμηθούν όλες οι εφικτές λύσεις, να υπολογιστεί το συνολικό κόστος κάθε μιας και να επιλεγεί η καλύτερη, αφού ο αριθμός των εφικτών λύσεων είναι ίσος με n!. Μόνο για n = 13 θέσεις ο αριθμός των δυνατών λύσεων είναι 6.227.020.800.

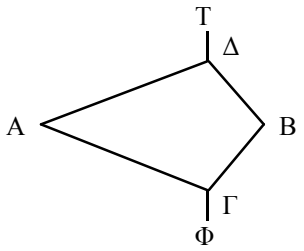
Μέχρι σήμερα, προβλήματα μεγέθους n > 20, όταν επιδιώκεται η βέλτιστη λύση, δεν είναι πρακτικά επιλύσιμα από υπολογιστική άποψη [10]. Ως εκ τούτου, η προσοχή των ερευνητών έχει πλέον στραφεί στην ανάπτυξη ευρετικών για την εύρεση ικανοποιητικών λύσεων.

3. ΑΠΟΙΚΙΕΣ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η ανακάλυψη μεγάλου αριθμού προβλημάτων κατά την τελευταία τριακονταετία για τα οποία δεν φαίνεται ότι μπορεί να βρεθεί «καλός» αλγόριθμος, δηλαδή αλγόριθμος που θα βρίσκει τη βέλτιστη λύση σε αποδεκτό υπολογιστικό χρόνο, έδωσε αποφασιστική ώθηση στην ανάπτυξη ευρετικών αλγορίθμων [14, 15]. Ειδικότερα, τα τελευταία χρόνια υπήρξε εκρηκτική ανάπτυξη των λεγόμενων μεταευρετικών αλγορίθμων, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, η προσομοιωμένη ανόπτηση (simulated annealing), η ταμπού αναζήτηση (tabu search) [15].

Στην ίδια κατηγορία ανήκουν οι αλγόριθμοι μυρμηγκιών (ant algorithms), οι οποίοι προτάθηκαν σχετικά πρόσφατα, αλλά έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικοί στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Στην κατεύθυνση αυτή αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι «πράγματι, η βελτιστοποίηση μέσω των αποικιών μυρμηγκιών επιδιώκεται να είναι μια προσέγγιση μηχανικού στον σχεδιασμό και την εγκατάσταση των συστημάτων λογισμικού για την επίλυση των δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης» [5].



Σχήμα 2: Ένα παράδειγμα με τεχνητά μυρμήγκια.
Figure 2: An example with artificial ants.

3.1. Συστήματα τεχνητών μυρμηγκιών

Αναπτυγμένοι από τον M. Dorigo και τους συνεργάτες του, οι αλγόριθμοι και γενικότερα τα συστήματα μυρμηγκιών είναι εμπνευσμένα από τη συμπεριφορά των πραγματικών μυρμηγκιών [3, 4, 5, 6, 11]. Ένα ζήτημα που απασχόλησε τους ερευνητές ήταν με ποιον τρόπο τα πραγματικά μυρμήγκια καταφέρνουν να βρουν, μολονότι σχεδόν τυφλά, τη συντομότερη διαδρομή από τη φωλιά τους προς μια πηγή τροφής. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι τα μυρμήγκια ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους προκειμένου να επιλέξουν τη διαδρομή που θα ακολουθήσουν, χρησιμοποιώντας ως μέσο ίχνη φερομόνης (pheromone), μια ουσία που αφήνει στο έδαφος κάθε μυρμήγκι. Όταν μετακινούμενο εντοπίσει ίχνος φερομόνης, ένα μυρμήγκι αποφασίζει με μεγάλη πιθανότητα να ακολουθήσει το ίχνος αυξάνοντας την ποσότητα της φερομόνης σε τούτη τη διαδρομή. Πρόκειται για αυτοενισχυόμενη διαδικασία με την έννοια ότι όσο περισσότερα μυρμήγκια έχουν ακολουθήσει μια διαδρομή, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα ένα άλλο μυρμήγκι να ακολουθήσει την ίδια διαδρομή. Δεδομένου ότι η ποσότητα στη συντομότερη διαδρομή αυξάνεται ταχύτερα, σχετικά γρήγορα όλα τα μυρμήγκια καταλήγουν να επιλέγουν αυτή τη διαδρομή.

