

Οι Οδοί και τα Οδοστρώματα: η Εξέλιξη και οι Ιδιαιτερότητές τους ως Έργα Μηχανικού

Περίληψη Στο παρόν παρουσιάζεται η εξέλιξη των οδών και των οδοστρωμάτων από τις απαρχές της ιστορίας έως σήμερα. Από την Μεσοποταμία, όπου συναντώνται οι πρώτες αμαξιτές οδοί, την Κλασική και Ρωμαϊκή εποχή, τον Μεσαίωνα και τους νεότερους χρόνους. Παρουσιάζονται, επίσης, οι εκτιμήσεις για τις επικείμενες εξελίξεις στον τομέα στο άμεσο μέλλον. Έμφαση δίνεται στην αιτιοκρατική και κοινωνικοπολιτική παράθεση των εν λόγω εξελίξεων, πάντα και από τη σκοπιά του πολιτικού μηχανικού. Οι οδοί και τα οδοστρώματα παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες και ιδιομορφίες ως έργα, σε σύγκριση με τα λοιπά έργα πολιτικού μηχανικού, οι οποίες, επίσης, παρουσιάζονται.

1. Εισαγωγή

Βασικός στόχος του παρόντος είναι να παρουσιασθεί η εξέλιξη οδών και οδοστρωμάτων μέσα στους αιώνες, με έμφαση στη σκιαγράφηση των διαφόρων φάσεων της εξέλιξης αυτής, σε σχέση με τις απαιτήσεις που καλούνταν να υπηρετήσουν στο εκάστοτε πλαίσιο εξέλιξης της κοινωνίας, του πολιτισμού και της τεχνολογίας. Στο τέλος, θα επισημανθούν οι ιδιομορφίες που παρουσιάζουν σε σύγκριση με τα άλλα τυπικά έργα πολιτικού μηχανικού και οι οποίες αποδίδουν στις οδούς και στα οδοστρώματα κάποια μοναδικότητα.

Έτερος στόχος του παρόντος είναι να απαντήσει στο 'προαίτιο' για τους συγχρονισμούς ερωτήματα, του αν οι δρόμοι φέρνουν την ανάπτυξη ή αν η ανάπτυξη είναι εκείνη που κατασκευάζει δρόμους, ερώτημα που μοιάζει αρκετά με το γνωστό γρίφο περί προγενέστερου της κότας ή του αυγού. Στο τέλος αυτής της εργασίας, θα έχει καταστεί σαφές το ποιο προηγείται και το ποιο ακολουθεί.

2. Τα προϊστορικά χρόνια

Την πρώτη παρέμβαση στο έδαφος, ώστε να διευκολυνθεί η μετακίνηση ανθρώπων, αποτελεί το μονοπάτι (Εικόνα 1). Διαμορφώνονταν με ελαχιστότατες επεμβάσεις με μοναδικό κριτήριο τη στοιχειώδη βελτίωση της βατότητας μιας πορείας επί του εδάφους. Στη χάραξη της πορείας μονοπατιών επί ορεινών εδαφών συχνά βοηθούσε το ένστικτο της κίνησης ιπποειδών.

Παρότι πρωτόγονο ως έργο, επισημαίνεται ήδη μια ουσιώδης ιδιαιτερότητα του σε σχέση με τα άλλα στοιχειώδη δομικά έργα της εποχής (ξύλινες γεφυρώσεις, οικίες, πλοία, στοιχειώδεις οχυρώσεις κλπ): σε κάθε έργο η χρήση του προκαλεί φθορά, η οποία συχνά καταλήγει σε ανάγκη συντήρησης και ανακατασκευής του· τα μονοπάτια αποτελούν την εξαίρεση, όπου η χρήση τους, απεναντίας, συντελεί στη διατήρησή τους. Αν μειωθεί η χρήση τους, κινδυνεύουν να

χαθούν από τη βλάστηση. Αποτελούσαν, δηλαδή, το μοναδικό 'έργο' (και ίσως αυτό ισχύει και σήμερα) που αυτοβελτιώνονταν όσο πιο πολύ χρησιμοποιούνταν.



