

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

# ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ

### Σύνοψη

Θεωρία και πράξη στην κυκλοφοριακή ροή μελετώνται για δύο είδη ροής: τη διακοπτόμενη ροή σε οδούς, όπως οι αυτοκινητόδρομοι, οι εθνικές οδοί κ.λπ., και τη μη διακοπτόμενη ροή σε οδούς, όπως οι αστικές, στις οποίες σηματοδοτούμενοι και μη κόμβοι αποτελούν σημεία διασταύρωσης οδών και ροών.

Τρία εισαγωγικά βασικά μεγέθη κατανόησης στην Κυκλοφοριακή Μηχανική είναι η ζήτηση, η χωρητικότητα και ο κυκλοφοριακός φόρτος. Η ζήτηση είναι ο αριθμός των οχημάτων που πρόκειται (επιθυμούν) να διέλθουν από συγκεκριμένο σημείο ή τμήμα της οδού, η χωρητικότητα (ή κυκλοφοριακή ικανότητα) εκφράζει τον αριθμό των οχημάτων που χωρά το συγκεκριμένο τμήμα της οδού και ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι ο αριθμός των οχημάτων που μετράμε ότι τελικά περνούν από το συγκεκριμένο σημείο στη μονάδα του χρόνου. Και τα τρία μεγέθη μετρώνται σε αριθμό οχημάτων ή αριθμό ισοδύναμων επιβατικών οχημάτων στη μονάδα χρόνου, κυρίως στην ώρα.

Ο ρυθμός ροής είναι ένα μέγεθος παραπλήσιο του κυκλοφοριακού φόρτου και μετρά τον αριθμό των οχημάτων που διέρχονται από σημείο ή τμήμα της οδού σε μικρότερο της ώρας χρονικό διάστημα, συνήθως στα 15 λεπτά, και ο οποίος μετατρέπεται με αναγωγή σε ωριαίο φόρτο... Είναι κατάλληλος για φόρτος σχεδιασμού και για να ερμηνεύσει φαινόμενα ουράς, και χρησιμοποιείται σε πολλές θεωρήσεις και στις αναλύσεις χωρητικότητας αντί του ωριαίου φόρτου, αφού αποτυπώνει πιο εύστοχα τις «δυσμενέστερες» συνθήκες κυκλοφορίας.

Η Στάθμη ή Επίπεδο Εξυπηρέτησης είναι ένα ποιοτικό μέγεθος που εκφράζει τις συνθήκες κυκλοφορίας και υπολογίζεται με μεθοδολογίες που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια του συγγράμματος. Συμβολίζεται με τα γράμματα A, B, C, D, E, F, ξεκινώντας από τις καλύτερες προς τις χειρότερες. Σε κάθε στάθμη, ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορεί να εξυπηρετηθεί ονομάζεται φόρτος εξυπηρέτησης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δοθούν αναλυτικές μεθοδολογίες υπολογισμού της Στάθμης Εξυπηρέτησης για πολλά οδικά τμήματα διαφορετικών χαρακτηριστικών, όπως αυτοκινητόδρομοι, τμήματα υπεραστικών οδών, κυκλικοί κόμβοι, σηματοδοτούμενοι κόμβοι κ.λπ.

Στη Στάθμη Εξυπηρέτησης και γενικότερα στις συνθήκες κυκλοφορίας επιδρούν ποικίλοι παράγοντες, κυρίως ο άνθρωπος ως οδηγός ή ως οποιοσδήποτε άλλος χρήστης οδού, αλλά και η οδός, το όχημα και οι εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ταυτόχρονα, όμως, ευρύτερα κοινωνικοί και οικονομικοί παράγοντες επιδρούν στη λειτουργία της κυκλοφορίας, στην εμφάνιση κυκλοφοριακών προβλημάτων και συμφορήσεων, και συντελούν στην καθημερινώς βιούμενη, κυρίως στις πόλεις μας, ανεπάρκεια του οδικού δικτύου να φιλοξενήσει μεγάλο αριθμό μετακινήσεων.

Το πρόβλημα αυτό ανισορροπίας χωρητικότητας και ζήτησης εμφανίζεται διεθνώς στις περισσότερες πόλεις του κόσμου και σχετίζεται με κριτήρια όπως το μέγεθος και η πυκνότητα του πληθυσμού, ο αριθμός των οχημάτων, τα πολεοδομικά και χωροταξικά χαρακτηριστικά. Όταν ο πληθυσμός αυξάνεται, αναπτύσσονται χρήσεις γης, οι οποίες έλκουν και παράγουν μετακινήσεις, για την πραγματοποίηση των οποίων πρέπει να χρησιμοποιηθούν μέσα και δίκτυα. Η δημιουργία νέων μέσων και δικτύων όμως έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε αλλαγές υφιστάμενων και δημιουργία νέων χρήσεων γης, οι οποίες αυξάνουν τις μετακινήσεις και χρήζουν εξυπηρέτησης με περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας των μέσων και των δικτύων. Αυτά όλα ισχύουν με την προϋπόθεση μιας οικονομικής ανά-

πτυξης, γιατί στην αντίθετη περίπτωση, στην περίπτωση δηλαδή οικονομικής ύφεσης, οι μετακινήσεις μειώνονται, αφού μειώνεται η δραστηριοποίηση των ανθρώπων, και χρήσεις γης, όπως εμπόριο, εργασία και αναψυχή, δεν χρησιμοποιούνται ή και εκλείπουν.

Στη σημερινή εποχή, η τεχνολογία υποβοηθά στη διαχείριση των προβλημάτων της κυκλοφορίας με τις νέες εφαρμογές και καινοτομίες στον εξοπλισμό των οχημάτων αλλά και του οδικού συστήματος. Επιπλέον, η ανάγκη για συμπερίληψη και αποφυγή του κοινωνικού αποκλεισμού ανθρώπων με κινητικά ή άλλα προβλήματα είναι επιτακτική και διαπερνά πλέον τη νομοθεσία που αφορά τις μετακινήσεις, δημιουργώντας έτσι ένα νέο πλαίσιο καθολικού και προσβάσιμου σχεδιασμού. Αυτές οι νέες συνιστώσες, τεχνολογία και συμπεριληπτική νομοθεσία, αναμένεται να αλλάξουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο μελέτης του οδικού συστήματος και των μετακινήσεων στο άμεσο μέλλον.