Για παράδειγμα, υποθέτουμε ότι μυρμήγκια μετακινούνται από τη φωλιά τους Φ προς την πηγή τροφής Τ και επιστρέφουν στη φωλιά τους, έχοντας να επιλέξουν μία από δύο δυνατές διαδρομές (σχήμα 2). Έστω ότι η διαδρομή Φ-Γ-Β-Δ-Τ είναι συντομότερη από τη διαδρομή Φ-Γ-Α-Δ-Τ. Κατ' ανάγκη, τα μυρμήγκια που μετακινούνται από το Φ προς Τ (Τ προς Φ) θα πρέπει στο σημείο Γ (σημείο Δ) να αποφασίσουν αν θα στραφούν προς τα αριστερά ή τα δεξιά. Κατά τη μετακίνησή τους, τα μυρμήγκια εναποθέτουν μια ποσότητα φερομόνης στο έδαφος, η οποία εξατμίζεται με έναν ορισμένο ρυθμό. Τα πρώτα μυρμήγκια που φθάνουν στο Γ, στρίβουν αριστερά ή δεξιά με πιθανότητα 0,5. Έκτοτε, επειδή η διαδρομή ΓΑΔ είναι μακρύτερη, μέρος της ποσότητας της φερομόνης εξατμίζεται, η διαδρομή ΓΒΔ περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα φερομόνης και, επομένως, τα μυρμήγκια κατά την επιστροφή τους επιλέγουν στο Δ τη διαδρομή ΔΒΓ με μεγαλύτερη πιθανότητα από αυτή της διαδρομής ΔΑΓ. Η κατάσταση αυτή επαναλαμβάνεται πηγαίνοντας από το Φ στο Τ, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο την πιθανότητα επιλογής της διαδρομής ΓΒΔ (και ΔΒΓ). Τελική κατάληξη είναι να επιλέγεται η συντομότερη διαδρομή με πιθανότητα ίση με 1, αν υπάρξει επαρκής αριθμός μετακινήσεων.

Σε κάθε περίπτωση, η επίλυση ενός υπολογιστικού προβλήματος βασίζεται σε μια ελεύθερη μεταφορική χρήση της πραγματικής συμπεριφοράς μιας αποικίας μυρμηγκιών. Κατά την περιγραφή των αλγορίθμων, είναι τρέχουσα πρακτική να χρησιμοποιούνται όροι (π.χ. φερομόνη, εξάτμιση, διαδρομή) οι οποίοι προφανώς ουδεμία σχέση έχουν με το μελετούμενο πρόβλημα.

Η συμπεριφορά ενός τεχνητού μυρμηγκιού κατά την επίλυση ενός προβλήματος καθορίζεται κατά κανόνα από δύο παραμέτρους. Πρώτον, από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προβλήματος. Δεύτερον, από πληροφορίες που έχουν συγκεντρωθεί μέχρι σε ένα ορισμένο στάδιο της υπολογιστικής διαδικασίας από τις διαδρομές (λύσεις) των άλλων μυρμηγκιών.

4. ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Για την επίλυση του προβλήματος της παρούσας εργασίας ακολουθείται η εξής διαδικασία. Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα σύστημα m (τεχνητών) μυρμηγκιών.

Ερμηνεύουμε τη «διαδρομή» ενός μυρμηγκιού ως συνδυασμό εκχωρήσεων εγκαταστάσεων σε τοποθεσίες, τις οποίες εκχωρήσεις μπορούμε να χαρακτηρίσουμε ως «μετακινήσεις». Μια «πλήρης διαδρομή» ενός μυρμηγκιού αντιστοιχεί σε μια διάταξη-λύση του προβλήματος, δηλαδή κάθε εγκατάσταση έχει εκχωρηθεί σε μία και μόνο μία τοποθεσία. Το κόστος μιας πλήρους διαδρομής υπολογίζεται από την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Όταν ένα μυρμήγκι επιλέγει να εκχωρήσει την εγκατάσταση j στην τοποθεσία i, στις επόμενες εκχωρήσεις και μέχρι να ολοκληρωθεί η πλήρης διαδρομή του δεν είναι πλέον διαθέσιμες η εγκατάσταση j και η τοποθεσία i.

Σε έναν κύκλο εκχωρήσεων της αλγοριθμικής διαδικασίας κάθε μυρμήγκι ολοκληρώνει μια πλήρη διαδρομή, δηλαδή κατασκευάζονται m εφικτές λύσεις. Η αλγοριθμική διαδικασία ολοκληρώνεται όταν συμπληρωθεί ένας προκαθορισμένος από τον χρήστη αριθμός επαναλήψεων των κύκλων εκχωρήσεων.

