

ΚΕΦΑΛΑΙΟ | 1

Εισαγωγή

1.1 ΣΚΟΠΟΣ

Το παρόν Κεφάλαιο 1 παρουσιάζει περιληπτικά τη φύση και τον σκοπό των έργων και υπηρεσιών όπου ο μηχανικός έχει αυξημένο και υπεύθυνο ρόλο. Ιδιαίτερα καταγράφονται οι τύποι των δραστηριοτήτων και εγκαταστάσεων που συνιστούν τα συστήματα υποδομής της κοινωνίας. Τα τεχνικά έργα σχεδιάζονται, χρηματοδοτούνται, πραγματοποιούνται, συντηρούνται και λειτουργούν στα πλαίσια ενός γενικότερου συστήματος υποδομών και μπορεί να εμπίπτουν στη δραστηριότητα του ιδιωτικού ή του δημόσιου τομέα. Η σημασία τέτοιων έργων για τον σύγχρονο πολιτισμό είναι τεράστια και πολλές μελέτες υποδεικνύουν ότι υπάρχει θετική συσχέτιση ανάμεσα στο μέγεθος των έργων υποδομής και την ισχύ της εθνικής οικονομίας. Το εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο περιλαμβάνει επίσης μερικές γενικές αρχές και βασικούς ορισμούς που εφαρμόζονται στο σχεδιασμό τεχνικών έργων, καθώς και μια σύντομη παρουσίαση της μεθόδου της συστημικής ανάλυσης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με παραδείγματα δημιουργίας υποδειγμάτων για συστήματα ή υπο-συστήματα έργων μηχανικού, για τα οποία θα χρησιμοποιηθούν οι μεθοδολογίες που αναπτύσσονται στα επόμενα κεφάλαια του βιβλίου.

1.2 ΤΥΠΟΙ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Τα έργα υποδομής έχουν σαν βασικό σκοπό την εξυπηρέτηση, την ανάπτυξη και τη βελτίωση της κοινωνίας. Εμπεριέχουν τη σύλληψη, σχεδιασμό, τεχνική μελέτη, κατασκευή και λειτουργία εγκαταστάσεων που είναι ουσιώδεις για τη σύγχρονη ζωή, από συστήματα μεταφορών έως υπεράκτιες εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου. Ο όρος «δημόσια έργα» αναφέρεται συνήθως σε μεγάλα τεχνικά έργα και παραπέμπει σε σκοπούς και λειτουργίες όπως οι παρακάτω:

- Εθνικοί οδοί, δρόμοι, γέφυρες, σήραγγες
- Μέσα μαζικής μεταφοράς, χώροι στάθμευσης, και άλλα έργα επίγειας μεταφοράς
- Αεροδρόμια και άλλες αεροπορικές εγκαταστάσεις
- Συστήματα ύδρευσης, επεξεργασίας και διανομής νερού
- Συστήματα συλλογής, επεξεργασίας, και διάθεσης υγρών λυμάτων
- Συστήματα συλλογής, επεξεργασίας, και διάθεσης στερεών αποβλήτων

- Ανάπτυξη υδατικών πόρων για άρδευση, πλημμυρική προστασία, αναψυχή, και ναυσιπλοΐα
- Λιμενικές, παράκτιες και υπεράκτιες εγκαταστάσεις
- Παραγωγή και διάθεση υδροηλεκτρικής ενέργειας
- Κτίρια κατοικίας και κτίρια γραφείων και καταστημάτων
- Κτίρια ειδικών χρήσεων (δικαστήρια, σχολεία, βιβλιοθήκες, νοσοκομεία, αστυνομικά τμήματα, πυροσβεστικοί σταθμοί, φυλακές)
- Μουσεία, στάδια, και άλλα έργα πολιτισμού και αναψυχής

Τα παραπάνω έργα αποτελούν το σημαντικότερο μέρος της υλικής υποδομής μιας χώρας. Απαιτούν σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίου, παρέχουν «δημόσιες υπηρεσίες» ή λύνουν προβλήματα που θεωρούνται ότι εμπίπτουν στο χώρο ευθύνης του δημόσιου τομέα. Η αναγκαιότητα και η σκοπιμότητα των περισσότερων από τα έργα αυτά αξιολογείται συνήθως με γενικές μεθόδους προσδιορισμού των οικονομικών χαρακτηριστικών τους (κόστη και οφέλη).

Τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες το ισχυροποιημένο «περιβαλλοντικό κίνημα» έχει ενθαρρύνει πολιτικές σχεδιασμού και διαχείρισης των πόρων για την προστασία και εμπλουτισμό του φυσικού περιβάλλοντος, προωθώντας νέους τύπους τεχνικών έργων:

- Έργα συντήρησης αρχαιολογικών, ιστορικών, βιολογικών, και γεωλογικών αξιοθέατων
- Έργα προστασίας οικολογικών συστημάτων
- Έργα βελτίωσης της ποιότητας των νερών, του εδάφους και του αέρα
- Έργα ενίσχυσης της τοπικής και περιφερειακής οικονομικής ανάπτυξης και απασχόλησης (ιχθυοκαλλιέργειες, δασοκαλλιέργειες)
- Έργα βελτίωσης της υγείας και ασφάλειας του πληθυσμού
- Συστήματα ενίσχυσης της ετοιμότητας αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων
- Άλλα έργα βελτίωσης της «ποιότητας της ζωής»

Η κείμενη νομοθεσία επιβάλλει για όλα τα σημαντικά τεχνικά έργα την εκπόνηση αναλύσεων και μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι οποίες μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν μελέτες αισθητικών και κοινωνικών επιπτώσεων.

1.3 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Το σύνολο των υποδομών μιας χώρας αντανακλά την κοινωνική και ιστορική εξέλιξη και χαρακτηρίζει το επίπεδο της συλλογικής προσπάθειας. Οι μορφές και λειτουργίες των υποδομών συμβάλλουν στο να κατανοούνται οι

ομοιότητες και διαφορές ανάμεσα σε περιοχές, ομάδες ανθρώπων, και πολιτισμούς. Η υλική υποδομή συνίσταται από διάφορες κατασκευές, κτίρια, αγωγούς, δρόμους, τροχιόδρομους, γέφυρες, σήραγγες, και δίκτυα. Εξίσου σημαντικό και ευμετάβλητο είναι το «λογισμικό» για την υλική υποδομή, όλοι οι επίσημοι και ανεπίσημοι κανόνες για τη λειτουργία αυτών των συστημάτων.

Πόσο ζωτικά είναι τα έργα υποδομής; Χρειάζεται μόνο να σκεφτούμε πως θα ήταν η ζωή, αν ο κάθε πολίτης ήταν χωριστά υπεύθυνος για τη διάθεση των αποβλήτων, την άντληση και τον καθαρισμό του νερού, και την εξεύρεση τρόπων μετακίνησης. Το εύρος, ασφάλεια, βάθος, και ποικιλία των κοινωνικών επαφών που βιώνουμε σήμερα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της υποδομών.

Η **εθνική κυβέρνηση** έχει και θα συνεχίσει να έχει έναν πρωτεύοντα ρόλο στο σχεδιασμό και τη χρηματοδότηση δημόσιων έργων. Αυτό περιλαμβάνει την κατανομή **κονδυλίων** για επενδύσεις, και τους **κανονισμούς** και **επίβλεψη** του σχεδιασμού. Σε μεταβαλλόμενο βαθμό, ανάλογα με τη χώρα και την τοποθεσία κάθε συγκεκριμένου έργου, η κατανομή κονδυλίων ενδεχομένως εξαρτάται από μακροοικονομικές μελέτες, και μπορεί επίσης να εξαρτάται από πολιτικούς και θεσμικούς παράγοντες. Συνήθως πολλοί φορείς σε όλα τα επίπεδα της κυβέρνησης σχεδιάζουν, μελετούν και λειτουργούν δημόσια έργα, αξιοποιώντας τους δικούς τους υπαλλήλους και/ή συμβαλλόμενοι με ιδιωτικές εταιρείες.

Οι επαγγελματίες που εμπλέκονται στον χώρο των έργων υποδομής αναγνωρίζουν τη **διεπιστημονική φύση** του σχεδιασμού τους. Εκτός από τη λειτουργική αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου έργου, και τις επιδράσεις του στη δημόσια υγεία και ασφάλεια όσων επηρεάζονται από αυτό, οι υπεύθυνοι σχεδιασμού καλούνται να θεωρήσουν τις επωφελείς και ανεπιθύμητες περιβαλλοντικές, κοινωνικές, και οικονομικές επιπτώσεις του συγκεκριμένου έργου. Πρέπει επίσης να συνυπολογίσουν άλλους παράγοντες, π.χ. πολιτικής, θεσμικής, αισθητικής, νομικής και οικονομικής φύσης, που καθορίζουν κατά πόσον ένα συγκεκριμένο έργο είναι αποδεκτό και μπορεί να υλοποιηθεί με επιτυχία. Οι φορείς σχεδιασμού σήμερα δεν αρκεί να στελεχώνονται μόνο με υπαλλήλους εξειδικευμένους σε επιστημονικά πεδία όπως η μηχανική, τα οικονομικά, η βιολογία, η νομική, και οι κοινωνικές και πολιτικές επιστήμες. Υπεύθυνοι σχεδιασμού είναι συνήθως άτομα με τεχνική εξειδίκευση, που όμως έχουν επιπρόσθετα βασική κατανόηση των άλλων επιστημών και την ικανότητα να συνεργάζονται με άλλους επαγγελματίες.