## Περιεχόμενα κεφαλαίου

- 1.1 Είδη κυκλοφοριακής ροής
- 1.2 Ζήτηση, χωρητικότητα και κυκλοφοριακός φόρτος
- 1.3 Ο ρυθμός ροής και η σημασία του
- 1.4 Η Στάθμη Εξυπηρέτησης
- 1.5 Χωρικά επίπεδα ανάλυσης
- 1.6 Παράγοντες επίδρασης στις κυκλοφοριακές συνθήκες και στη Στάθμη Εξυπηρέτησης
- 1.7 Κοινωνικοοικονομικό πλαίσιο ανάλυσης της κυκλοφορίας
- 1.8 Οι τρέχουσες τεχνολογικές τάσεις
- 1.9 Οι τρέχουσες νομοθετικές συμπεριλήψεις
- 1.10 Ασκήσεις
- 1.11 Βιβλιογραφία

### 1.1 Είδη κυκλοφοριακής ροής

Μια αρχική και βασική διάκριση για τη μελέτη της Κυκλοφοριακής Ροής της μηχανοκίνητης κυκλοφορίας γίνεται με κριτήριο το αν η ροή σε μια οδό διακόπτεται ή καθυστερεί από τη συμβολή άλλων οδών. Δύο είδη οδών διακρίνονται με βάση αυτό το κριτήριο:

- i. Οδοί με *μη διακοπτόμενη κυκλοφοριακή ροή* (uninterrupted-flow). Αφορά οδούς με γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά που δεν δημιουργούν «διακοπές» στη ροή των οχημάτων. Απουσιάζουν κατά μήκος τους, για παράδειγμα, ισόπεδες διασταυρώσεις, σήμανση προτεραιότητας, σηματοδότες κ.ά. Τέτοια παραδείγματα είναι οι αυτοκινητόδρομοι αλλά και αστικές ή υπεραστικές αρτηρίες που σε μεγάλα τμήματά τους δεν εμφανίζουν οποιαδήποτε διάταξη (γεωμετρική ή ρυθμιστική-ελέγχου) που εμποδίζει την κυκλοφοριακή ροή.
- ii. Οδοί με *διακοπτόμενη κυκλοφοριακή ροή* (interrupted-flow). Αφορά οδούς με γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά που δημιουργούν πυκνές ή μη «διακοπές» στη ροή των οχημάτων που κινούνται σε αυτές. Κάθε ισόπεδη διασταύρωση, με ή χωρίς σηματοδότη ή σήμανση, είναι σημείο όπου διακόπτονται οι ροές των οδών πρόσβασης σε αυτή. Παραδείγματα είναι όλες οι αστικές οδοί.

Η διάκριση των οδικών τμημάτων σε διακοπτόμενης και μη ροής αφορά την κατηγορία και τα χαρακτηριστικά της οδού και όχι την ποιότητα της κυκλοφορίας. Για παράδειγμα, ένας αστικός αυτοκινητόδρομος, όπως η Λεωφόρος Κηφισού στην Αθήνα, παρουσιάζει συχνά φαινόμενα συμφόρησης, άρα και «διακοπή» της ροής. Μελετάται όμως με τη θεωρία της μη διακοπτόμενης ροής, αφού πρόκειται για αυτοκινητόδρομο χωρίς κόμβους στους οποίους διακόπτεται η ροή από διασταυρώσεις ή σηματοδότες. Η ανάσχεση ή «διακοπή» της κυκλοφορίας σε αυτή την περίπτωση αφορά αποκλειστικά την ανισορροπία ζή-

τησης και προσφοράς, δηλαδή ότι η ζήτηση σε αριθμό οχημάτων είναι μεγαλύτερη από αυτήν που μπορεί να εξυπηρετήσει ο αυτοκινητόδρομος, και έτσι δημιουργούνται ουρές και καθυστερήσεις.

Η βασική αυτή διάκριση είναι κάτι που διατρέχει όλη τη θεωρία της κυκλοφοριακής ροής και της ανάλυσης χωρητικότητας των οδών. Οι δύο κατηγορίες έχουν μεν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά, κυρίως σε ό,τι αφορά τη θεώρηση των βασικών μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής, αλλά συνιστούν ειδοποιό διαφορά στη μελέτη μας, καθώς η καθεμία αναλύεται με διαφορετική μεθοδολογία, κάτι που θα γίνει περισσότερο σαφές στη συνέχεια του συγγράμματος.

## 1.2 Ζήτηση, χωρητικότητα και κυκλοφοριακός φόρτος

Η *ζήτηση D* (Demand) είναι το μέγεθος που μετρά οχήματα ή πρόσωπα που «επιθυμούν» να μετακινηθούν στη μονάδα του χρόνου. Η ζήτηση επηρεάζεται από ευρύτερους κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες, αλλά και από παραμέτρους όπως η ώρα της ημέρας, ο σκοπός μετακίνησης, οι συνθήκες στη λειτουργία της οδού.