4.1. Συμβολισμοί

μετεπ	μετρητής των επαναλήψεων
μετκυκ	μετρητής των κύκλων
μ	μετρητής των μυρμηγκιών (max μ = m)
ΒΕΛΤΙΣΤΗΛΥΣΗ	η καλύτερη γνωστή λύση, συνολικού κόστους TC^{min}

ΧΠΕ	ο αλγόριθμος Χωροθέτησης Προσωρινών Εγκαταστάσεων
λισταεγκ(μ)	η λίστα με τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις για το μυρμήγκι μ
λιστατοπ(μ)	η λίστα με τις διαθέσιμες τοποθεσίες για το μυρμήγκι μ
α	στθ στάθμισης < 1
ε	στθ < 1, τέτοια ώστε το (1 - ε) να αντιπροσωπεύει το ποσοστό της εξάτμισης της φερεμόνης
n	αριθμός των εγκαταστάσεων, αριθμός των τοποθεσιών
Ψ	ο πίνακας των ανώτερων φραγμάτων των λύσεων
Φ	ο πίνακας της φερεμόνης

4.2. Ο αλγόριθμος

Στην τυπική του μορφή ο αλγόριθμος έχει ως εξής:

Αλγόριθμος ΧΠΕ
{μετεπ: μετρητής των επαναλήψεων,
μετκυκ: μετρητής των κύκλων
ΒΕΛΤΙΣΤΗΛΥΣΗ: η καλύτερη γνωστή λύση,
συνολικού κόστους TC^{min}}
μετεπ = 0
TC^{min} = άπειρο
για κάθε εκχώρηση (i, j), θέσε Φ_{ij} (μετεπ) = στθ
ενόσω μετεπ ≤ maxεπ
μετεπ = μετεπ + 1
προσάρμοσε τις λίστες λισταεγκ(μ) και λιστατοπ(μ) όλων των μυρμηγκιών {για κάθε μυρμήγκι είναι διαθέσιμες όλες οι εκχωρήσεις και τοποθεσίες}
από μετκυκ = 1 μέχρι μετκυκ = n κάνε
από μ = 1 μέχρι μ = m κάνε
καθόρισε την επόμενη μετακίνηση (i, j)
λισταεγκ(μ) = λισταεγκ(μ) –{i}
λιστατοπ(μ) = λιστατοπ(μ) –{j}
τέλοςαπό
τέλοςαπό
υπολόγισε το κόστος κάθε μίας από τις m λύσεις και έστω ΒΕΛΤΙΣΤΗ(μετκυκ) η καλύτερη από αυτές με συνολικό κόστος $TC^{ΒΕΛΤΙΣΤΗ(μετκυκ)}$
αν $TC^{ΒΕΛΤΙΣΤΗ(μετκυκ)} < TC^{min}$ τότε
$TC^{min} = TC^{ΒΕΛΤΙΣΤΗ(μετκυκ)}$
ΒΕΛΤΙΣΤΗΛΥΣΗ = ΒΕΛΤΙΣΤΗ(μετκυκ)
τέλοςαν
ενημέρωσε τον πίνακα της φερομόνης Φ
τέλοςενόσω
τύπωσε τη βέλτιστη λύση

1. Βρόχος /ενόσω-τέλοςενόσω/. Η όλη υπολογιστική διαδικασία επαναλαμβάνεται κατά έναν προκαθορισμένο αριθμό maxεπ επαναλήψεων.
2. Βρόχος /από μετκυκ = 1 μέχρι μετκυκ = n/. Στον βρόχο αυτό πραγματοποιείται μια πλήρης διαδρομή για κάθε μυρμήγκι. Κάθε κύκλος περιλαμβάνει n βήματα. Σε ένα βήμα γίνονται m εκχωρήσεις, μία για κάθε μυρμήγκι. Στην αρχή κάθε κύκλου και για κάθε μυρμήγκι είναι διαθέσιμες όλες οι δυνατές εκχωρήσεις.
3. Βρόχος /από μ = 1 μέχρι μ = m/. Στον βρόχο γίνεται για κάθε μυρμήγκι μια «μετακίνηση», δηλαδή εκχώρηση μιας εγκατάστασης σε μια τοποθεσία. Η λισταεγκ(μ) (λιστατοπ(μ)) είναι η λίστα των εγκαταστάσεων (τοποθεσιών) που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ακόμη από το συγκεκριμένο μυρμήγκι μ. Αν το μυρμήγκι μ επιλέξει την εκχώρηση (i, j), τότε στις επόμενες εκχωρήσεις του τρέχοντος κύκλου και για το συγκεκριμένο μυρμήγκι δεν είναι διαθέσιμη ούτε η εγκατάσταση i ούτε η τοποθεσία j.

4.3. Η επιλογή των εκχωρήσεων

Η επιλογή των εκχωρήσεων βασίζεται σε έναν συνδυασμό της ελκυστικότητας μιας εκχώρησης με βάση: α. Το πόσο συχνά χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της αλγοριθμικής διαδικασίας, δηλαδή πόσο συχνά αποτελεί μέρος των λύσεων. β. Ποιο είναι το σχετικό κόστος της εκχώρησης.