Όσοι επηρεάζονται από τις επωφελείς και ανεπιθύμητες επιπτώσεις των συγκεκριμένων έργων πρέπει να συμμετέχουν στον σχεδιασμό. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός έργων υποδομής απαιτεί όχι μόνο κατάλληλη σχέση και συνεργασία ανάμεσα στους υπεύθυνους σχεδιασμού στο εθνικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο, και ανάμεσα στους υπεύθυνους στο επίπεδο τομέα και συγκεκριμένου έργου, αλλά επίσης και **ενεργό συμμετοχή των επωφελομένων** από το συγκεκριμένο έργο και άλλων **ενδιαφερόμενων** για τον σχεδιασμό στα διάφορα στάδια της εξέλιξης του. Τα ενδιαφερόμενα μέρη μπορεί να περιλαμβάνουν κοινωνικές ομάδες πίεσης με ειδικά συμφέροντα, αλλά και άτομα που δεν επηρεάζονται άμεσα από το αποτέλεσμα του σχεδιασμού.

Το φυσικό, περιβαλλοντικό, κοινωνικό και πολιτικό πλαίσιο μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα ο σχεδιασμός διαφέρει επίσης από τόπο σε τόπο. Έτσι ο υπεύθυνος σχεδιασμού, όταν προσπαθεί να υιοθετήσει μια γενική προσέγγιση και λεπτομερείς μεθοδολογίες, πρέπει να αναγνωρίσει ότι κάθε συγκεκριμένο έργο παρουσιάζει ποικιλία **ιδιομορφιών** και **περιορισμών**. Τεχνικές σχεδιασμού που έχουν εφαρμοστεί προηγουμένως με επιτυχία για συγκεκριμένα έργα διαφόρων τύπων μπορούν να αποτελέσουν οδηγό για τον σχεδιασμό παρόμοιων έργων στο μέλλον. Όμως, για τα περισσότερα έργα είναι πιθανό ότι ο υπεύθυνος θα θελήσει να κάνει τροποποιήσεις ανάλογα με τις νέες συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι υποχρεωμένος να εργαστεί.

1.4 ΜΕΡΙΚΟΙ ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Το **συγκεκριμένο έργο** (project) είτε μόνο ή σαν συνιστώσα ενός συνολικού σχεδίου ή ενός προγράμματος είναι και θα συνεχίζει να είναι το κύριο όχημα για σχεδιασμό και υλοποίηση των έργων υποδομής.

Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει την αναγνώριση, μορφοποίηση, και ανάλυση του συγκεκριμένου έργου. Δραστηριότητες σχεδιασμού επίσης περιλαμβάνονται και σε επόμενες φάσεις του έργου όπως υλοποίηση, μελέτη, κατασκευή, και λειτουργία. Οι μηχανικοί συνήθως διακρίνουν τον **σχεδιασμό** (planning) και τον **υπολογισμό** ή **τεχνικό σχεδιασμό** (design), χρησιμοποιώντας τον δεύτερο όρο για την εκπόνηση λεπτομερειακών μελετών μηχανικού, σχεδίων και προδιαγραφών για κατασκευές, εξοπλισμούς και άλλες συνιστώσες του συγκεκριμένου έργου.

Ενώ οι όροι **σκοπός** (purpose), **επιδίωξη** (goal), και **στόχος** (objective) έχουν παρόμοια σημασία στην καθημερινή γλώσσα, στον σχεδιασμό έργων υποδομής έχουν διαφορετική σημασία. Παραδοσιακά ο όρος «σκοπός»

αναφέρεται σε μια κατηγορία αναγκών και προβλημάτων σε έναν οικονομικό τομέα όπως υδατικοί πόροι ή μεταφορές, ενώ ο όρος «επιδίωξη» ή «στόχος» υπονοεί μια ευρύτερη αξία όπως περιβαλλοντική ποιότητα ή κοινωνική ισότητα. Οι όροι «επιδίωξη» ή «στόχος» επίσης χρησιμοποιούνται σε διάφορες επιστήμες για να εκφράσουν μετρήσιμες ποσότητες για το επιθυμητό αποτέλεσμα ενός συγκεκριμένου έργου, όπως κόστος (ελαχιστοποίηση), καθαρό όφελος (μεγιστοποίηση), ιδιότητα (π.χ. υψόμετρο πλημμύρας, αριθμός βακτηριδίων, μονάδες δημόσιων κατοικιών, κ.λπ.). Οι πολιτικές σχετίζονται με επιδιώξεις ή στόχους και υπόκεινται σε διάφορους νομικούς, θεσμικούς και άλλους περιορισμούς που περιστελλουν την ανάπτυξη και διαχείριση μέσα σε καθορισμένα όρια.

Έχοντας αφετηρία δύο **εκδοχές σχεδιασμού**, που καθεμιά είναι βέλτιστη όσον αφορά διαφορετικούς στόχους, είναι δυνατό να εξετάζονται **σταθμίσεις** (tradeoffs) οι οποίες αυξάνουν την απόδοση για τον έναν στόχο μειώνοντας την απόδοση για τον άλλο. Συχνά μια τέτοια διαδικασία οδηγεί στην πιο ικανοποιητική συμβιβαστική λύση, με την έννοια ότι μπορεί να συμπεριλαμβάνονται μέτρα που βελτιώνουν την ποιότητα του περιβάλλοντος, αλλά προκαλούν μείωση στο καθαρό οικονομικό όφελος.

Στο σχεδιασμό, χρειάζεται να δοθεί επαρκής προσοχή στις **εξωτερικότητες** (θετικές και αρνητικές) οικονομικής, κοινωνικής, και περιβαλλοντικής φύσης, οι οποίες είναι επιδράσεις αποδιδόμενες σε μια λύση, αλλά δεν εμπίπτουν στο κύριο αντικείμενο του συγκεκριμένου έργου.

1.5 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΣΥΣΤΗΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Παρ' όλο που έργα υποδομής έχουν κατασκευαστεί συνεχώς επί χιλιετίες, ο σύγχρονος σχεδιασμός τέτοιων έργων έχει εξελιχθεί μόνο τα τελευταία 70 χρόνια. Από τεχνολογική και οικονομική άποψη, ο σχεδιασμός έργων υποδομής μέσα σε ένα πολύπλευρο, πολυσκοπικό, πολυστοχικό περιφερειακό πλαίσιο είναι η λογική εξέλιξη παλαιών μεθόδων, όπως αυτή προσδιορίστηκε από την ανάπτυξη σύγχρονων τεχνικών όπως **ανάλυση συστημάτων**, **επιχειρησιακή έρευνα**, και **προγραμματισμός υπολογιστών**. Μείζονες αλλαγές, επιπλέον αυτών των τεχνολογικών εξελίξεων, έχουν επέλθει με την εισαγωγή συμπληρωματικών ζητημάτων (ιδιαίτερα περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραγόντων) που συνήθως δεν είναι ποσοτικοποιήσιμα με την παραδοσιακή έννοια (όπως είναι δυνατόν να ποσοτικοποιούνται οι δομικοί, λογιστικοί, λειτουργικοί, και άλλοι τεχνολογικοί παράγοντες). Δηλαδή, στον κεντρικό ρόλο των μηχανικών στον σχεδιασμό των έργων, προστέθηκε η συμβολή οικονομολόγων, ιδιαίτερα μετά την απαίτηση για ανάλυση οφέλους-κόστους, και πιο πρόσφατα η συμμετοχή οικολόγων, κοινωνιολόγων, και

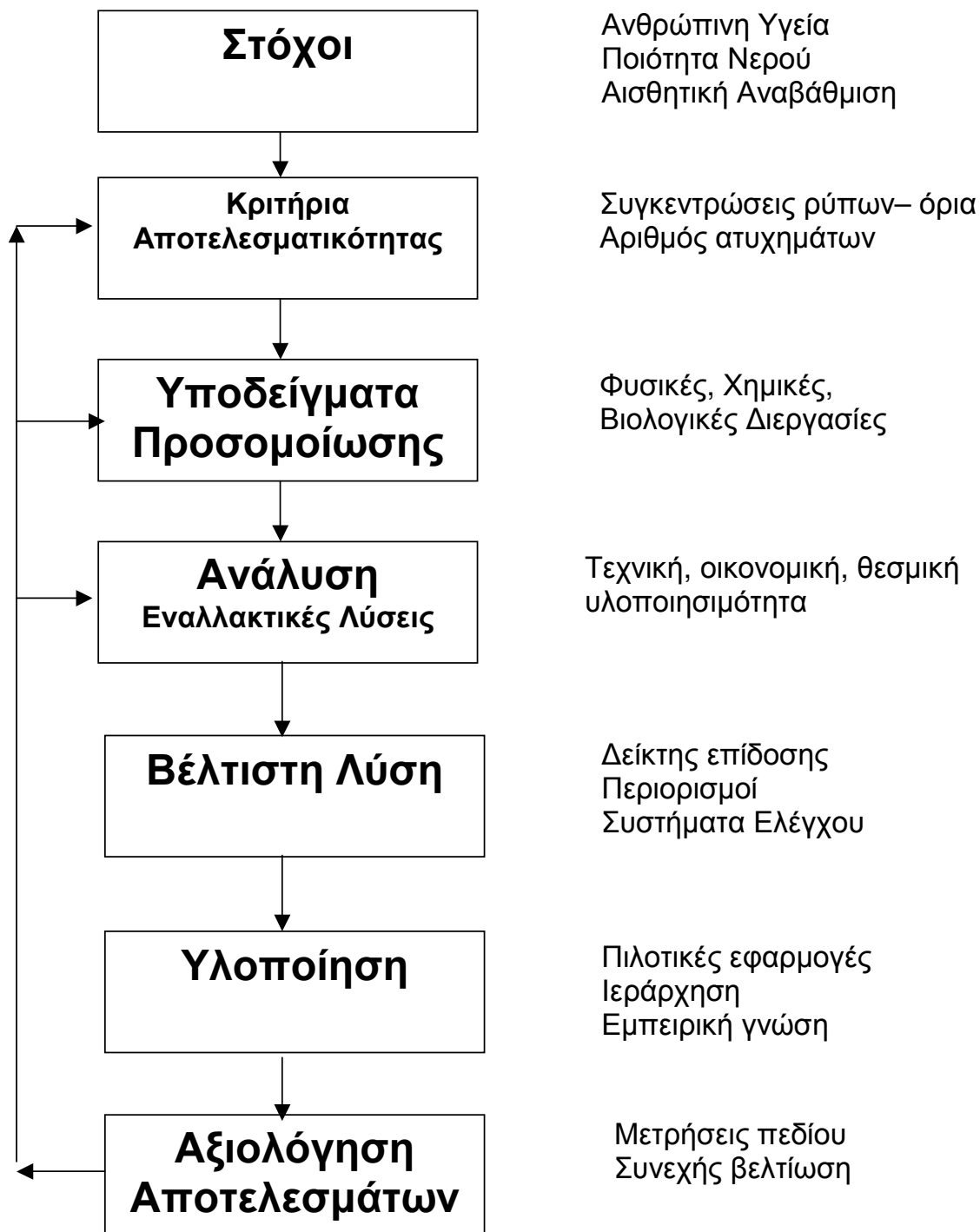
άλλων περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιστημόνων μετά την απαίτηση για προετοιμασία μιας ειδικής μελέτης («Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων») για κάθε δράση που έχει «σημαντικές» παράπλευρες επιπτώσεις.