Σε μακροσκοπικό επίπεδο θα μπορούσαμε, για παράδειγμα, να πούμε ότι η ζήτηση στο λεκανοπέδιο της Αττικής είναι 1,5 εκατομμύριο μετακινήσεις ανά εργάσιμη ημέρα με όλα τα μέσα (ΙΧ, μετρό, λεωφορεία, πεζή<sup>1</sup>). Σε μικρότερη κλίμακα, αν ορίσουμε ένα συγκεκριμένο οδικό τμήμα μελέτης, η ζήτηση καθορίζεται από τον αριθμό των οχημάτων που επιθυμεί να διέλθει από αυτό το τμήμα. Για παράδειγμα, η ζήτηση στην Περιφερειακή Οδό Θεσσαλονίκης, στη σήραγγα Πυλαίας την πρωινή ώρα αιχμής 8:00-9:00 π.μ., στην κατεύθυνση προς Καλαμαριά, αφορά όσα από τα οχήματα μετακινούνται στην πόλη και έχουν σκοπό να διέλθουν από τη σήραγγα σε αυτό το διάστημα (η σήραγγα είναι μέρος της διαδρομής τους).

Η *κυκλοφοριακή ζήτηση* (traffic demand) είναι ο αριθμός των οχημάτων που φτάνουν σε μια διατομή της οδού στη μονάδα του χρόνου.

Ο *φόρτος V* (Volume)<sup>2</sup> είναι το μέγεθος που εκφράζει τι εξυπηρετείται από τη ζήτηση και μετρείται σε αριθμό οχημάτων ή προσώπων στη μονάδα του χρόνου, συνήθως την ώρα. Για παράδειγμα, στην προηγούμενη περίπτωση στην Περιφερειακή Οδό Θεσσαλονίκης, αν μετρούσαμε τι διέρχεται από τη σήραγγα Πυλαίας τη συγκεκριμένη ώρα, θα είχαμε σε αριθμό οχημάτων τον κυκλοφοριακό φόρτο του οδικού αυτού τμήματος.

Ο *κυκλοφοριακός φόρτος* (traffic volume) είναι ο αριθμός των οχημάτων που διέρχονται από μια διατομή της οδού στη μονάδα του χρόνου. Άλλως, είναι ο αριθμός των οχημάτων που αναχωρούν από τη διατομή στη μονάδα του χρόνου.

Ο κυκλοφοριακός φόρτος μπορεί να είναι όσος και η ζήτηση, δηλαδή να μετρήσουμε στη διατομή το σύνολο των οχημάτων που ζητούν να διέλθουν, αλλά μπορεί και να είναι μικρότερος. Αυτό εξαρτάται από τη χωρητικότητα της διατομής.

Ως *χωρητικότητα C* (Capacity) ή *κυκλοφοριακή ικανότητα* ορίζεται ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορούν να διέλθουν από διατομή ή τμήμα της οδού, στη μονάδα του χρόνου.

Πρόκειται για ένα μέγεθος που καθορίζει την προσφορά, προκαθορισμένο και γνωστό τις περισσότερες φορές εξ αρχής. Οι αμερικανικές προδιαγραφές το ορίζουν ως τη μέγιστη διατηρήσιμη ωριαία τιμή με την οποία πρόσωπα ή οχήματα ευλόγως αναμένεται να μπορούν να διασχίσουν ένα σημείο ή ένα ομοιόμορφο τμήμα μιας λωρίδας ή οδού, κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης ώρας υπό τις «επικρατούσες συνθήκες» – οδικές, περιβαλλοντικές, κυκλοφοριακές και συνθήκες ελέγχου.

Η τιμή της χωρητικότητας, υπό προϋποθέσεις (γι' αυτό και το «ευλόγως» στον προηγούμενο ορισμό), μπορεί να ξεπεραστεί ή να υπολείπεται από τις όποιες θεωρητικές τιμές λαμβάνουμε με βάση τα εμπειρικά (κυρίως) αλλά και υπολογιστικά μοντέλα που ακολουθούμε. Κάποιες τυχαίες διακυμάνσεις της ζήτησης, η συμπεριφορά των χρηστών οδού, εξωτερικοί αστάθμητοι παράγοντες, αλλά και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά από χώρα σε χώρα και από περιοχή σε περιοχή μπορούν να επηρεάσουν τον τελικό αριθμό οχημάτων/προσώπων που μπορούν να εξυπηρετηθούν.

1. πεζή: με τα πόδια (επίρρηση), δοτική πτώση. Κάποιος βαδίζει πεζός. Στο εξής, θα χρησιμοποιείται ο όρος «πεζή» της νεοελληνικής, που διατηρεί τον τύπο, όχι όμως την ορθογραφία.
2. Για τους συμβολισμούς και τη χρήση τους, βλ. Κεφάλαιο 8.

Εντέλει, βέβαια, οι τιμές που λαμβάνουμε υπόψη στις αναλύσεις μας εκφράζουν τις περισσότερες φορές μια μέση μέγιστη τιμή «αναχωρήσεων» και η οποία, θεωρητικά, μπορεί να διατηρηθεί επ' αόριστον, εφόσον διατηρείται σταθερή μια ισοδύναμη ζήτηση. Για παράδειγμα, θεωρούμε ότι η ακρότατη τιμή του αριθμού επιβατικών αυτοκινήτων (ΙΧ) που διέρχονται από λωρίδα αυτοκινητόδρομου (λωρίδα με συγκεκριμένα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά) είναι 2.400 ΙΧ/ώρα. Αυτή η τιμή είναι η μέση μέγιστη παρατηρούμενη στις ίδιες συνθήκες και αποτελεί το σημείο αναφοράς της ανάλυσής μας, αλλά οριακά εμφανίζεται είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω σε πολλές πραγματικές μετρήσεις.