Έστω Φ ένας $n \times n$ πίνακας εγκαταστάσεων-τοποθεσιών. Ο πίνακας Φ είναι ο πίνακας της φερεμόνης. Συμβολίζουμε Φ_{ij} (μετεπ) την ποσότητα της φερεμόνης που έχει συσσωρευθεί στον συνδυασμό (i, j) έως την επανάληψη μετεπ. Στην επόμενη επανάληψη ο πίνακας Φ αναπροσαρμόζεται ως εξής:

$$\Phi_{ij}(\mu\varepsilon\tau\varepsilon\pi+1) = \varepsilon \times \Phi_{ij}(\mu\varepsilon\tau\varepsilon\pi) + \sum \varphi_{ij}^{\mu} \qquad (5.1)$$

όπου

ε = στθ <1, τέτοια ώστε (1 – ε) να είναι η % εξάτμιση κατά τη διάρκεια της επανάληψης. Το ε επιλέγεται μικρότερο της μονάδας ώστε να μην υπάρξει απεριόριστη συσσώρευση φερομόνης

$$\varphi_{ij}^{\mu} = \begin{cases} TC^{ΒΕΛΤΙΣΤΗ(μετκυκ)} / TC^{\mu} & \text{αν το μυρμήγκι } \mu \\ & \text{χρησιμοποιεί τον συνδυασμό (i, j)} \\ 0 & \text{ειδάλλως} \end{cases}$$

$TC^{ΒΕΛΤΙΣΤΗ(μετκυκ)}$ είναι το κόστος της καλύτερης λύσης που βρέθηκε στον τρέχοντα κύκλο και TC^{μ} είναι το κόστος της λύσης του μυρμηγκιού μ επίσης στον τρέχοντα κύκλο. Όσο καλύτερη είναι μια λύση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της φερομόνης που εναποτίθεται σε έναν συνδυασμό (i, j) που χρησιμοποιεί.

Η επιλογή μιας εκχώρησης γίνεται με βάση την πιθανότητα, όπως υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

$$\text{prob}_{ij}^{\mu} = \alpha\varphi_{ij} + (1-\alpha)\psi_{ij} \qquad (5.2)$$

αφού πρώτα κανονικοποιηθούν τα αθροίσματα ως προς τις λίστες λισταεγκ(μ) και λιστατοπ(μ).

Το στοιχείο ψ_{ik} λαμβάνεται από τον πίνακα Ψ ο οποίος κατασκευάζεται ως εξής: Σχηματίζουμε έναν πίνακα εγκαταστάσεων-εγκαταστάσεων, στον οποίο το στοιχείο του (i, j) να είναι ίσο με το συνολικό κόστος μετακίνησης όλων των υλικών και όλου του προσωπικού μεταξύ των εγκαταστάσεων i και j:

$$f_{ij} \times u_{ij} + \sum_r p_{ijr} \times q_{ijr}$$

Αθροίζοντας τα στοιχεία κάθε γραμμής αποκτούμε ένα *n×1* διάνυσμα Π1. Το στοιχείο της *i* γραμμής είναι ένα ανώτερο φράγμα του κόστους των μετακινήσεων υλικών και προσωπικού από την εγκατάσταση *i*. Παράδειγμα:

	Εγκαταστάσεις						
Εγκαταστάσεις	0	5	4	3	2		**14**
	5	0	3	2	1		**11**
	4	3	0	9	8	**Π1 =**	**24**
	3	2	9	0	7		**21**
	2	1	8	7	0		**18**

Παρομοίως, αθροίζοντας τα στοιχεία κάθε γραμμής του πίνακα των αποστάσεων τοποθεσιών-τοποθεσιών αποκτούμε επίσης ένα *n×1* διάνυσμα Π2. Το στοιχείο της *j* γραμμής είναι ένα ανώτερο φράγμα των αποστάσεων της τοποθεσίας *j* από όλες τις άλλες τοποθεσίες. Παράδειγμα:

	τοποθεσίες						
τοποθεσίες	0	30	40	50	60		**180**
	30	0	30	60	90		**210**
	40	30	0	70	80	**Π2=**	**220**
	50	60	70	0	90		**270**
	60	90	80	90	0		**320**

Πολλαπλασιάζοντας το διάνυσμα Π1 με καθένα από τα στοιχεία του διανύσματος Π2 αποκτούμε έναν n×n πίνακα, ανώτερο φράγμα κάθε διάταξης.