Η μέθοδος της συστημικής ανάλυσης, η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 1.1, είναι μια σύγχρονη μέθοδος σχεδιασμού που είναι σε θέση να παράγει υπηρεσίες και έργα **αποτελεσματικά** όσο αφορά το κόστος, **αποδοτικά** για το σκοπό που προορίζονται, και **υλοποιήσιμα** μέσω των υφιστάμενων πόρων. Η ανάλυση συστημάτων, σαν πρωτογενής έννοια, μπορεί να αναφέρεται σε οποιαδήποτε συστηματική και επιστημονική προσέγγιση για επίλυση προβλημάτων. Περιλαμβάνει παραδοσιακές μεθόδους καθώς και τις πιο πρόσφατα αναπτυγμένες μαθηματικές μεθόδους του επιστημονικού πεδίου της επιχειρησιακής έρευνας.

Μια συστημική προσέγγιση τυπικά περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

Βήμα 1 - Εξειδίκευση των στόχων: Βασικός σκοπός κάθε έργου ή προγράμματος είναι η προστασία της υγείας και ευημερίας του ανθρώπου και του περιβάλλοντος γενικότερα. Άλλοι σκοποί μπορεί να προκύπτουν από ερωτήσεις όπως: Πρόκειται για έργο τοπικής ή εθνικής σημασίας; Εξυπηρετεί τα συμφέροντα συγκεκριμένης κοινωνικής ομάδας (π.χ. αγρότες) ή το σύνολο του πληθυσμού; Προάγεται το επενδυτικό κέρδος ή ασκείται κοινωνική πολιτική (επιδότησεις, ανακατανομή εισοδήματος, φορολογικές ελαφρύνσεις); Στα πλαίσια των τεχνικών έργων οι σκοποί (π.χ. η διατήρηση αποδεκτής ποιότητας νερού για τις επιθυμητές χρήσεις) μεταφράζονται πρακτικά σε στόχους τήρησης συγκεκριμένων προδιαγραφών ή ορίων (π.χ. συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου πάνω από 6 mg/l) που περιέχονται σε κανονισμούς και κωδικοποιούν αφ' ενός την υπάρχουσα γνώση για τις ιδιότητες των υλικών, την κατανόηση των φυσικών φαινομένων κ.λπ. και αφ' ετέρου τις επικρατούσες κοινωνικές αντιλήψεις και το επίπεδο οικονομικής ανάπτυξης.

Βήμα 2 - Καθορισμός των κριτηρίων αποτελεσματικότητας: Τα κριτήρια με τα οποία κρίνεται η αποδοτικότητα μιας στρατηγικής είναι ανάγκη να είναι σε συμφωνία με τους στόχους, όπως ορίστηκαν παραπάνω, ώστε ο μελετητής να μπορεί να γνωρίζει πότε οι στόχοι έχουν επιτευχθεί ή πόσο αποτελεσματικό είναι ένα συγκεκριμένο έργο σε σχέση με την εκπλήρωση των στόχων. Με βάση τα παραπάνω, τα κριτήρια αποτελεσματικότητας συνήθως συγκρίνουν τις αποκρίσεις του συστήματος σε διάφορες φορτίσεις με τους στόχους που καθορίστηκαν στο Βήμα 1. Το τελευταίο εξηγεί την ιδιαίτερη σημασία των υποδειγμάτων υπολογισμού της συμπεριφοράς του συστήματος όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συνδυασμοί εξωτερικών φορτίσεων.



Σχήμα 1.1. Η μέθοδος της συστημικής ανάλυσης

Βήμα 3 - Κατάλληλα υποδείγματα υπολογισμού της συμπεριφοράς: Η κατασκευή και χρήση υποδειγμάτων επιτρέπει να εκτιμάται η φύση και η συμπεριφορά της σχεδιαζόμενης λύσης και να ελέγχεται η αποτελεσματικότητα εναλλακτικών καταστάσεων φόρτισης. Φυσικά, το τελικό αποτέλεσμα εφαρμογής τέτοιων υποδειγμάτων πρέπει να είναι συμβατό, τόσο με τους στόχους που έχουν τεθεί, όσο και με τα κριτήρια αποτελεσματικότητας που έχουν επιλεγεί. Με αυτόν τον τρόπο ο μελετητής μπορεί να αποφασίσει κάτω από ποιες συνθήκες εκπληρώνονται οι στόχοι και να μετρήσει την αποτελεσματικότητα οποιασδήποτε λύσης.

Βήμα 4 - Θεώρηση πολλών εναλλακτικών λύσεων: Κατά την επιλογή των τιμών μεταβλητών σχεδιασμού και τη διαμόρφωση των εναλλακτικών λύσεων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι υπάρχοντες περιορισμοί ώστε τα αποτελέσματα να είναι πρακτικά, αποδεκτά και εφαρμόσιμα. Τέτοιοι περιορισμοί είναι δυνατό να προέρχονται από τη δυσκολία πρακτικής εφαρμογής ορισμένων μέτρων, από τις υπερβολικά αρνητικές επιπτώσεις σε παραγωγικές δραστηριότητες, από την αναμενόμενη αντιδημοτικότητα ορισμένων μέτρων, από περιορισμένη διαθεσιμότητα ορισμένων αγαθών κ.λπ. Για παράδειγμα η δυνατότητα εξυπηρέτησης ενός συστήματος ύδρευσης μπορεί να αυξηθεί:

A. με μείωση της ζήτησης με περιορισμό της χρήσης νερού

B. με εκμετάλλευση των υπόγειων νερών

Γ. με εισαγωγή νερού από άλλες υδρολογικές λεκάνες

Δ. με κατασκευή νέων ταμιευτήρων στην ίδια υδρολογική λεκάνη

Για κάθε εναλλακτική λύση ανακύπτουν νέα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν, π.χ. στην επιλογή Δ πόσοι ταμιευτήρες, που, πόσο μεγάλοι, πως θα χρηματοδοτηθεί η κατασκευή τους;

Βήμα 5 - Σύγκριση εναλλακτικών λύσεων και ανάλυση ευαισθησίας: Η εργασία αυτή περιλαμβάνει τη συστηματική αξιολόγηση όλων των διαθέσιμων λύσεων με εκτίμηση της σχετικής τους αποτελεσματικότητας όσον αφορά τους στόχους, το κόστος και την εφαρμοσιμότητα. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται η ευαισθησία του συστήματος (π.χ. της ποιότητας αέρα στο κέντρο μιας πόλης) σε σχέση με διάφορα εναλλακτικά μέτρα (π.χ. με την απαγόρευση της κυκλοφορίας των ΙΧ), ή ακόμα και σε σχέση με τον βαθμό αυστηρότητας ορισμένων μέτρων (π.χ. με τον βαθμό καθαρότητας των καυσίμων).

Το τελικό προϊόν αυτής της διαδικασίας μπορεί να συνοψίζεται σε έναν πίνακα που καταχωρεί την αποτελεσματικότητα των εναλλακτικών λύσεων σε σχέση με την εκπλήρωση των στόχων που έχουν τεθεί και κατατάσσει τα μέτρα αυτά

ιεραρχικά. Η εργασία αυτή διευκολύνεται με τα επιλεγμένα υποδείγματα για το σύστημα και τεχνικές προσομοίωσης σε υπολογιστή. Ενδέχεται να βασίζεται σε μια σωρευτική και απλοποιημένη περιγραφή του κοινωνικού, οικονομικού και φυσικού συστήματος (lumped model) η οποία παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της «καλύτερης» λύσης με βελτιστοποίηση.