### Επικρατούσες συνθήκες

Ο όρος *επικρατούσες συνθήκες* (prevailing conditions), με συχνή αναφορά στην Κυκλοφοριακή Μηχανική, αφορά ομοιόμορφες σε χώρο ή/και χρόνο συνθήκες ως προς τα εξής:

- Οι *οδικές-γεωμετρικές συνθήκες* αναφέρονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, όπως η κατηγορία στην οποία ανήκει (π.χ. αστική, υπεραστική, αυτοκινητόδρομος, με ή χωρίς νησίδια διαχωρισμού των κατευθύνσεων), ο αριθμός λωρίδων, τα πλάτη, οι ταχύτητες σχεδιασμού κ.λπ.
- Οι *περιβαλλοντικές συνθήκες* αναφέρονται στις καιρικές και στις συνθήκες φωτισμού. Δυσμενείς καιρικές συνθήκες (ισχυρή βροχόπτωση, άνεμοι, ομίχλη, χιόνι), πέραν της επιρροής στην οδική ασφάλεια, επιδρούν σε κυκλοφοριακά μεγέθη, όπως η ταχύτητα. Ο φωτισμός, φυσικός (ημέρας-νύχτας) και τεχνητός (π.χ. σήραγγες), επίσης καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά οδήγησης και τα χαρακτηριστικά της μετακίνησης εν γένει.
- Οι *συνθήκες κυκλοφορίας* αναφέρονται στα χαρακτηριστικά των κυκλοφορούντων οχημάτων που χρησιμοποιούν την οδό, συμπεριλαμβανομένων των κατηγοριών αυτών (επιβατηγά, δίκυκλα, λεωφορεία, φορτηγά κ.λπ.), τις επιλεχθείσες ταχύτητες, τις οδηγικές συμπεριφορές, την κατανομή της κυκλοφορίας σε λωρίδες ή κατευθύνσεις της οδού κ.λπ.
- Οι *συνθήκες ελέγχου* αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο ρυθμίζεται η κυκλοφορία, δηλαδή τους κανόνες, τις σημάσεις, τους σηματοδότες ή άλλους περιορισμούς και ρυθμίσεις.

Οι πιθανές σχέσεις μεταξύ των προαναφερόμενων μεγεθών, ζήτησης, φόρτου και χωρητικότητας, είναι οι εξής:

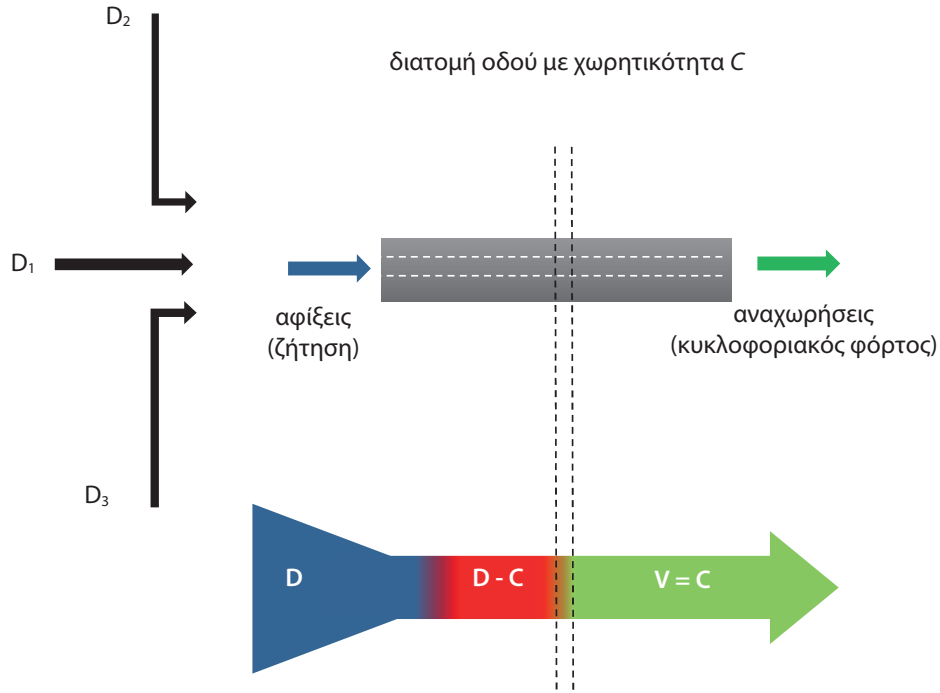
- αν  $D > C$ , τότε  $V = C$  και σχηματισμός ουράς λόγω περίσσειας ζήτησης
- αν  $D = C$ , τότε  $V = C$  και οριακή συνθήκη ισορροπίας προσφοράς-ζήτησης
- αν  $D < C$ , τότε  $V = D$  και ροή ομαλή λόγω περίσσειας χωρητικότητας

Δηλαδή, όταν η ζήτηση  $D$  είναι μεγαλύτερη της χωρητικότητας  $C$ , τότε ο κυκλοφοριακός φόρτος  $V$  (ο αριθμός των οχημάτων που μετρώνται να περνούν τελικά από τη διατομή) θα ισούται με τη χωρητικότητα ως ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορεί η διατομή να δεχτεί και να εξυπηρετήσει. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει έλλειμμα χωρητικότητας ή περίσσεια ζήτησης και τα οχήματα που δεν διέρχονται από τη διατομή πλεονάζουν και δημιουργούν *ουρά* (queue) (Διάγραμμα 1-1).

Ουρά δεν δημιουργείται όταν οριακά η ζήτηση είναι ίση με τη χωρητικότητα και, φυσικά, στην περίπτωση που η ζήτηση υπολείπεται της χωρητικότητας: όσα οχήματα φτάνουν στη διατομή εξυπηρετούνται και, κατά συνέπεια, ο φόρτος είναι τελικά ίσος με τη ζήτηση (περίσσεια ή επάρκεια χωρητικότητας).

Αν θέλαμε να παρουσιάσουμε με έναν δείκτη τις παραπάνω σχέσεις, θα διαπιστώναμε ότι το κλάσμα φόρτου προς χωρητικότητα μπορεί να εκφράσει τις συνθήκες που περιγράφηκαν. Ο *βαθμός κορεσμού* (degree of saturation), ο οποίος ορίζεται ως το κλάσμα του φόρτου προς τη χωρητικότητα ( $V/C$ ) και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, είναι ένα από τα κριτήρια που χαρακτηρίζουν την ποιότητα της κυκλοφοριακής ροής και γενικότερα τις συνθήκες κυκλοφορίας, τόσο στη διακοπτόμενη όσο και στη μη διακοπτόμενη ροή. Χαμηλή τιμή δείχνει ότι η χωρητικότητα επαρκεί για τη ζήτηση, ενώ τιμή πλησίον του 1 αποτυπώνει συνθήκες στα όρια κορεσμού της οδού ( $V = C$ ).