		Τοποθεσίες				
Π =	εγκαταστάσεις	2.520	1.980	4.320	3.780	3.240
		2.940	2.310	5.040	4.410	3.780
		3.080	2.420	5.280	4.620	3.960
		3.780	2.970	6.480	5.670	4.860
		4.480	3.520	7.680	6.720	5.760

Προσθέτοντας το κόστος κατασκευής και απομάκρυνσης c_{ik} της εγκατάστασης *i* όταν τοποθετείται στην τοποθεσία *k* σε κάθε στοιχείο του πίνακα Π παίρνουμε τον πίνακα Ψ.

Παράδειγμα:

	τοποθεσίες				
Εγκαταστάσεις	0	200	0	100	0
	0	0	100	0	0
	150	0	0	0	0
	0	50	0	0	0
	0	0	0	0	100

		τοποθεσίες				
Ψ =	εγκαταστάσεις	2.520	2.180	4.320	3.880	3.240
		2.940	2.310	5.140	4.410	3.780
		3.230	2.420	5.280	4.620	3.960
		3.780	3.020	6.480	5.670	4.860
		4.480	3.520	7.680	6.720	5.860

Η κατασκευή μιας πλήρους διάταξης γίνεται ως εξής: Στην αρχή ενός κύκλου, όλοι οι συνδυασμοί εγκαταστάσεων-τοποθεσιών είναι δυνατοί (οι λίστες λισταεγκ(μ) και λιστατοπ(μ) είναι πλήρεις). Κατασκευάζεται η κατανομή πιθανότητας με βάση τις πιθανότητες, όπως υπολογίζονται από τη σχέση (5.2) για όλα τα (i, j) που επιτρέπονται από τις λισταεγκ(μ) και λιστατοπ(μ). Επιλέγεται ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ 0 και 1 και με βάση την κατανομή της πιθανότητας επιλέγεται ο συνδυασμός (i, j). Κατόπιν τα *i* και *j* διαγράφονται από τις αντίστοιχες λίστες και η διαδικασία της επιλογής επαναλαμβάνεται εξαρχής στις αναπροσαρμοσμένες λίστες.

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ο αλγόριθμος ΧΠΕ προγραμματίστηκε σε Visual Basic και έτρεξε σε προσωπικό υπολογιστή με επεξεργαστή Pentium 4 στα 3 GHz. Πρωταρχικός στόχος της υπολογιστικής ανάλυσης ήταν ο προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων που παρέχουν την καλύτερη λύση. Για τον σκοπό αυτό, επιλύθηκαν τυχαίες περιπτώσεις του προβλήματος που δημιουργήθηκαν αλγοριθμικά. Κάθε συγκεκριμένη περίπτωση επιλύθηκε για διάφορες τιμές μιας παραμέτρου, ενώ οι άλλες διατηρούνταν σταθερές.

Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής ανάλυσης συνοψίζονται στα εξής:

- *Παράμετρος α*: Λύθηκαν 100 περιπτώσεις για τυχαίες τιμές του n επιλεγμένες στο διάστημα 25-50, σταθερές τιμές ε = 0,95, m = 2n, maxep = 4n και τιμές του α μεταβαλλόμενες από 0,05 έως 0,95 με βήμα 0,05 (19 περιπτώσεις × 100 = 1900). Σε κάθε περίπτωση και για κάθε α, η ακολουθία των τυχαίων αριθμών διατηρείται σταθερή. Το μικρότερο κόστος προέκυψε από την τιμή α = 0,80.

- *Παράμετρος ε*: Λύθηκαν 100 περιπτώσεις για τυχαίες τιμές του n επιλεγμένες στο διάστημα 25-50, σταθερές τιμές α = 0,80, m = 2n, maxep = 4n και τιμές του ε από 0,05 έως 0,95 με βήμα 0,05 (19 περιπτώσεις × 100 = 1900). Σε κάθε περίπτωση για κάθε ε, η ακολουθία των τυχαίων αριθμών διατηρείται σταθερή. Το μικρότερο κόστος προέκυψε από την τιμή ε = 0,30.

Σημειώνεται ότι τόσο για το α όσο και για το ε οι διαφορές στο κόστος και στον χρόνο εκτέλεσης είναι πολύ μικρές και δείχνουν τυχαίες.