Βήμα 6 - Διαμόρφωση βέλτιστων στρατηγικών: Η «βέλτιστη» λύση που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα επιβεβαιώνεται ως «εφικτή» με χρήση λεπτομερέστερων υποδειγμάτων (distributed model). Οι επιπτώσεις της λύσης κατανοούνται και εκτιμώνται με προσομοίωση. Επιλέγεται ένα σύνολο από εφαρμόσιμα μέτρα, με τα οποία πληρούνται όλοι οι στόχοι που έχουν τεθεί με το ελάχιστο δυνατόν κόστος. Η διαμόρφωση πραγματικά βέλτιστων στρατηγικών απαιτεί, μεταξύ άλλων, λεπτομερείς τεχνικές αναλύσεις, καθώς επίσης και οικονομική θεώρηση κάθε εναλλακτικής λύσης. Αν δεν υπάρχουν τέτοια αναλυτικά τεχνικοοικονομικά στοιχεία, συνήθως επιχειρείται να διαμορφωθούν λογικές και πραγματικά αποτελεσματικές στρατηγικές με κοινή λογική, εμπειρία, και ακολουθώντας απλούς κανόνες.

Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα κατάλληλα υποδείγματα, η λήψη αποφάσεων θα μπορούσε να βασιστεί μόνο σε μετρήσεις των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος. Εάν π.χ. οι συγκεντρώσεις ρύπων στα νερά ενός ποταμού υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια, τότε διαμορφώνονται και υλοποιούνται στρατηγικές ελέγχου που αποτελούνται από απλά και εφαρμόσιμα μέτρα, η αποδοτικότητα και επάρκεια των οποίων κρίνεται από τις βελτιώσεις που επιφέρουν, όπως προκύπτουν από τις συνεχιζόμενες μετρήσεις της ποιότητας των νερών. Για να γίνουν τα παραπάνω είναι απαραίτητη η καλή εμπειρική κατανόηση της υπάρχουσας κατάστασης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το προσωπικό για διαμόρφωση ενός πλαισίου κανόνων (έμπειρο σύστημα). Στην παραπάνω **εμπειρική ή στοιχειώδη** προσέγγιση, η διαμόρφωση στρατηγικών βασίζεται περισσότερο στη διαίσθηση και εμπειρία του προσωπικού των υπηρεσιών σχεδιασμού, παρά σε αυστηρή διαδικασία ανάλυσης. Επιπλέον, η κάθε στρατηγική πρώτα εφαρμόζεται και μετά διαπιστώνεται η αποτελεσματικότητά της. Η έλλειψη δυνατότητας ελέγχου της αποτελεσματικότητας κάθε λύσης εκ των προτέρων και η ως εκ τούτου ανάγκη πειραματισμού με εφαρμογή μέτρων μπορεί να αποδειχτεί εξαιρετικά δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία.

Ένα πιο εξελιγμένο σχήμα για διαμόρφωση λύσεων περιλαμβάνει τη δημιουργία των κατάλληλων υποδειγμάτων συμπεριφοράς του συστήματος. Τα διαθέσιμα στοιχεία από μετρήσεις χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση και βαθμονόμηση των υποδειγμάτων, έτσι ώστε οι προβλέψεις τους να

ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Αποτέλεσμα της εφαρμογής των υποδειγμάτων είναι η λήψη μια σαφέστερης εικόνας σε σχέση με την αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού καθώς είναι δυνατόν να εντοπιστούν πιθανές παραβάσεις των προδιαγραφών. Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατό να διαμορφωθούν εναλλακτικές στρατηγικές ελέγχου, η αποτελεσματικότητα των οποίων σε σχέση με τη βελτίωση της υφισταμένης κατάστασης και την επίτευξη των επιθυμητών στόχων μπορεί εύκολα να υπολογιστεί με χρήση των ήδη επαληθευμένων υποδειγμάτων.

Μετά την εφαρμογή υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς βελτίωσης με επαναλαμβανόμενα βήματα μέχρι να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται, σε μεγάλο βαθμό, η ανάγκη των πειραματισμών κατά την εφαρμογή της στρατηγικής και τούτο προφανώς προσφέρει σημαντικά περιθώρια εξοικονόμησης χρόνου και χρήματος. Εν τούτοις τα πλεονεκτήματα αυτά μπορούν να επιτευχθούν μόνο δια μέσου εντατικότερης ανάλυσης και αυτή μπορεί να απλοποιηθεί μόνο με τη βοήθεια κατάλληλων και πρακτικών εργαλείων, που καθίστανται έτσι απαραίτητα προκειμένου η όλη διαδικασία να είναι αποδοτική και κατάλληλη για ευρεία εφαρμογή.

Βήμα 7- Υλοποίηση της διαμορφωμένης στρατηγικής: Σαν γενικός κανόνας, τα μέτρα που επιλέγονται μέσω της στρατηγικής χρειάζονται περαιτέρω ανάλυση και επαλήθευση, πριν από την εφαρμογή τους. Η έκταση της περαιτέρω ανάλυσης εξαρτάται φυσικά από το κόστος του συγκεκριμένου μέτρου και από τον βαθμό της αβεβαιότητας που αισθανόμαστε σε σχέση με τις προβλέψεις μας. Πέρα από την πρόσθετη ανάλυση και επαλήθευση, είναι πιθανό ότι για μερικά πολύπλοκα μέτρα απαιτείται και μελέτη εφαρμογής πριν την εκτέλεσή τους. Στρατηγικές που περιλαμβάνουν συγκεκριμένα τεχνικά ή θεσμικά μέτρα αντί νομοθετικές διατάξεις και όρια αποβλήτων ή εκπομπών, είναι πολύ πιο εφαρμόσιμες στην πράξη.

Βήμα 8 - Εκτίμηση των αποτελεσμάτων: Η εργασία αυτή περιλαμβάνει την ενδεχόμενη προσαρμογή της αρχικής στρατηγικής. Υπενθυμίζεται ότι οι διαδικασίες διαμόρφωσης στρατηγικών δεν αποτελούν μια μοναδική προσπάθεια, αλλά αντίθετα μια συνεχή διεργασία, η οποία προοδευτικά βελτιώνεται από την ανάδραση των προηγούμενων εμπειριών και αποτελεσμάτων.

Σαν τελευταία παρατήρηση πρέπει να αναφερθεί ότι τα τεχνικά έργα σχεδιάζονται και κατασκευάζονται επί αιώνες χωρίς συγκεκριμένη αναφορά και επίγνωση του πλαισίου της συστημικής ανάλυσης. Όμως, στη σύγχρονη

πραγματικότητα η πολυπλοκότητα των συστημάτων και η εξέλιξη της τεχνολογίας επιτάσσουν τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό μέσω μιας βέλτιστης οικονομικής προσέγγισης. Παρά το γεγονός ότι ο βαθμός χρήσης τέτοιων μεθοδολογιών διαφέρει σε κάθε χώρα και για κάθε τύπο έργου, η υπάρχουσα εμπειρία δείχνει ότι τα αναμενόμενα οφέλη από τέτοιο σχεδιασμό είναι σημαντικά, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, σε σχέση τόσο με την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος όσο και με την επιτυγχανόμενη οικονομία και ταχύτητα υλοποίησης.

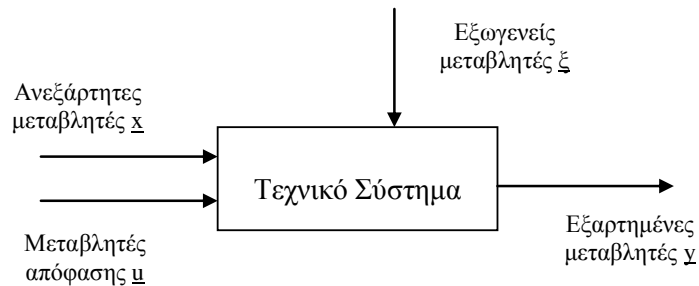
Η αυστηρή εφαρμογή της συστημικής αντίληψης στην παραγωγή των τεχνικών έργων είναι μια απαιτητική υπόθεση, καθώς απαιτεί τα λεπτομερή χαρακτηριστικά του συστήματος, σειρά από τεχνικο-οικονομικές μελέτες, εφαρμογή υποδειγμάτων υπολογισμού της συμπεριφοράς, ανάλυση ευαισθησίας και διαμόρφωση βέλτιστων στρατηγικών σε σχέση με τους στόχους που έχουν τεθεί. Οι παραπάνω απαιτήσεις, παρά τα πιθανά οφέλη, καθιστούν την εφαρμογή των αυστηρών συστημικών αναλύσεων απαγορευτική στην πράξη για έργα μικρής κλίμακας. Εν τούτοις, η λήψη αποφάσεων είναι μια αναγκαία και διαρκής διαδικασία και η επινόηση τεχνικών συστημικής ανάλυσης με απλοποιημένες απαιτήσεις, που είναι αποδεκτές από τη μεγάλη πλειοψηφία των μελετητών και ικανές να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα των προωθούμενων μέτρων, αποκτούν μεγάλη πρακτική σημασία.

1.6 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στην Ενότητα 1.5 αναδείχθηκε ο κεντρικός ρόλος που κατέχουν τα υποδείγματα του συστήματος στη μέθοδο της συστημικής ανάλυσης. Το μαθηματικό υπόδειγμα είναι ένα ουσιώδες εργαλείο στον σύγχρονο σχεδιασμό και διαχείριση έργων και συστημάτων. Σε γενικές γραμμές, ένα τέτοιο υπόδειγμα αποτελείται από μια ή περισσότερες δηλώσεις, εκφρασμένες με μαθηματικούς όρους, οι οποίες περιγράφουν σχέσεις ανάμεσα σε εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. Η ανάλυση των μαθηματικών υποδειγμάτων έχει διευκολυνθεί σημαντικά με τη διαθεσιμότητα σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών που επιτρέπουν τη λύση πολλών προβλημάτων τα οποία δε θα ήταν πρακτικό ή δυνατό να αναλυθούν με άλλα μέσα.