Θεωρητικά, η τιμή αυτού του λόγου δεν μπορεί να ξεπεράσει τη μονάδα, δηλαδή δεν μπορεί να μετρηθεί κυκλοφοριακός φόρτος άνω της χωρητικότητας. Αν όμως ο αριθμητής εκφραστεί ως ζήτηση και όχι ως ο μετρημένος κυκλοφοριακός φόρτος (το αμερικανικό εγχειρίδιο εισάγει τη μεταβλητή  $V_d$  ως «φόρτος» της ζήτησης), τότε το κλάσμα λαμβάνει τιμές άνω της μονάδας και είναι ένδειξη ελλείμματος χωρητικότητας ή υπερβάλλουσας ζήτησης. Ο δείκτης αυτός είναι σημαντικός και χρησιμοποιείται ως ένα από τα κριτήρια αξιολόγησης των κυκλοφοριακών συνθηκών και της εξυπηρέτησης, όπως θα φανεί αναλυτικά στη συνέχεια του συγγράμματος.



**Διάγραμμα 1-1:** Σχέση ζήτησης, φόρτου, χωρητικότητας σε συνθήκες όπου  $D > C$

$D_1, D_2, D_3$ : Ο όγκος της κυκλοφορίας που ζητά να διέλθει από τη διατομή, από όλες τις κατευθύνσεις που οδηγούν σε αυτή. Ζήτηση:  $D = D_1 + D_2 + D_3$ ,  $C$ : η χωρητικότητα της διατομής,  $V$ : ο κυκλοφοριακός φόρτος,  $D-C$ : οχήματα σε ουρά αν  $D > C$ .

### 1.3 Ο ρυθμός ροής και η σημασία του

Ο αριθμός των οχημάτων που διέρχονται από τμήμα οδού στη μονάδα του χρόνου ορίστηκε ως κυκλοφοριακός φόρτος. Την ίδια σημασία έχει και ο όρος *ροή* (flow). Και οι δύο όροι σημαίνουν το ίδιο, δηλαδή την ποσότητα της κυκλοφορίας σε αριθμό οχημάτων σε κάποιο χρονικό διάστημα. Παρ' όλα αυτά, σε πολλές μεθόδους, ειδικά στο HCM,<sup>3</sup> υπάρχει διάκριση στα δύο μεγέθη, και ειδικότερα διάκριση μεταξύ του μεγέθους του φόρτου και αυτού του ρυθμού ροής.

Ως *ρυθμός ροής*  $v$  (flow rate) ορίζεται ο αριθμός των οχημάτων που διέρχονται από διατομή της οδού σε μικρότερη της ώρας χρονική διάρκεια, ανηγμένος στην ώρα. Στην πράξη, ως ρυθμός ροής συνήθως λαμβάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος ενός 15λεπτου, που ανάγεται στη συνέχεια σε ωριαία μέτρηση πολλαπλασιαζόμενος με 4 (ή διαιρείται με 0,25). Η ωριαία αυτή τιμή ονομάζεται και *ισοδύναμος ωριαίος ρυθμός ροής*.

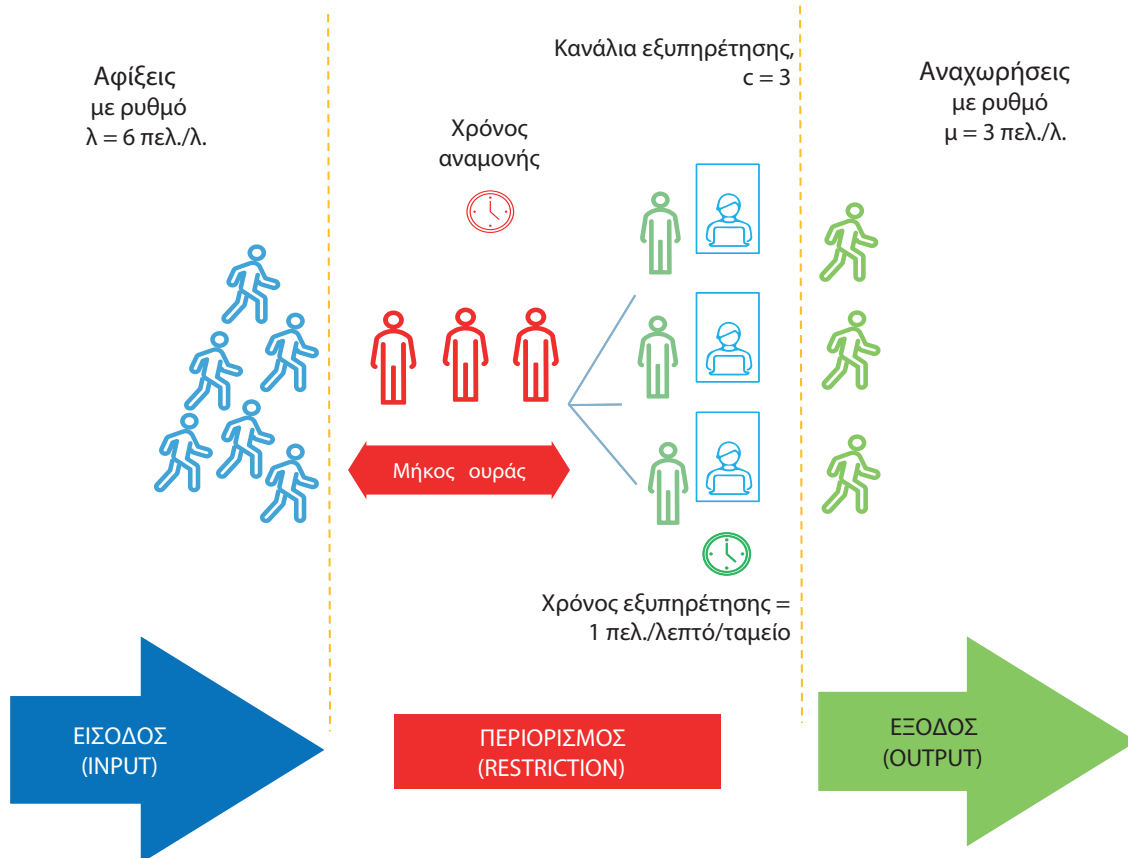
Για παράδειγμα, μέτρηση 100 οχημάτων το 15λεπτο αντιστοιχεί σε ισοδύναμο ωριαίο ρυθμό ροής ή απλά ρυθμό ροής  $v = 100 \times 4 = 400$  οχήματα/ώρα. Συνηθέστατα, μάλιστα, όπως θα διαπιστωθεί στη συνέχεια του συγγράμματος, λαμβάνουμε ως 15λεπτο ανάλυσης, και κατ' επέκταση ωριαία τιμή ανάλυσης, τον ρυθμό ροής που προκύπτει από την αναγωγή σε ώρα του μέγιστου 15λεπτου της ώρας, και μάλιστα της ώρας αιχμής (η αιχμή της αιχμής!).