- *Παράμετρος m*: Λύθηκαν 100 περιπτώσεις για τυχαίες τιμές του n επιλεγμένες στο διάστημα 25-50, σταθερές τιμές α = 0,80, ε = 0,30, maxep = 4n και τιμές του m από n έως 3n με βήμα 0,5n (5 περιπτώσεις × 100 = 500). Σε κάθε περίπτωση για κάθε m, η ακολουθία των τυχαίων αριθμών δεν είναι δυνατό να διατηρηθεί σταθερή. Το μικρότερο κόστος προέκυψε από την τιμή m = 3n.
- *Παράμετρος maxep*: Λύθηκαν 100 περιπτώσεις για τυχαίες τιμές του n επιλεγμένες στο διάστημα 25-50, σταθερές τιμές α = 0,80, ε = 0,30, m = 3n και τιμές του maxep από n έως 5n με βήμα 0,5n (9 περιπτώσεις × 100 = 900). Σχετικά με την ακολουθία των τυχαίων αριθμών, αν και δεν μπορεί να διατηρηθεί σταθερή για κάθε τιμή του maxep, ισχύει το εξής: Σε κάθε περίπτωση για maxep = 4n, οι πρώτες n επαναλήψεις έχουν την ίδια ακολουθία αριθμών με την περίπτωση όπου maxep = n. Οι πρώτες 2n επαναλήψεις έχουν την ίδια ακολουθία αριθμών με την περίπτωση όπου maxep = 2n κ.ο.κ. Το μικρότερο κόστος προέκυψε από την τιμή maxep = 4n.

Για τα m και maxep τα αποτελέσματα είναι τα προσδοκώμενα. Μικρότερο κόστος παρατηρείται για τα μέγιστα m και maxep, ο δε χρόνος εκτέλεσης αυξάνεται αναλογικά, δηλαδή μια περίπτωση με m = 3n χρειάζεται περίπου τριπλάσιο χρόνο σε σχέση με μια περίπτωση με m = n.

Όσον αφορά τον απαιτούμενο χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου, σημειώνεται ότι ο μέσος απαιτηθείς χρόνος για σταθερές τιμές α = 0,80, ε = 0,30, m = 3n και maxep = 4n ήταν: α. 38,7940 δευτερόλεπτα για n = 25 και β. 1152,3623 δευτερόλεπτα για n = 50. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, ο απαιτούμενος χρόνος διακυμάνθηκε μεταξύ των δύο αυτών ακραίων τιμών.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κακή χωροταξική κατανομή των προσωρινών εγκαταστάσεων στο εργοτάξιο είναι αιτία για μείωση της παραγωγικότητας, αναποτελεσματική χρήση των πόρων, συγκρούσεις μεταξύ υπεργολάβων και εργατικά ατυχήματα.

Στην εργασία η εργοταξιακή χωροθέτηση διατυπώθηκε ως πρόβλημα χωροθέτησης-κατανομής, για την επίλυση του οποίου αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος μυρμηγκιών. Στον αλγόριθμο μια αποικία τεχνητών μυρμηγκιών κατασκευάζει εφικτές λύσεις, από τις οποίες αντλούνται πληροφορίες για την κατασκευή της επόμενης οικογένειας λύσεων. Ως εκ της κατασκευής του, ο αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα σε ένα σύστημα παράλληλης επεξεργασίας με σημαντική βελτίωση στις χρονικές επιδόσεις του.

Τέλος, σημειώνεται ότι, πρώτον, οι τιμές των παραμέτρων στο μοντέλο δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν και, συνεπώς, η συνεργασία με έμπειρους εργοταξιακούς μηχανικούς είναι απαραίτητη. Δεύτερον, ο προγραμματισμός του αλγορίθμου, δίχως να είναι δύσκολος, είναι σχετικά επίπονος. Για να διευκολυνθεί η χρήση του αλγορίθμου, αναπτύσσεται ένα πρόγραμμα γραμμένο σε VB και VBA, το οποίο θα λειτουργεί ως πρόσθετο στο Microsoft Excel.

Ευχαριστίες. Ευχαριστώ τον Φ. Φιλίππου, Πολιτικό Μηχανικό του Δ.Π.Θ., για τη βοήθειά του στην υπολογιστική ανάλυση του αλγορίθμου.