Πίνακες, γραφήματα, μαθηματικές εξισώσεις, λογικές δηλώσεις, και λεκτικές περιγραφές είναι μέσα περιγραφής των ορίων του συστήματος, των στοιχείων εισόδου και εξόδου του συστήματος και των σχέσεων τους, και οποιαδήποτε ανάδραση ανάμεσα στις μεταβλητές εξόδου και εισόδου.

Εάν ο στόχος του ελάχιστου κόστους είναι σταθερός και αποκλειστικός, ενδεχομένως να είναι δυνατό να αναπτυχθεί μόνο μια λύση για παρουσίαση στους υπεύθυνους αποφάσεων. Όμως σε πολλές περιπτώσεις οι στόχοι δεν είναι γνωστοί με τόση σαφήνεια, και διάφορα εναλλακτικά σχήματα αξίζει να παρουσιάζονται στους υπεύθυνους αποφάσεων διότι συνεισφέρουν με αποτελεσματικούς τρόπους στις συνιστώσες των στόχων.



Σχήμα 1.2. Σχηματική περιγραφή μαθηματικού υποδείγματος

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μαθηματικών υποδειγμάτων του συστήματος ανάλογα με τα είδη των μαθηματικών συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται. Παρακάτω επιχειρείται η κατηγοριοποίηση των μαθηματικών υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται σε συστήματα υδατικών πόρων:

(α) *Αλγεβρική εξίσωση*: Μπορεί να προκύψει με προσαρμογή καμπύλης σε εμπειρικές μετρήσεις π.χ. όγκος φερτών = fn (έκταση λεκάνης απορροής)

$$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

(β) *Εξίσωση διαφορών*: Μπορεί να περιγράψουν χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματα με καθυστέρηση, μνήμη, πολλαπλές μεταβλητές κ.λπ., π.χ.

σχέση βροχής – απορροής

$$y_{k+1} = a_k y_k + b_k x_k$$

σχέση στάθμης – απορροής

$$z_{k+1} = \gamma_1 y_{k+1}^2$$

(γ) *Κανονική διαφορική εξίσωση*: Μπορεί να προκύψει από ισοζύγιο μάζας, ή διεργασίες απομείωσης ή προσαύξησης της εξεταζόμενης μεταβλητής κατάστασης, π.χ. μεταβολή της ποσότητας διαλυμένου οξυγόνου $y(t)$ σε λίμνη που δέχεται ρυπαντικό φορτίο $x(t)$

$$\frac{dy}{dt} = a y(t) + b x(t), \text{ όπου } a, b \text{ είναι παράμετροι}$$

(δ) *Ολοκληρωτική εξίσωση*: Όπως η γνωστή από την υδρολογία σχέση βροχόπτωσης – παροχής (υδρογράφημα) με τη μορφή ολοκληρώματος

$$y(t) = \int_{t_0}^t g(t, \tau) x(\tau) d\tau$$

(ε) *Διαφορική εξίσωση με μερικές παραγώγους*: Όπως η εξίσωση ροής σε υπόγειο υδροφορέα

$$S \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(T\nabla h) = R - P$$

όπου	S	συντελεστής αποθήκευσης	παράμετρος
	T	μεταφορικότητα	παράμετρος
	h	υδραυλικό φορτίο	εξαρτημένη μεταβλητή
	R	κατείσδυση	εξωγενής μεταβλητή
	P	ένταση άντλησης	μεταβλητή απόφασης

Παράδειγμα 1.1 Κρεμαστή ράβδος – διαμόρφωση εξισώσεων

Ένα στοιχείο μήκους L θα φτιαχτεί από αρκετά ισχυρό υλικό ώστε με λογικό εμβαδόν διατομής, να αντέχει σε φορτίο F . Η ράβδος θα κρεμαστεί κατακόρυφα, στερεωμένη στην οροφή ενός χώρου από τη μια άκρη, και η επιμήκυνση λόγω φορτίου δε θα ξεπερνά δ μονάδες.

A. Περιγραφή προβλήματος και στόχου

Μετά από συνεργασία του ιδιοκτήτη του χώρου και του μηχανικού-μελετητή προκύπτει κοινή κατανόηση του προβλήματος και του στόχου, ώστε να μην προκύψουν αργότερα διαφωνίες για την προτεινόμενη λύση.

B. Συμβολικό υπόδειγμα

L	μήκος του στοιχείου σε μέτρα (δίδεται)
ΔL	επιμήκυνση (m)
A_x	εμβαδόν της διατομής του στοιχείου (m^2)
A	το σημείο επαφής οροφής με το στοιχείο (δίδεται)
B	το κάτω άκρο του στοιχείου (δίδεται)
E	μέτρο ελαστικότητας του υλικού
F	το αξονικό φορτίο (δίδονται οι ακραίες τιμές του)
F_A, F_B	αξονικά φορτία στα ακραία σημεία A και B
U_A, U_B	μετακινήσεις των σημείων A και B εξαιτίας των F_A και F_B
δ	μεγίστη επιτρεπτή τιμή του U_B

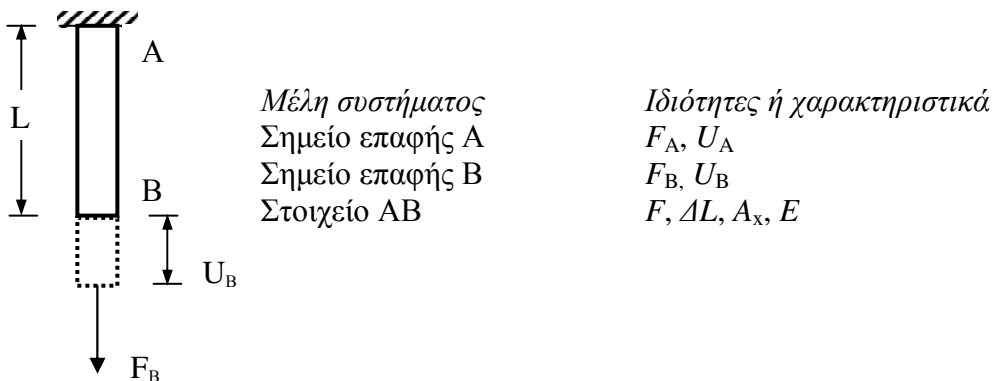
Το υπόδειγμα αυτό συνδέει τη γνώση που έχει ο μηχανικός για το πραγματικό υπόδειγμα που ακολουθεί πιο κάτω.

[Πραγματικός κόσμος] → [Συμβολικό μοντέλο] → [Μαθηματικό Μοντέλο]

Από τις μεταβλητές μερικές ελέγχονται άμεσα από τον μηχανικό και άλλες όχι. Εάν πρέπει να καθορίσουμε το A_x και το E αυτές οι μεταβλητές ονομάζονται «μεταβλητές απόφασης». Οι άλλες μεταβλητές, για δεδομένο F , μπορούν να υπολογισθούν σαν συναρτήσεις των A_x , E και F .

Γ. Σχηματικό υπόδειγμα

Στο Σχήμα 1.3 εμφανίζεται η απλοποιημένη περιγραφή του πραγματικού συστήματος, όπως την κατανοεί ο μηχανικός. Είναι ζητούμενο να ελεγχθεί κατά πόσο η περιγραφή αυτή ενσωματώνει τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος.



Σχήμα 1.3. Σχηματικό υπόδειγμα του συστήματος

Δ. Μαθηματικά υποδείγματα

Γιά τη συμπεριφορά του συστήματος:

$$\frac{F}{A_x} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (1) \quad \text{νόμος ελαστικής συμπεριφοράς}$$

Για τις αλληλεπιδράσεις των μελών:

$$\Delta L = U_B - U_A \quad (2)$$

$$U_A = 0 \quad (3)$$

$$F = F_B \quad (4)$$

$$F_A = F_B \quad (5)$$

Για την αντίδραση του συστήματος σε εξωτερικά ερεθίσματα:

Το φορτίο F_B είναι η εισροή (input) στο σύστημα και οι μετακινήσεις, U_A και U_B είναι οι εκροές (output). Από τις (1), (2) και (3),

$$\Delta L = U_B = \frac{F L}{A_x E} \quad (6)$$

Για τη σχεδίαση της ράβδου απαιτείται: $U_B \leq \delta$ ή $A_x E \geq \frac{L F}{\delta}$ (7)

και για διακύμανση του F μεταξύ των τιμών F_1 και F_2 $A_x E \geq \frac{L F_2}{\delta}$ (8)

Έτσι ο μηχανικός συμπεραίνει ότι οποιαδήποτε επιλογή A_x και E που ικανοποιεί την (8) θα πρέπει να είναι αποδεκτή. Πως θα γίνει η επιλογή; Η αισθητική επιβάλλει περιορισμούς στο εμβαδό της διατομής ενώ ο ιδιοκτήτης επιθυμεί μια οικονομική λύση. Έστω ότι διαμορφώνονται τα επιπλέον κριτήρια:

Κυκλική τομή, όχι μεγαλύτερη από 10 cm^2 , και όσο πιο μικρό κόστος γίνεται.