3. *Highway Capacity Manual*. Στο εξής, οι αναφορές σε αυτό θα γίνονται είτε ως «HCM» είτε ως «αμερικανικό εγχειρίδιο». Η συνεχής αναφορά σε αυτό εξηγείται στον πρόλογο.



Σε πολλές περιπτώσεις, στην Κυκλοφοριακή Μηχανική χρησιμοποιούμε τη θεωρία των ουρών αναμονής.<sup>4</sup> Ας διατυπώσουμε ένα παράδειγμα όπου αυτή η θεωρία είναι κατάλληλη για να ερμηνεύσει τη σκοπιμότητα χρήσης του ρυθμού ροής αντί (ή συνδυαστικά) του κυκλοφοριακού φόρτου.

Το παράδειγμα σχηματικά αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 1-2. Σε μια τράπεζα με 3 ταμεία (κανάλια εξυπηρέτησης – channels,  $c$ ), ο ρυθμός αφίξεων  $\lambda$  είναι 3 πελάτες ανά λεπτό. Αν ο ρυθμός αναχωρήσεων  $\mu$ , δηλαδή εξυπηρέτησης και τελικά αναχώρησης των πελατών, είναι 3 πελάτες το λεπτό (ή 1 πελάτης ανά ταμείο ανά λεπτό), τότε κανείς πελάτης δεν αναμένει σε ουρά, αφού, όσοι εισέρχονται εξυπηρετούνται και εξέρχονται ( $\lambda = \mu$ ) τη στιγμή που θα αφιχθούν οι επόμενοι.



**Διάγραμμα 1-2** Τυπικό σύστημα ουράς τη χρονική στιγμή υπερβάλλουσας ζήτησης

Αν σε κάποιο λεπτό φτάσουν 6 πελάτες, τότε οι 3 θα παραμείνουν σε ουρά έως ότου εξυπηρετηθούν οι (πρώτοι) 3 από τους 6 που αφίχθηκαν μαζί το ίδιο λεπτό. Αν στο επόμενο λεπτό ο ρυθμός ξαναπέσει στους 3 πελάτες ανά λεπτό, 3 πελάτες θα βρίσκονται συνεχώς σε ουρά αναμονής. Αν για ένα λεπτό της ώρας ο ρυθμός αφίξεων μηδενιστεί, τότε η ουρά θα απορροφηθεί.

Στο τέλος μίας ώρας, αν μετρήσουμε τον αριθμό των αφίξεων και αυτόν των αναχωρήσεων, θα διαπιστώσουμε ότι δεν περισσεύει κανένας πελάτης, δηλαδή ότι όσοι αφίχθηκαν εξυπηρετήθηκαν και αναχώ-

4. Η θεωρία ουρών αναμονής (Queueing Theory) είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο που βρίσκεται στην τομή των Εφαρμοσμένων Μαθηματικών, των Επιστημών Μηχανικού, της Πληροφορικής, καθώς και της Διοικητικής Επιστήμης. Αντικείμενο είναι η μελέτη συστημάτων εξυπηρέτησης (service systems), γνωστών και ως συστημάτων ουρών αναμονής (queueing systems). Τα συστήματα αυτά είναι μαθηματικά πρότυπα που παριστάνουν μια συνθήκη εισόδου-εξόδου «πελατών» που δέχονται κάποιας μορφής «εξυπηρέτηση» από «υπηρετές» [8]. Οι εφαρμογές της θεωρίας είναι ποικίλες, π.χ. σε συστήματα μεταφορών, στην κυκλοφορία, σε συστήματα και διαδικασίες εξυπηρέτησης πελατών, σε δίκτυα μετάδοσης πληροφορίας στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές ή στο διαδίκτυο, στην αποθήκευση και διάθεση των προϊόντων. Με τη χρήση της θεωρίας υπολογίζουμε στοιχεία των ουρών, όπως ο χρόνος αναμονής, το πλήθος στοιχείων σε ουρά (ανθρώπων, οχημάτων, προϊόντων), ελάχιστοι, μέσοι και μέγιστοι χρόνοι εξυπηρέτησης και καθυστέρησης, κόστος κ.λπ.

ρησαν. Στη διάρκεια όμως της ώρας, η λειτουργία της τράπεζας και οι πελάτες επηρεάστηκαν, αφού για κάποιο διάστημα και έως ότου ο ρυθμός αφίξεων πέσει, ώστε να ισορροπήσει το σύστημα, υπήρχε ουρά και αναμονή, δηλαδή *καθυστέρηση* (delay), 3 διαφορετικών ανά λεπτό πελατών.