7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Anagnostopoulos K. P., "A Reactive Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for Construction-Site Layout" in S. M. Ahmed, I. Ahmed, S. L. Tang, S. Azhar (eds.), **Proceedings of the 2nd International Conference on Construction in the 21st Century: "Sustainability and Innovation in Management and Technology"**, 2003 (CD).
2. Cheng M. Y., O'Connor J. T., "ArcSite: Enhanced GIS for Construction Site Layout", **Journal of Construction Engineering and Management**, 122, 4, 1996, 329–336.
3. Dorigo M., Bonabeaub E., Theraula G., "Ant Algorithms and Stigmergy", **Future Generation Computer Systems**, 16, 2000, 851–871.
4. Dorigo M., Di Caro G., "The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic" in D. Come, M. Dorigo, F. Glover (eds.), **New Ideas in Optimization**, McGraw-Hill, London, 1999, 11–32.
5. Dorigo M., Di Caro G., Gambardella L. M., "Ant Algorithms for Discrete Optimization", **Artificial Life**, 5, 3, 1999, 137-172.
6. Dorigo M., Maniezzo, V., Colorni A., "The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents", **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B**, 26, 1, 1996, 1-13.
7. Hegazy T., Elbeltagi E., "EVOSITE: Evolution-Based Model for Site Layout Planning", **Journal of Computing in Civil Engineering**, 13, 3, 1999, 198-206.
8. Kusiak, A., Heragu S. S., "The Facility Layout Problem", **European Journal of Operational Research**, 29, 1987, 229–251.
9. Li H., Love P. (1998), "Site-Level Facilities Layout using Genetic Algorithms", **Journal of Computing in Civil Engineering**, 12, 4, 1998, 227–231.
10. Li Y., Pardalos P. M., Resende M. G. C., "A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for the Quadratic Assignment Problem", in P. M. Pardalos, H. Wolkowicz (eds.), **Quadratic Assignment and Related Problems**, DIMACS Series on Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 16, 1994, 237-261.
11. Maniezzo V., Carbonaro A., "Ant Colony Optimization: An Overview" in C. Ribeiro (eds.) **Essays and Surveys in Metaheuristics**, Kluwer, 2001, 21-44.
12. Mawdesley M. J., Al-jibouri S. H., Yang H., "Genetic Algorithms for Construction Site Layout in Project Planning", **Journal of Construction Engineering and Management**, 128, 5, 2002, 418-426.
13. Meller R. D., Gau K-Y, "The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives. **Journal of Manufacturing Systems**, 15, 1996, 351–366.
14. Papadimitriou C. H., Steiglitz K., **Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity**, Prentice-Hall, 1982.
15. Rayward-Smith V. J., Osman I. H., Reeves C. R., Smith G. D.

(eds.), **Modern Heuristic Search Methods**, J. Wiley, 1996.

16. Resende M. G. C., Ribeiro C. C., "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures", **AT&T Labs Research Technical Report TD-53RSJY**, version 2, 2002.

17. Tam C. M., Tong T. K. L., Leung A. W. T., Chiu G. W. C., "Site Layout Planning using Nonstructural Fuzzy Decision Support System", **Journal of Construction Engineering and Management**, 128, 3, 2002, 220-231.

18. Tawfik H., Fernando T., "A Simulation Environment for Construction Site Planning", **Fifth International Conference on Information Visualisation, 2001**, London, England (http://csdl.computer.org/comp/ proceedings /iv/2001/1195/00/11950199abs.htm).

19. Thabet W. Y., Beliveau Y. J., "Modeling Work Space to Schedule Repetitive Floors in Multistory Buildings", **Journal of Construction Engineering and Management**, 120, 1, 1994, 96–116.

20. Thabet, W. Y., Beliveau Y. J., "SCaRC: Space-Constrained Resource-Constrained Scheduling System", **Journal of Computing in Civil Engineering**, 11, 1, 1997, 48–59.

21. Tommelein I. D., Levitt R. E., Hayes-Roth B., Confrey T., "SightPlan Experiments: Alternate Strategies for Site Layout Design", **Journal of Computing in Civil Engineering**, 5, 1, 1991, 42–63.

22. Yeh I. C., "Construction Site Layout using Annealed Neural Network", **Journal of Computing in Civil Engineering**, 9, 3, 1995, 201–208.

23. Zouein P. P., Harmanani H., Hajar A., "Genetic Algorithm for Solving Site Layout Problem with Unequal-Size and Constrained Facilities", **Journal of Computing in Civil Engineering**, 16, 2, 2002, 143-151.

24. Zouein P. P., Tommelein I. D., "Dynamic Layout Planning using a Hybrid Incremental Solution Method", **Journal of Construction Engineering and Management**, 125, 6, 1999, 400–408.

Κ. Π. Αναγνωστόπουλος
Πολιτικός Μηχανικός-Οικονομολόγος, Αναπ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνική Σχολή Δ.Π.Θ., 671 00 Κιμμέρια Ξάνθης.

Extended summary

An Ant Algorithm for Site-Level Facilities Layout

K. P. ANAGNOSTOPOULOS
Associate Professor D.U.TH.

Abstract
A site-level facility layout has an important impact on the production time and cost savings, especially for large projects, as well as on safety of operations and on environmental aspects of the work. Construction site-layout is to determine what temporary facilities are required to support construction activities and to position them in appropriate locations. In this paper the construction site layout problem is formulated as a location-allocation problem. The objective is to determine an assignment of facilities to locations in order to minimize the total cost, i.e., the sum of the total construction and removal cost of assigning a facility on a location, the total transportation cost of materials and the transportation of personnel between facilities and locations. The problem is solved by an ant system algorithm, a recently developed metaheuristic which has been proved very powerful for solving many optimization problems. A computational analysis of randomly generated instances was performed in order to determine values of the algorithm's parameters that improve its effectiveness.