Εικόνα 1. Τυπικό μονοπάτι σε ορεινό έδαφος

3. Τα ιστορικά χρόνια

Τα πρώτα οδοστρώματα εμφανίζονται περί το 4.000 π. Χ. στην περιοχή της Μεσοποταμίας, λίκνο του ανθρώπινου πολιτισμού. Επισημαίνεται ότι εκεί εντοπίζεται και η απαρχή της καλλιέργειας της γης, η ανακάλυψη του τροχού, αλλά και τα πρώτα δείγματα γραφής, όλα εξαιρετικά σημαντικοί σταθμοί προόδου και εξέλιξης της ανθρωπότητας. Οι πρώτοι λιθόστρωτοι δρόμοι κατασκευάστηκαν εκεί, ανταποκρινόμενοι κυρίως στην ανάγκη μεταφοράς των γεωργικών προϊόντων. Συγκεκριμένα, η πρώτη γνωστή μεγάλη οδός είναι αυτή που ένωσε την πρωτεύουσα των Ασσυρίων Σούσα με τις Σάρδεις και η οποία είχε μήκος 2000 km.

Περνώντας στον Ελλαδικό χώρο συναντά κανείς λιθόστρωτους δρόμους της Μινωικής Εποχής στην Κρήτη. Η αρχαιότερη οδός (που σώζεται μέχρι σήμερα), κατασκευάστηκε στην Κρήτη περί το 1700 π.Χ., είχε μήκος περί τα 50 km και ένωσε την Κνωσό με την πόλη Γόρτυνα. Η δομή τους δεν αποτελούνταν μόνο από επιφανειακή διάστρωση λίθων (Εικόνα 2). Κάτω από τους πλακοειδείς λίθους υπήρχε έτερη λιθώδης στρώση θεμελίωσης, ώστε να αυξηθεί η ανθεκτικότητά.



Εικόνα 2. Τυπικό λιθόστρωτο οδόστρωμα δρόμου της αρχαιότητας

Ένα βασικό ερώτημα που έχει ενδιαφέρον να απαντηθεί είναι γιατί οι αρχαίοι Έλληνες, που σε τόσα μεγαλούργησαν και μας έχουν κληροδοτήσει πλείστα αρχιτεκτονήματα, δεν έχουν κάτι εντυπωσιακό να επιδείξουν στην κατασκευή οδών.

Η βασική εξήγηση συνίσταται στο ότι είχαν αυτόρκες πόλεις-κράτη και δεν τους ενδιέφερε ιδιαίτερα η επικοινωνία με τις γειτονικές πόλεις-κράτη. Είχαν, βέβαια, αναπτύξει κατά κόρον το εμπόριο, αλλά ήταν θαλασσοκράτορες, όλες τις μεταφορές τους τις έκαναν με πλοία, πολύ ευκολότερα και μαζικότερα (*καταναλώνοντας πολύ μικρότερο έργο*), σε σύγκριση με χερσαίες οδούς και άμαξες. Για αυτόν τον λόγο, άλλωστε, όλες οι σημαντικές πόλεις τους ως και οι αποικίες τους, ήταν παραλιακές. Κάποιες βρίσκονταν σε ~20km από τη θάλασσα σε φυσική οχυρά και δεσπόζουσα θέση, αλλά πάντα υπήρχε και το επίγειο. Υπήρχε, συνεπώς, ουσιαστική διαφορά με τις εκτεταμένες χερσαίες αυτοκρατορίες της Μεσοποταμίας, οι οποίες, απεναντίας, βασιζόνταν στις άμαξες για επικοινωνίες και εμπόριο.