Αν το κόστος ανά μονάδα όγκου του υλικού είναι K τότε το κόστος για το υλικό είναι $K L A_x$. Το πρόβλημα λοιπόν για την επιλογή του υλικού διατυπώνεται ως εξής:

$$K L A_x \text{ ελάχιστο} \quad \text{και} \quad E \geq \frac{L F_2}{A_x \delta}$$

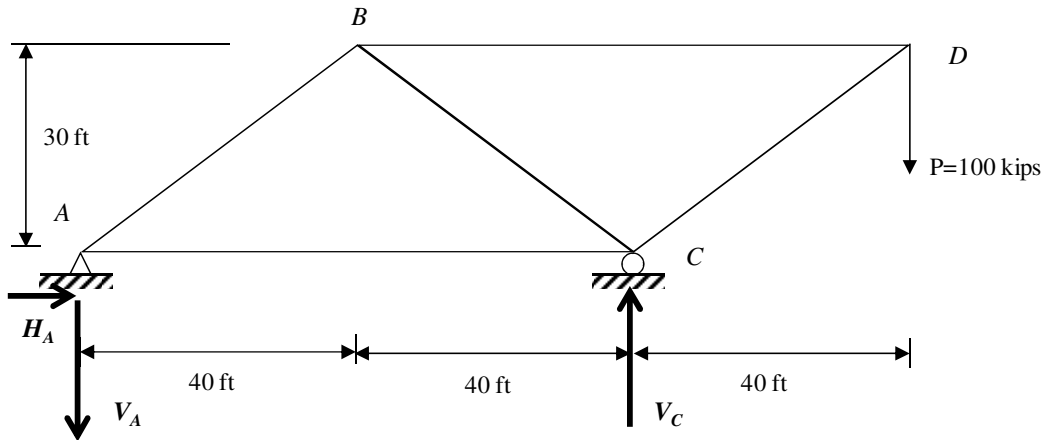
Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι όσο πιο ακριβό είναι το υλικό τόσο πιο μεγάλο το E , και έστω ότι υπάρχει μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ του K και του E . Τότε το πρόβλημα γράφεται

$$E \text{ ελάχιστο} \quad \text{και} \quad E \geq \frac{L F_2}{A_x \delta}$$

Από πίνακες με τις ιδιότητες των υλικών αναζητείται το υλικό που έχει το μικρότερο E αλλά όχι μικρότερο από την τιμή $\frac{L F_2}{A_x \delta}$.

Παράδειγμα 1.2 (Ossenbruggen) Δικτύωμα Ελάχιστου Βάρους

Θεωρείστε το δικτύωμα του Σχήματος 1.4. Διατυπώστε ένα μαθηματικό υπόδειγμα για να σχεδιαστεί ένα απλό δικτύωμα ελάχιστου βάρους. Η κρίσιμη επιτρεπόμενη θλιπτική και εφελκυστική τάση για τα στοιχεία του δικτυώματος είναι 10 ksi και 20 ksi αντίστοιχα. Το δικτύωμα πρόκειται να κατασκευαστεί από χάλυβα. Όλα τα στοιχεία με ίδιο τύπο φόρτισης έχουν το ίδιο εμβαδόν διατομής.



Σχήμα 1.4. Στατικά Ορισμένο Δικτύωμα

Μεταβλητές Απόφασης. Τα δομικά στοιχεία θα διαστασιολογηθούν ανάλογα με τον τύπο της φόρτισης που δέχονται (θλίψη ή εφελκυσμός). Έτσι οι μεταβλητές ελέγχου ορίζονται ως

$$x_1 = A_1 = \text{εμβαδόν διατομής θλιπτικού στοιχείου (in}^2\text{)}$$

$$x_2 = A_2 = \text{εμβαδόν διατομής εφελκυστικού στοιχείου (in}^2\text{)}$$

Το διάνυσμα μεταβλητών απόφασης είναι $\underline{u} = [x_1 \ x_2]^T$

Αντιδράσεις. Οι αντιδράσεις στα σημεία στήριξης A και C προσδιορίζονται με την εξίσωση στατικής ισορροπίας για όλο το δικτύωμα.

$$\sum F_x = 0 \quad H_A = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad -V_A + V_C - 100 = 0 \quad V_A = 50 \text{ kips}$$

$$\sum M_A = 0 \quad 80 V_C - 120 \cdot 100 = 0 \Rightarrow V_C = 150 \text{ kips}$$

Δυνάμεις και τάσεις στοιχείων. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των κόμβων υπολογίζουμε τις δυνάμεις σε κάθε στοιχείο. Για τον κόμβο D γράφουμε (προσοχή στα πρόσημα):

$$\sum F_x = 0 \quad -BD + 4/5 CD = 0 \Rightarrow BD = 133 \text{ kips}$$

(εφελκυσμός στη ράβδο BD)

$$\sum F_y = 0 \quad 3/5 CD - 100 = 0 \Rightarrow CD = 167 \text{ kips}$$

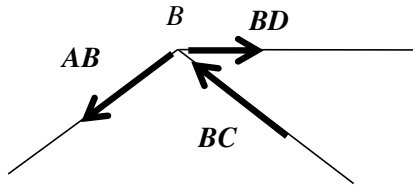
(θλίψη στη ράβδο CD)

Οι τάσεις των στοιχείων αυτών είναι:

$$\sigma_{BD} = 133 / A_2$$

και $\sigma_{CD} = 167 / A_1$

Παρόμοια για τον κόμβο B γράφουμε:



$$\sum F_x = 0 \quad BD - 4/5 BC - 4/5 AB = 0$$

$$\Rightarrow 133 - 8/5 AB = 0 \Rightarrow AB = 83.3 \text{ kips}$$

(εφελκυσμός στη ράβδο AB)

$$\sum F_y = 0 \quad -3/5 AB + 3/5 BC = 0 \Rightarrow AB = BC$$

(θλίψη στη ράβδο BC)

Οι τάσεις των στοιχείων αυτών είναι:

$$\sigma_{AB} = 83.3 / A_2$$

$$\sigma_{BC} = 83.3 / A_1$$

και παρόμοια υπολογίζουμε

$$\sigma_{AC} = 66.7 / A_1$$

Περιορισμοί. Οι τάσεις των στοιχείων πρέπει να είναι μικρότερες ή ίσες της κρίσιμης επιτρεπόμενης θλιπτικής και εφελκυστικής τάσης 10 ksi και 20 ksi αντίστοιχα

$$\text{Στοιχείο } AB \text{ εφελκυσμός } \sigma_{AB} = 83.3 / A_2 \leq 20 \quad \text{ή} \quad A_2 \geq 4.2 \text{ in}^2$$

$$\text{Στοιχείο } AC \text{ θλίψη } \sigma_{AC} = 66.7 / A_1 \leq 10 \quad \text{ή} \quad A_1 \geq 6.7 \text{ in}^2$$

$$\text{Στοιχείο } BC \text{ θλίψη } \sigma_{BC} = 83.3 / A_1 \leq 10 \quad \text{ή} \quad A_1 \geq 8.3 \text{ in}^2$$

$$\text{Στοιχείο } BD \text{ εφελκυσμός } \sigma_{BD} = 133 / A_2 \leq 20 \quad \text{ή} \quad A_2 \geq 6.7 \text{ in}^2$$

$$\text{Στοιχείο } CD \text{ θλίψη } \sigma_{CD} = 167 / A_1 \leq 10 \quad \text{ή} \quad A_1 \geq 16.7 \text{ in}^2$$

Όλοι οι περιορισμοί ικανοποιούνται αν $A_1 \geq 16.7 \text{ in}^2$ και $A_2 \geq 6.7 \text{ in}^2$

Στο επίπεδο $A_1 - A_2$ οι περιορισμοί ικανοποιούνται στη γραμμοσκιασμένη περιοχή, η οποία για τον λόγο αυτόν ονομάζεται «εφικτή περιοχή».

Αντικειμενική συνάρτηση. Το βάρος κάθε στοιχείου είναι ίσο με το ειδικό βάρος του χάλυβα (490 lb/ft^3 ή 3.4 lb/ft-in^2) επί τον όγκο του στοιχείου. Το συνολικό βάρος του δικτύματος είναι το άθροισμα των βαρών των στοιχείων που το αποτελούν, δηλαδή

$$z = 3.4 [V_{AB} + V_{AC} + V_{BC} + V_{BD} + V_{CD}]$$

όπου V = όγκος κάθε στοιχείου = μήκος του στοιχείου επί το εμβαδόν της διατομής του.

$$z = 3.4 [50 A_2 + 80 A_1 + 50 A_1 + 80 A_2 + 50 A_1]$$

ή

$$z = 612 A_1 + 442 A_2$$

Μαθηματικό υπόδειγμα. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος έχει ολοκληρωθεί. Συνοψίζοντας:

$$\min z = 612 A_1 + 442 A_2$$

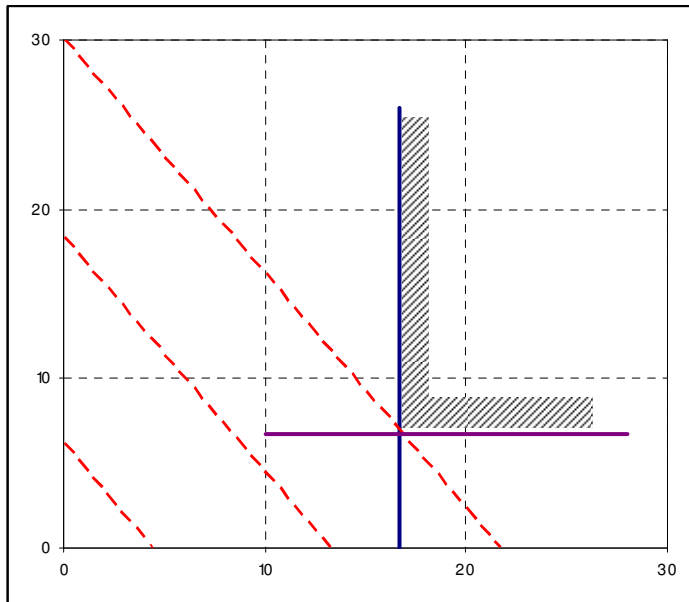
υπό τους περιορισμούς

$$A_1, A_2 \geq 0$$

$$A_1 \geq 16.7 \text{ in}^2$$

$$A_2 \geq 6.7 \text{ in}^2$$

Επίλυση. Η λύση προκύπτει γραφικά αυξάνοντας την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μέχρι να έχει τουλάχιστον ένα κοινό σημείο με την εφικτή περιοχή. Το ελάχιστο βάρος του δικτυώματος προκύπτει για $A_1 = 16.7 \text{ in}^2$ και $A_2 = 6.7 \text{ in}^2$ και είναι 13182 lb.