Αν κάποιος, λοιπόν, αξιολογούσε με χρονική αναφορά την ώρα, θα έβρισκε χωρίς πρόβλημα τη λειτουργία της τράπεζας. Αν όμως κάποιος ζητούσε την άποψη των πελατών ή μελετούσε ένα μικρότερο της ώρας διάστημα, θα διαπίστωνε καθυστέρηση στην εξυπηρέτηση.

Το ίδιο θα συνέβαινε αν, αντί αύξησης του ρυθμού αφίξεων, είχαμε μείωση του ρυθμού εξυπηρέτησης στα ταμεία. Για παράδειγμα, κάποιος πελάτης να έχει χρόνο εξυπηρέτησης δύο αντί ενός λεπτού ή αν ένα ταμείο κλείσει για κάποιο χρονικό διάστημα.<sup>5</sup>

Οι γενικές συνθήκες του παραδείγματος είναι:

- i.  $\lambda < \mu$ , ομαλή λειτουργία
- ii.  $\lambda = \mu$ , οριακή συνθήκη-κορεσμός
- iii.  $\lambda > \mu$ , δημιουργία ουράς

Ένα ανάλογο παράδειγμα με στοιχεία κυκλοφορίας που δείχνει την ανάγκη αξιολόγησης του ρυθμού ροής αντί του ωριαίου φόρτου κατά την ανάλυση, σε πολλές περιπτώσεις σχεδιασμού, είναι το εξής:

Έστω διατομή οδού δύο λωρίδων όπου η χωρητικότητά της είναι 4.500 οχήματα/ώρα και οι μετρήσεις οχημάτων ανά 15λεπτο είναι:

- 1.000 οχήματα το 1ο 15λεπτο
- 1.200 οχήματα το 2ο 15λεπτο
- 1.100 οχήματα το 3ο 15λεπτο
- 1.000 οχήματα το 4ο 15λεπτο

Σε αυτή την περίπτωση, ο ωριαίος κυκλοφοριακός φόρτος είναι το άθροισμα των οχημάτων κάθε 15λεπτου ίσος με 4.300 οχήματα/ώρα, τιμή μικρότερη της χωρητικότητας ( $< 4.500$  οχήματα/ώρα). Όμως ο ρυθμός ροής του 2ου 15λεπτου αντιστοιχεί σε ισοδύναμο ωριαίο φόρτο  $1.200 \times 4 = 4.800$  οχήματα/ώρα, τιμή άνω της χωρητικότητας. Έτσι, και παρότι η ωριαία θεώρηση δείχνει περίσσεια χωρητικότητας, παρατηρούνται ουρές, ενδιαμέσως της ώρας, λόγω αυξημένου ρυθμού ροής (μεγαλύτερου της χωρητικότητας) στο 2ο 15λεπτο.

Είναι ανάγκη, λοιπόν, πολλές φορές να μελετήσουμε και να σχεδιάσουμε με βάση το μέγιστο 15λεπτο και τον ισοδύναμο ωριαίο φόρτο που αυτό παράγει αντί του συνολικού ωριαίου κυκλοφοριακού φόρτου. Στη συνέχεια του συγγράμματος θα δοθούν οι αναλυτικοί τρόποι υπολογισμού και οι εφαρμογές του ρυθμού ροής.

## 1.4 Η Στάθμη Εξυπηρέτησης

Η αμερικανική θεωρία έχει εισαγάγει εδώ και δεκαετίες έναν δείκτη κοινό για τα δύο είδη ροής, ο οποίος χαρακτηρίζει ποιοτικά την κυκλοφορία. Η *Στάθμη Εξυπηρέτησης* (ΣΕ) ή *Επίπεδο Εξυπηρέτησης* (ΕΕ), από τον αγγλικό όρο *Level of Service* (LOS), εκφράζει την ποιότητα της ροής, δηλαδή αυτό που θα μπορούσε να οριστεί ως «συνθήκες κυκλοφορίας» (καλές, μέτριες, κακές), και μάλιστα από την πλευρά του χρήστη της οδού.

Ορίζονται έξι (6) Στάθμες-Επίπεδα Εξυπηρέτησης, οι οποίες συμβολίζονται με τα γράμματα Α έως F.<sup>6</sup> Στη ΣΕ-Α αντιστοιχίζονται οι βέλτιστες συνθήκες και στην ΣΕ-F οι δυσμενέστερες. Για κάθε Στάθμη Εξυπηρέτησης ορίζονται κατώφλια τιμών κυκλοφοριακών μεγεθών, όπως η πυκνότητα και ο ρυθμός ροής, που εντός των ορίων τους ορίζεται η κάθε Στάθμη.

5. Η περίπτωση του «κλειστού ταμείου» στο οδικό δίκτυο αφορά τον αποκλεισμό λωρίδας της οδού λόγω ενός συμβάντος ή ατυχήματος. Σε αυτή την περίπτωση, θα είχαμε μείωση της χωρητικότητας, δηλαδή της προσφοράς.  
6. Στο σύγγραμμα χρησιμοποιούνται οι λατινικοί χαρακτήρες αντί των ελληνικών Α, Β, Γ...