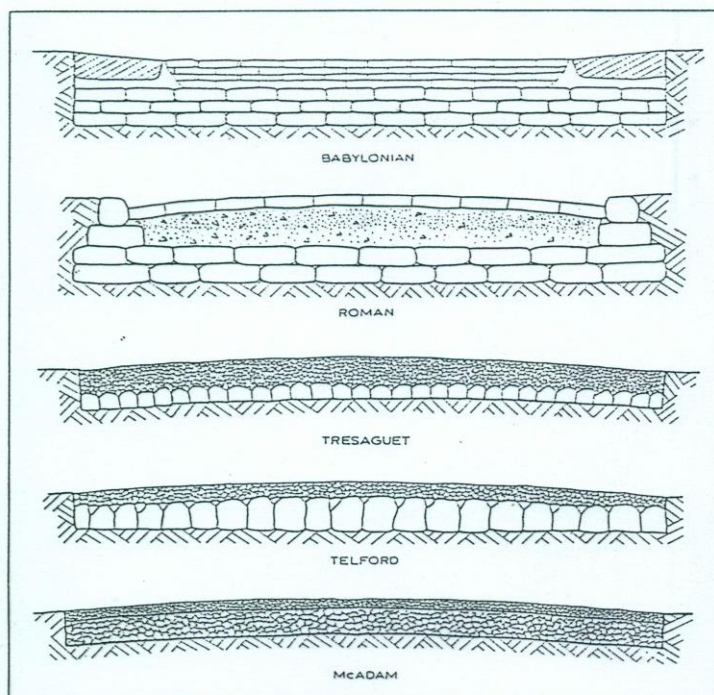
Επισημαίνοντας τα παραπάνω, δεν αποτελεί έκπληξη ότι ο σημαντικότερος δρόμος των αρχαίων Ελλήνων ήταν η Δίολος. Η Δίολος φαίνεται ότι κατασκευάστηκε στην αρχή του 6^ο π.Χ. αιώνα, κατά πάσα πιθανότητα όταν τύραννος στην Κόρινθο ήταν ο περιώνυμος Περίανδρος. Επειδή το εμπόριο της Κορίνθου βρισκόταν τότε σε μεγάλη άνθηση, κρίθηκε ότι αποτελεί ζωτικό συμφέρον της πόλης να κατασκευασθεί ένας ειδικός δρόμος πάνω στον οποίο θα κυλιόνταν πλοία από τον Κορινθιακό κόλπο στον Σαρωνικό και αντίστροφα διαμέσου της ξηράς αποφεύγοντας τον περίπλοο της Πελοποννήσου με τα κυματώδη ακρωτήρια Ταινάρου και Μαλέα. Από τον Σαρωνικό, η γειτονική Αθήνα είχε ήδη αναπτυχθεί και από την άλλη πλευρά, ήκμαζαν οι αποικίες της κάτω Ιταλίας και της Σικελίας.

Ο αρχαιο-Ελληνικός *πολιτισμός* έδινε έμφαση στην ανάπτυξη των *πόλεων* (πρόκειται για ομόριζες λέξεις...). Συνεπώς, η ποιότητα της ζωής που είχε κατά τα Κλασσικά χρόνια επιτευχθεί στις πόλεις-κράτη θα έπρεπε να αντανακλάται και στην οδική υποδομή. Πράγματι, οι αστικές οδοί ήταν λιθόστρωτοι με υψηλής ποιότητας επιφάνειες και συναρμογές και μέριμνα απορροής των επιφανειακών υδάτων, εμφάνιση, δηλαδή, ανάλογη προηγμένης πολιτείας. Οι χαράξεις τους στο κεντρικό τμήμα των πόλεων ακολουθούσαν ρυμοτομικούς κανόνες, ορίζουν οικοδομικά τετράγωνα και οδηγούν σε πλατείες και δημόσια κτίσματα όντας ιεραρχημένες ως προς το πλάτος τους, την ποιότητα των υλικών και τον στολισμό τους.

Προχωρώντας ιστορικά, όλοι όσοι ασχολούμαστε με την οδοποιία, γνωρίζουμε ότι είναι η Ρωμαϊκή εποχή εκείνη που αποτελεί σταθμό στην εξέλιξη του αντικειμένου μας. Πράγματι, οι Ρωμαίοι αντιμετώπισαν τους βασικούς δρόμους της αυτοκρατορίας τους ως εξαιρετικά σημαντικές κατασκευές για τη διατήρηση της αυτοκρατορίας τους. Ήταν η κυριαρχία και η διακυβέρνηση τα ζητήματα προτεραιότητας που έθεσαν σε εμφανώς υψηλότερα στάνταρ την κατασκευή οδών, σε σύγκριση με τους παλαιότερους δρόμους που εξυπηρετούσαν, βασικά, το εμπόριο. Η διοικητική δομή της αυτοκρατορίας σε επαρχίες, πέραν της μετακίνησης στρατευμάτων, απαιτούσε τη σε εβδομαδιαία βάση επικοινωνία και ανταλλαγή μηνυμάτων, επισκέψεις αξιωματούχων και συγκέντρωση φόρων. Οι σχετικές μετακινήσεις είναι αποτελεσματικότερες όσο συντομότερες και ασφαλέστερες είναι. Η υποδομή που εξασφάλιζε κάτι τέτοιο θα έπρεπε να ήταν στιβαρή και κυρίως, (και αυτή είναι η ειδοποιός διαφορά των Ρωμαϊκών οδών), ανάλογα εξοπλισμένη.