Temporary facilities (such as warehouses, fabrication shops, maintenance shops, batch plants, and residence facilities) have the general function of supporting construction activities. Construction site-layout involves coordinating the use of limited space to accommodate temporary facilities so that they can function efficiently on site. Good site-layout planning is crucial for enhancing the productivity on construction sites, since low productivity is highly linked to inefficient space planning, resulting in increased transportation costs and non-productive time, as well as to the inefficient use of resources and conflicts between subcontractors [12, 18].

The layout problem is generally defined as the problem of identifying the shape and size of the facilities to be laid out, and determining the relative positions of these facilities that satisfy the constraints between them and allow them to function efficiently [23]. Various classes of layout problems have been studied in the literature. In some studies, the layout problem was modelled as a location-allocation problem, which consists of allocating a set of predetermined facilities into a set of predetermined sites where the smallest site can accommodate the largest facility [9, 22]. In other models, a facility can take any user-specified shape [7]; two-dimensional geometric constraints between facilities are considered [23]; one facility at most can be set up on a specific area to avoid overlapping and some facilities can not be positioned within a given distance of each other [12]. Construction-layout planning can also be dynamic, i.e. layouts that change over time as construction progresses [24] or can be formulated as a multicriteria-multiobjective problem [17].

Submitted: June 2, 2004 Accepted: Nov. 11, 2005

Many solution methods have been proposed in the literature for solving the site-layout planning problem. Since the layout problem is an NP-hard combinatorial problem, optimization-based procedures are limited to small size instances and researchers often resort to using heuristics to find acceptable solutions, or hybrid methods combining heuristics and exact algorithms [24], such as artificial neural networks [22], genetic algorithms [7, 9, 12, 23] and the *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) enhanced by a learning mechanism and a bias function [1].

In the present work, the construction-site layout problem can be formulated as a mixed integer program (section 3): a set of n predetermined facilities needs to be located on n predetermined locations on the site. Each facility should be assigned on one and only one site, and each site should be assigned with one and only one facility (equations (2)-(4)). We assume that each of the predetermined locations is capable of accommodating the largest one among the facilities. The following variables and parameters are used in the mathematical formulation of the problem:

x_{ik} = 1 if facility i is assigned on site k; 0 otherwise.
c_{ik} = construction and removal cost of assigning facility i on site k.
d_{kl} = distance between locations k and l
q_{ijr} = quantity of material r transported from facility i to facility j.
p_{ijr} = transport price of unit quantity of material r from facility i to j.
f_{ij} = frequency trips of personnel from facility i to facility j;
u_{ij} = the unitary cost of a personnel trip from facility i to j.

The objective of site-level facility layout is to find an assignment of facilities on locations (a permutation) in order to minimize the total cost TC, in which the first term

accounts for the total construction and removal cost of assigning a facility on a site; the second term represents the total cost of transporting materials between facilities; and the third term represents the total cost of the site personnel traveling between facilities (equation (1)).

Algorithm ΧΠΕ is proposed to solve the problem (section 4.2). This heuristic uses a system of m artificial agents which construct solutions step by step, assigning a facility to each location.

1. The loop /ενόσω-τέλοςενόσω/ (while-endwhile) contains maxεπ iterations, where maxεπ is a predefined integer.
2. In the loop /από (for) μετκυκ = 1 μέχρι (to) μετκυκ = n/ a complete assignment is constructed for each ant. Each cycle contains n steps. In each step m assignments are made, one for each ant. In the beginning of each cycle and for each ant, all possible assignments are allowed.
3. In the loop /από (for) μ = 1 μέχρι (to) μ = m/ an assignment of a facility to a location is made for each ant. λισταεγκ(μ) (λιστατοπ(μ)) is the list of facilities (locations) not yet used by the ant μ. If ant μ choices the assignment (i, j), then the facility i and the location j are no longer available for assignments by this ant in the current cycle.

The selection of assignments is based on two grounds: a/ How often an assignment is used during the procedure, that is, how often is part of a complete assignment. b/ What is the relative cost of the assignment.

The choice of an assignment is made according to its probability as calculated by equation (5.2) (the sums have been normalized). In equation (5.2) φ_{ij} is the quantity of pheromone accumulated during the preceding cycles according to equation (5.1) and ψ_{ij} is an upper bound of the cost of assigning facility i to locations. The algorithm is currently coded in VBA with a view to developing a user-friendly computer program working as a Microsoft Excel add-in.

K. P. Anagnostopoulos
Civil Engineer-Economist, Associate Professor, Department of Production and Management Engineering, School of Engineering, Democritus University of Thrace, 671 00 Kimmeria Xanthi.