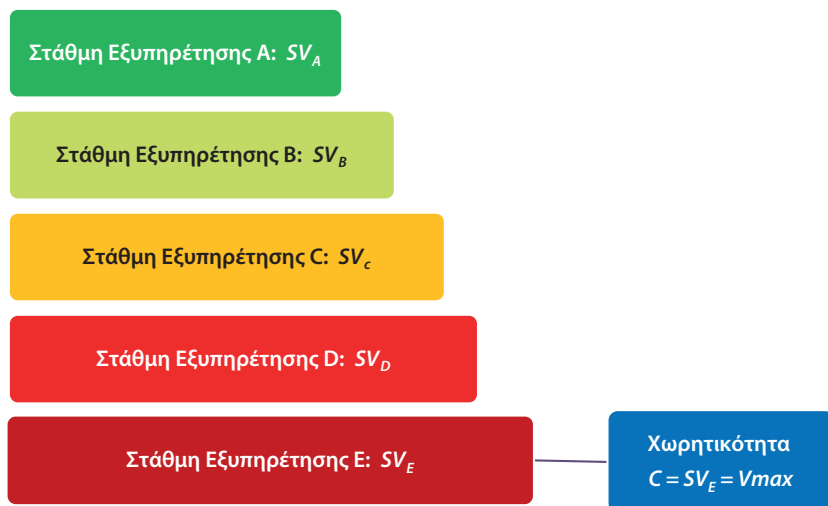
Για παράδειγμα, αν σε τμήμα αυτοκινητόδρομου που κυκλοφορείται μόνο από ΙΧ οχήματα η πυκνότητα έχει τιμή κάτω από 7 οχ./χλμ./λωρίδα, τότε η ΣΕ είναι η Α, αν έχει τιμή 7-11 οχ./χλμ./λωρίδα, η ΣΕ είναι η Β και, φτάνοντας στη ΣΕ-Ε, η πυκνότητα έχει όρια 22-28 οχ./χλμ./λωρίδα.

Από τις τιμές και μόνο καταλαβαίνει κάποιος ότι το να κυκλοφορούν 7 οχήματα ανά χιλιόμετρο οδού, δηλαδή περίπου 1 όχημα ανά 150 μέτρα (ΣΕ-Α), είναι ευνοϊκότερο απ' ό,τι να κυκλοφορούν 28 οχήματα ανά χιλιόμετρο οδού ή, άλλως, 1 όχημα ανά περίπου 35 μέτρα. Η κλιμάκωση προς τα πάνω του αριθμού των οχημάτων ανά χιλιόμετρο λωρίδας (αύξηση πυκνότητας) δυσχεραίνει την εξυπηρέτηση των χρηστών οδού, καθώς περισσότερα οχήματα βρίσκονται στην οδό, και έτσι δεν είναι εφικτή, για παράδειγμα, η επιλογή ταχύτητας, η επιλογή λωρίδας κ.ο.κ.<sup>7</sup>

Είναι σημαντικό να τονιστεί σε αυτό το σημείο κάτι που αναλυτικά θα παρουσιαστεί αρκετές φορές στη συνέχεια του συγγράμματος, ότι η ΣΕ-Ε δεν εκφράζει μια σταθερή κατάσταση αλλά χαρακτηρίζει τις συμφορήσεις και τις απότομες μεταβολές μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής. Στη ΣΕ-Ε, τα οχήματα βρίσκονται κάποιες στιγμές ακινητοποιημένα, κάποιες κινούνται για λίγα μέτρα με πολύ χαμηλή ταχύτητα και, γενικά, υπάρχουν καθυστερήσεις και πτώση του επιπέδου εξυπηρέτησης.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι η ΣΕ-Ε είναι η τελευταία που πρακτικά αναλύεται με τις μεθοδολογίες του αμερικανικού εγχειριδίου για τον προσδιορισμό της ΣΕ των οδικών στοιχείων. Όταν η ΣΕ είναι η Ε, ισχύουν άλλα πρότυπα, κυρίως στοχαστικά.

Σε κάθε ΣΕ η ανώτερη τιμή φόρτου ορίζεται ως φόρτος εξυπηρέτησης. Ο φόρτος εξυπηρέτησης (Service Volume – SV) είναι ο μέγιστος αριθμός οχημάτων, επιβατών, πεζών κ.λπ. που μπορούν να «εξυπηρετηθούν» σε ένα σημείο ή τμήμα οδού που χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα σχεδιαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά, σε μια δεδομένη, όμως, Στάθμη Εξυπηρέτησης. Το μέγεθος συνδέεται στενά με την έννοια της χωρητικότητας και συχνά συγχέεται με αυτή, και έτσι είναι σκόπιμο να τονιστεί ότι οι τιμές του φόρτου εξυπηρέτησης είναι διαφορετικές για κάθε Στάθμη (Διάγραμμα 1-3).<sup>8</sup>



#### Διάγραμμα 1-3 Αντιστοίχιση χωρητικότητας, φόρτου εξυπηρέτησης και Στάθμης Εξυπηρέτησης

Είναι η χωρητικότητα και SV ο φόρτος εξυπηρέτησης σε κάθε Στάθμη Εξυπηρέτησης. Χρωματική κλιμάκωση από καλές (πράσινο) σε κακές συνθήκες κυκλοφορίας (έντονο κόκκινο). Στη ΣΕ-Ε, οι συνθήκες είναι ασταθείς και δεν αντιστοιχίζονται τιμές.

Για παράδειγμα, ενώ η μέγιστη τιμή υπό συγκεκριμένες συνθήκες του αριθμού των οχημάτων που μπορούν να διέλθουν από λωρίδα αυτοκινητόδρομου σε μια διατομή είναι 2.400 οχήματα/ώρα, ο φόρτος εξυπηρέτησης για τη ΣΕ-Α είναι 840 οχήματα/ώρα, για τη ΣΕ-Β τα 1.320 οχήματα/ώρα κ.ο.κ. Η τιμή 2.400 οχήματα/ώρα αντιστοιχεί στην ΣΕ-Ε που είναι η οριακή Στάθμη στον κορεσμό (βλέπε οριακές συνθήκες  $D = C = V$  προηγουμένως) και πριν από την έναρξη συμφόρησης.

7. Πρωτίστως, για την κατανόηση των γραφομένων εδώ, μπορεί κάποιος να συμβουλευτεί και το Διάγραμμα 9-2.

8. Αντίστοιχα, ο ρυθμός ροής εξυπηρέτησης (service flow rate) είναι η μέγιστη τιμή ρυθμού ροής που μπορεί να εξυπηρετήσει μια οδός σε κάθε Στάθμη Εξυπηρέτησης.