Τα οδοστρώματα συνίσταντο τότε, ουσιαστικά, από τοιχοδομή θαμμένη στο έδαφος: είχαν βάθος της τάξης του μέτρου με μεγάλες πέτρες στον πυθμένα, ως θεμελίωση (Σχήμα 3) και πλακοειδή κυρτή επιφάνεια, ενώ ο ενδιάμεσος χώρος πληρούνταν με χύδην λιθοδομή. Σε αντίθεση με τους παλιότερους Βαβυλωνίους, οι Ρωμαίοι είχαν αντιληφθεί τη φθοροποιό δράση του νερού και διαμόρφωσαν την επιφάνεια κίνησης κυρτή (επίκλιση), ώστε ακριβώς να απομακρύνεται το νερό.

Αλλά για να μην αδικούμε τους παλιότερους η εν λόγω παράμετρος ουδόλως αποτελούσε σοβαρό πρόβλημα στην άνυδρη Μεσοποταμία. Η τοποθέτηση μεγάλων επιφανειακών πλακών βασικά βοηθούσε στην κίνηση των κάρων που είχαν ξύλινες ρόδες. Η λάσπη των χωματόδρομων αποτελούσε τον υπ' αριθμό ένα εχθρό των μεταφορών με κάρα, αφού οι ρόδες βούλιαζαν και τα κάρα κολλούσαν.



Σχήμα 3. Η εξέλιξη της δομής των οδοστρωμάτων

Κύριο γνώρισμά των Ρωμαϊκών οδών, όσον αφορά στον γεωμετρικό σχεδιασμό, ήταν οι μεγάλες ευθυγραμμίες, οι οποίες καθιερώθηκαν στην ορολογία της οδοποιίας ως 'Ρωμαϊκές ευθυγραμμίες'. Οι Ρωμαίοι προτιμούσαν τα μεγάλα ευθύγραμμα τμήματα, πέραν της αυτονόητης μείωσης των αποστάσεων και για λόγους ασφάλειας (ορατότητα). Οι αλλαγές κατεύθυνσης ευνοούσαν ενέδρες και γίνονταν μόνο για την καλύτερη προσαρμογή της οδού στο έδαφος. Οι μέγιστες κατά μήκος κλίσεις ήταν ~10%, τιμές που συναντάμε συχνά και σήμερα.

Το οδικό δίκτυο των Ρωμαίων εκτεινόταν από τη Βόρεια Θάλασσα μέχρι τη Σαχάρα και από τον Ατλαντικό μέχρι τη Μεσοποταμία. Αθροιστικά, οι λιθόστρωτοι δρόμοι μετρούσαν 100.000km, νούμερο εξαιρετικά σημαντικό για τα μέσα της εποχής. Λόγω της άρτιας κατασκευής του, το δίκτυο αυτό παρέμεινε σε λειτουργία για πολλούς αιώνες και μετά την κατάρρευση της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας. Κέντρο αναφοράς αυτού του οδικού δικτύου ήταν βέβαια η πρωτεύουσα Ρώμη, με το γνωστό ρητό 'omnes viæ Romam ducunt'. Γνωστότερη όλων ήταν η via Appia, που διέτρεχε την Ιταλική χερσόνησο, αλλά και εκείνη που περισσότερο ενδιαφέρει εμάς η via Egnatia, που ακολουθεί τα μέγιστα η σύγχρονη Εγνατία Οδός.

Ός αναφέρθηκε, πέραν της ποιότητας και της έκτασής του, το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του Ρωμαϊκού οδικού δικτύου ήταν η ιεράρχησή του και κυρίως οι Υπηρεσίες. Οι Ρωμαίοι ήταν οι πρώτοι που πρόσφεραν οργανωμένες υπηρεσίες

στις κύριες οδικές αρτηρίες, όπως χιλιόμετρηση με στήλες-μυλιοδείκτες (απόσταση χιλίων διπλών βημάτων Ρωμαίου λεγεωνάριου), πληροφοριακή σήμανση για τον επόμενο προορισμό, φρουρές σε κομβικά σημεία όπου, ενίοτε, οι έμποροι πλήρωναν τέλη διέλευσης, σταθμούς συνεργείων με υλικά συντήρησης και σταθμούς ανάλογους των σύγχρονων ΣΕΑ (Σταθμοί Εξυπηρέτησης Αυτοκινητιστών) με αναγκαίες υποδομές ξεκούρασης και διανυκτέρευσης των οδοιπόρων (χάνια).