Παρατηρήσεις. Η δημιουργία του υποδείγματος χρησιμοποιεί βασικές αρχές της μηχανικής και του στατικού σχεδιασμού. Στις περισσότερες περιπτώσεις γνώσεις μηχανικής και τεχνικής οικονομικής θα είναι επαρκείς για τη διαμόρφωση του υποδείγματος. Η βέλτιστη λύση θα ικανοποιεί ταυτόχρονα την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς. Η προσέγγιση αυτή θα πρέπει να αποφέρει ένα καλύτερο αποτέλεσμα, καθώς το βάρος του δικτυώματος θα είναι ελάχιστο (και επομένως η λύση πιο οικονομική) ενώ θα αξιοποιείται η γνώση για τη συμπεριφορά του δικτυώματος και τις ιδιότητες του υλικού.

1.7 ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Οι ρίζες της Επιχειρησιακής Έρευνας (Ε.Ε.) μπορεί να ανιχνευθούν πολλές δεκαετίες πριν, όταν γίνονταν οι πρώτες προσπάθειες χρήσης της επιστημονικής προσέγγισης για τη διοίκηση οργανισμών ή τον κεντρικό σχεδιασμό της οικονομίας χωρών. Όμως η αρχή των μεθόδων που σήμερα αποκαλούνται επιχειρησιακή έρευνα, γενικά αποδίδεται στις στρατιωτικές υπηρεσίες των συμμαχικών δυνάμεων στην αρχή του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, για τον επιμερισμό σπάνιων πόρων με ένα αποτελεσματικό τρόπο σε

διάφορες στρατιωτικές λειτουργίες και σε δραστηριότητες της κάθε λειτουργίας. Από την εποχή του πολέμου, η Ε.Ε. έχει επεκταθεί σημαντικά στη βιομηχανία, επιχειρήσεις, και κυβέρνηση. Αυτή η επέκταση αποδίδεται στη βελτίωση των τεχνικών Ε.Ε. και στη διαθεσιμότητα ισχυρών ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Στις περισσότερες μεθόδους Ε.Ε. εφαρμόζεται μια κοινή προσέγγιση (Σχήμα 1.2). Το σύστημα περιγράφεται με ένα **μαθηματικό υπόδειγμα**. Το υπόδειγμα αυτό αποτελείται από εξισώσεις, λογικές δηλώσεις, και άλλες οδηγίες για την επεξεργασία διαθέσιμων στοιχείων και/ή τη δημιουργία και επεξεργασία συνθετικών στοιχείων. Οι σχέσεις που περιγράφουν το σύστημα, συσχετίζοντας τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου, εκφράζονται με **παραμέτρους** που συνήθως απαιτείται να προσδιοριστούν με παρατηρήσεις και μετρήσεις των μεταβλητών εξόδου και που μπορεί να είναι σταθερές ή να μεταβάλλονται με προκαθορισμένο τρόπο. Μεταβλητές που δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν ονομάζονται **εξωγενείς** και μπορεί να περιγράφονται με συναρτήσεις πιθανότητας. Αντίθετα μεταβλητές των οποίων οι τιμές είναι δυνατόν να καθοριστούν πλήρως ή μερικώς κατά την επιθυμία του υπεύθυνου (καταβάλλοντας το ανάλογο κόστος) ονομάζονται **μεταβλητές απόφασης**.

Μια **πολιτική**, ή σύνολο αποφάσεων, προκύπτει για κάθε σύνολο τιμών των μεταβλητών απόφασης. Απαγορεύσεις εφαρμοζόμενες στο υπόδειγμα, ή **περιορισμοί**, μπορεί να περιλαμβάνουν φυσικές, οικονομικές, ή οποιεσδήποτε άλλες ποσότητες εκφράσιμες με μαθηματικούς όρους. Μια πολιτική που δεν παραβιάζει οποιουδήποτε περιορισμούς είναι μια **εφικτή πολιτική**, και το σύνολο όλων των εφικτών πολιτικών συνιστά τον χώρο των εφικτών πολιτικών.

Οι **μεταβλητές κατάστασης** αντιπροσωπεύουν τον ελάχιστο αριθμό μεταβλητών που απαιτούνται για να περιγράψουν τις συνθήκες του συστήματος σε οποιοδήποτε σημείου χρόνου ή χώρου.

Σε μια τεχνική επιχειρησιακής έρευνας, η **αντικειμενική συνάρτηση** είναι ένας τρόπος να εκφράζονται οι έννοιες της βελτιστότητας ή καλύτερου αποτελέσματος. Με γενικότερους όρους, η αντικειμενική συνάρτηση είναι ένας **δείκτης επίδοσης** με βάση τον οποίο μπορεί να κριθούν οι συνέπειες ή παράγωγα του συστήματος; Για παράδειγμα, στο πλαίσιο των έργων, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να καθορίζει το κόστος σαν συνάρτηση των διαφόρων μεγεθών των πόρων που χρησιμοποιούνται ή δημιουργούνται.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η μεθοδολογία της Ε.Ε. απαιτεί:

(1) Υπόδειγμα του συστήματος στη γενική μορφή $\underline{y} = f(\underline{x}, \underline{u}, \underline{\xi})$
όπου \underline{y} εξαρτημένες μεταβλητές $\underline{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$
 \underline{x} ανεξάρτητες μεταβλητές $\underline{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_p]^T$
 \underline{u} μεταβλητές απόφασης (ελέγχου) $\underline{u} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]^T$
 $\underline{\xi}$ εξωγενείς μεταβλητές

(2) Δείκτης επίδοσης (αντικειμενική συνάρτηση) που σχετίζεται με το οικονομικό αποτέλεσμα μιας συγκεκριμένης πολιτικής που εφαρμόζεται στο πρόβλημα

$$\min J = J(\underline{y}, \underline{u})$$

(3) Σύνολο περιορισμών $F(\underline{y}, \underline{u}) = 0$ ισότητες
 $G(\underline{y}, \underline{u}) \geq 0$ ανισότητες

Για όλα τα σύνθετα προβλήματα, η λύση επιτυγχάνεται με υπολογιστικές διαδικασίες. Για τον λόγο αυτόν, οι εφαρμογές επιχειρησιακής έρευνας απαιτούν έναν πλήρη και σαφή ορισμό του συστήματος και άμεσες δηλώσεις που αναμένουν ενδιάμεσα αποτελέσματα και προσδιορίζουν εναλλακτικούς τρόπους επεξεργασίας πληροφοριών. Η συστηματική διαδικασία που κατευθύνει τη λύση ενός προβλήματος προγραμματισμού αναφέρεται σαν **αλγόριθμος**. Συχνά για τη λύση είναι απαραίτητη η εφαρμογή τεχνικών επιχειρησιακής έρευνας, προσεγγίσεων, απλουστευτικών παραδοχών, και μετασχηματισμών σε μαθηματικές μορφές που είναι επιλύσιμες. Είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι, αφού εφαρμοστούν τέτοιες διαδικασίες, το υπόδειγμα παραμένει μια ισχύουσα αναπαράσταση του συστήματος.

Σε ένα **γραμμικό** υπόδειγμα, η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι σε **γραμμική μορφή**. Σε ένα **μη γραμμικό** υπόδειγμα, μερικοί ή όλοι οι περιορισμοί και/ή η αντικειμενική συνάρτηση είναι **μη γραμμικοί**.

Στα **προσδιοριστικά** υποδείγματα, ή στοιχεία υποδειγμάτων, σε κάθε μεταβλητή και παράμετρο αποδίδεται ένας καθορισμένος σταθερός αριθμός ή μια σειρά σταθερών αριθμών για οποιοδήποτε σύνολο συνθηκών. Σε ένα **πιθανολογικό** (ή **στοχαστικό**) υπόδειγμα, οι μεταβλητές και παράμετροι και η δομή του υποδείγματος μπορεί να είναι πιο δύσκολο να καθοριστούν.

Τα **στατικά** υποδείγματα δε λαμβάνουν άμεσα υπόψη τη μεταβλητή του χρόνου, σε αντίθεση με τα **δυναμικά** υποδείγματα. Η διάκριση αυτή δεν είναι πάντοτε περιοριστική στον γραμμικό προγραμματισμό (Γ.Π.), δυναμικό προγραμματισμό (Δ.Π.), και άλλες επώνυμες τεχνικές επιχειρησιακής έρευνας,

καθώς οι περισσότερες μπορεί να χρησιμοποιούνται τόσο για στατικά όσο και για δυναμικά προβλήματα.

Σε ένα υπόδειγμα **σωρευτικών** παραμέτρων, οι διάφορες παράμετροι και εξαρτημένες μεταβλητές είναι ομοιογενείς σε όλο το σύστημα. Ένα υπόδειγμα **κατανεμημένων** παραμέτρων λαμβάνει υπόψη τις αποκλίσεις συμπεριφοράς από σημείο σε σημείο μέσα σε όλο το σύστημα.

Οι κύριες τεχνικές υποδειγμάτων έχουν ταξινομηθεί ως:

- (1) υποδείγματα και τεχνικές αναλυτικής βελτιστοποίησης,
- (2) πιθανολογικά υποδείγματα και τεχνικές,
- (3) στατιστικές τεχνικές, και
- (4) προσομοίωση και έρευνα ή τεχνικές δειγματοληψίας.

Τα υποδείγματα αναλυτικής βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν τις μεθόδους που χρησιμοποιούν κλασσικό λογισμό και πολλαπλασιαστές Lagrange καθώς επίσης και τις τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού: γραμμικό, μη γραμμικό, δυναμικό και βέλτιστο έλεγχο. Υποδείγματα δικτύων όπως PERT και η μέθοδος κρίσιμης διαδρομής (CPM) χρησιμοποιούνται συχνά για τον χρονικό προγραμματισμό έργων σχεδιασμού και κατασκευής. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναπτυχθούν με λεπτομέρεια οι παραπάνω τεχνικές και η εφαρμογή τους σε προβλήματα μηχανικού.

Για την πληρότητα της παρουσίασης αναφέρονται επιπλέον ένας αριθμός τεχνικών που όμως δε θα αναπτυχθούν περαιτέρω στο παρόν πόνημα:

1. Πιθανολογικές τεχνικές συνήθιζεται να περιγράφουν στοιχεία στοχαστικών συστημάτων μέσω κατάλληλων στατιστικών παραμέτρων. Τεχνικές ουρών αναμονής και θεωρίας αποθεμάτων είναι αυτού του τύπου. Υποδείγματα ουρών αναμονής που προβλέπουν τέτοια χαρακτηριστικά όπως μέσος όρος και απόκλιση του χρόνου αναμονής, μπορεί να παρέχουν στοιχεία εισόδου σε υποδείγματα βελτιστοποίησης τα οποία χρησιμοποιούν είτε αναλυτικές τεχνικές ή προσεγγίσεις, προσομοίωσης και έρευνας.
2. Στατιστικές τεχνικές περιλαμβάνουν τέτοιες μεθόδους όπως ανάλυση πολλών μεταβλητών, στατιστική επαγωγή, και θεωρία αποφάσεων. Αυτές οι τεχνικές έχουν ευρύτατη εφαρμογή στην ανάλυση παρατηρήσεων, και ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να τις βρει να αναπτύσσονται με λεπτομέρεια σε άλλα βοηθήματα.
3. Η προσομοίωση και έρευνα ή τεχνικές δειγματοληψίας χρησιμοποιούνται ευρέως στον σχεδιασμό. Η προσομοίωση είναι μια περιγραφική τεχνική που ενσωματώνει τις ποσοτικοποιήσιμες σχέσεις ανάμεσα στις μεταβλητές και περιγράφει το αποτέλεσμα της λειτουργίας ενός συστήματος κάτω από ένα δεδομένο σύνολο στοιχείων εισόδου και λειτουργικών συνθηκών. Εάν

καθορίζεται μια αντικειμενική συνάρτηση, οι τιμές της για διάφορες δοκιμές δημιουργεί μια «επιφάνεια απόκρισης». Το υπόδειγμα κατόπιν χρησιμοποιείται για λήψη αποφάσεων, συνδυάζοντας το με δειγματοληψία ή τεχνικές έρευνας που εξερευνούν την επιφάνεια απόκρισης και αναζητούν σχεδόν βέλτιστες ή βέλτιστες λύσεις.

4. Ένα πολύπλοκο σύστημα υποδομής μπορεί να πρέπει να αναλυθεί με βάση πολύπλευρη λειτουργία, πολυσκοπικά παράγωγα, και πολλούς στόχους. Υποδείγματα προσομοίωσης έχουν αναπτυχθεί για τέτοια συστήματα. Αποσύνθεση και πολυκριτηριακές προσεγγίσεις και άλλες ειδικές μέθοδοι ασχολούνται με σταθμίσεις ανάμεσα σε διάφορους σκοπούς και στόχους.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΕΞΑΣΚΗΣΗ

1.1 Με βάση τις σπουδές και εμπειρία σας μέχρι σήμερα, για ένα συγκεκριμένο έργο ή πρόγραμμα που σχεδιάζεται στην τοπική σας κοινότητα με χαρακτήρα δημόσιου έργου (π.χ. ένα δημοτικό σύστημα ύδρευσης ή ένα δημοτικό χώρο στάθμευσης), προσδιορίστε τους τοπικούς, περιφερειακούς και εθνικούς φορείς που ενδεχομένως να έχουν δικαιοδοσία σχετικά με άδειες, αποζημιώσεις, ρυθμίσεις κ.λπ. που απαιτούνται για την κατασκευή και χρηματοδότηση.

1.2 Κατά τη διάρκεια του μαθήματος, συλλέξτε άρθρα εφημερίδων ή ενημερωτικές εκπομπές στην τηλεόραση αναφορικά με δημόσια έργα και κάνετε μια εκτίμηση των ζητημάτων που τονίζονται στον έντυπο ή ηλεκτρονικό τύπο. Τέτοια ζητήματα μπορεί να σχετίζονται με τον σκοπό του συγκεκριμένου έργου, την πολιτική και νομοθετική ιστορία, κόστη και ρυθμίσεις για χρηματοδότηση, τις εναλλακτικές λύσεις, αναγνώριση των ευεργετούμενων, κ.λπ. Σχολιάστε κατά πόσο χρησιμοποιούνται και σε τι βαθμό οι νέοι στόχοι και μεθοδολογίες που αναφέρθηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

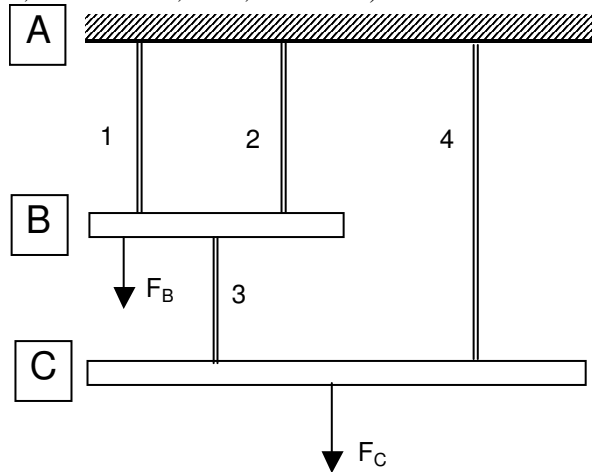
1.3 Η βιβλιοθήκη του πανεπιστημίου αποφάσισε να μένει ανοικτή όλο το 24ωρο. Μετά από μελέτη στατιστικών στοιχείων εκτιμάται ότι ο ελάχιστος αριθμός υπαλλήλων που απαιτούνται ανά 4ωρο είναι όπως στον παρακάτω πίνακα:

Διάστημα (ώρες)	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
Ελάχιστος αριθμός υπαλλήλων	4	8	10	9	14	3

Αν κάθε υπάλληλος εργάζεται συνέχεια 8 ώρες κάθε μέρα, αναπτύξτε ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το σύστημα και με την επίλυση του μπορεί να βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός των υπαλλήλων που απαιτούνται για να

επιτευχθεί ο στόχος της συνεχούς λειτουργίας της βιβλιοθήκης. Δε ζητείται να επιλύσετε το πρόβλημα.

1.4 Προσπαθήστε να εφαρμόσετε τη μέθοδο των Παραδειγμάτων 1.1 και 1.2 με τα ίδια βήματα, στο εξής σύστημα (Meredith *et al.*, Design and Planning of Engineering Systems, Prentice Hall, 1973, σελίδα 82).



1.5 Μια εταιρεία κατασκευάζει προκατασκευασμένες οικίες και θέλει να μεγιστοποιήσει το κέρδος της για χρονικό διάστημα 20 εβδομάδων με 5 εργάσιμες μέρες ανά βδομάδα, επιλέγοντας κατάλληλα το μείγμα των διαφόρων τύπων οικιών που κατασκευάζει. Η εταιρεία διαθέτει δύο ειδικευμένα, ένα για τις εργασίες των θεμελιώσεων και ένα για τις ανωδομές, και υπάρχουν απεριόριστα αποθέματα όλων των τύπων οικιών. Ο αριθμός των απαιτούμενων ημερών εργασίας συνεργείου για τους διάφορους τύπους οικιών και το αντίστοιχο καθαρό κέρδος της εταιρείας δίδονται στο παρακάτω πίνακα:

Τύπος	A	B	Γ	Δ	E
Θεμελίωση	1	7	4	8	12
Ανωδομή	4	3	6	2	8
Κέρδος (χιλ. €)	25	75	75	50	160

Αναπτύξτε ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το σύστημα και με την επίλυση του μπορεί να βρεθεί ο αριθμός των οικιών κάθε τύπου που πρέπει να κατασκευαστούν. Διατυπώστε την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς. Δε ζητείται να επιλύσετε το πρόβλημα.