4. Τα χρόνια του Μεσαίωνα

Ο Μεσαίωνας αποτελεί και για την οδοποιία περίοδο στασιμότητας και παρακμής (εκτός ίσως της εποχής του Καρλομάγνου). Οι περικλειστές, αυτάρκειες, ανθρωποφοβικές κοινωνίες και τα φεουδαρχικά καθεστώτα αποτελούσαν δομές που δε δημιουργούσαν ιδιαίτερη ανάγκη για μετακινήσεις (ως οι πλούσιες κοινωνίες που ενθαρρύνουν το εμπόριο, ή οι μεγάλες κρατικές δομές) και ανέλθωναν τον δυναμισμό τους σε μηχανορραφίες, έριδες και συμμαχίες, ενώ η τεχνολογία τους εξαπλούνταν στην ανέγερση πύργων και κάστρων και σε πολιορκητικές μηχανές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η Εκκλησία, εκείνα τα χρόνια, έπαιξε θετικό ρόλο στη διατήρηση οδών, δεδομένου ότι Παπικές αποστολές, Επίσκοποι και Μοναχοί περιδιάβαιναν τις επαρχίες, κηρύσσοντας, επιθεωρώντας και ιεροεξετάζοντας και, όντας παντοδύναμοι, είχαν συμφέρον ύπαρξης οδών επικοινωνίας.

Ένα άλλο ενδιαφέρον ζήτημα είναι το σε ποια πλευρά της οδού γίνονταν η κυκλοφορία: αριστερά ή δεξιά. Το θέμα αυτό λάμβανε υπόσταση μόνο όταν διασταυρώνονταν κάρα και έφιπποι, διότι, δεδομένης της ελάχιστης κυκλοφορίας των ημερών, όλοι προτιμούσαν το κεντρικό τμήμα του οδοστρώματος. Ο κανόνας που όριζε το παραπάνω δεν ήταν άλλος από τον κανόνα της εμπλοκής. Οι καιροί δεν ήταν φιλικοί και ο εμφανιζόμενος στο βάθος της οδού έφιππος δεν ήταν καθόλου βέβαιο τι διαθέσεις είχε. Οι κανόνες εμπλοκής της εποχής υπαγόρευαν κατά τη συνάντηση έκαστος να κινείται στο αριστερό άκρο του δρόμου, ώστε να μπορεί να πολεμήσει με το δεξί του χέρι στο οποίο κρατούσε το σπαθί. Κυκλοφορούσαν, δηλαδή, όπως οι Άγγλοι σήμερα, ώστε, αν χρειαστεί, να μάχονται οι συναντώμενοι. Έπρεπε να έρθει ο Μ. Ναπολέων για να αλλάξει τον κανόνα. Και ως αντίδραση στους εχθρούς-Άγγλους και, κυρίως, συμβολικά, εκδίδοντας σχετικό διάταγμα και τονίζοντας ότι πλέον στην αυτοκρατορία του επικρατεί ειρήνη, άρα οι διασταυρώσεις εφίππων θα γίνονται όχι ωσάν να είναι πιθανή η εμπλοκή τους.

Μετάπειτα, στην Αναγέννηση, εποχή ακμής των πόλεων και άνθισης του εμπορίου, θεωρούνταν μέγιστο πλεονέκτημα πολλοί δρόμοι να οδηγούν σε κάποια πόλη και να βρίσκονται, μάλιστα, και σε καλή κατάσταση. Ρόλο για την κατασκευή δρόμων είχαν τότε οι πλούσιοι έμποροι, οι οποίοι θεωρούνταν ευεργέτες της πόλης και έχαιραν μέγιστης εκτίμησης για αυτό τους το έργο.

5. Η απαρχή των σύγχρονων οδών και οδοστρωμάτων

Αν κάποιος καλούνταν να ορίσει μια και μοναδική χρονολογία-σταθμό που οριοθετεί τη μετάβαση προς τη σύγχρονη οδοποιία, θα προτείνονταν αναμφίβολα το 1747, χρονιά ίδρυσης της Ecole Nationale (Roayale τότε) des Ponts et Chaussées (Σχολή Γεφυρών και Οδών, ουσιαστικά Σχολή Πολιτικών Μηχανικών).

Η δεσπόζουσα μορφή εκείνα τα χρόνια στα έργα οδοποιίας είναι ο μηχανικός Tresaguet. Ο Tresaguet υιοθετεί διαφορετική τυπική δομή οδοστρωμάτων (Σχήμα 3). Η επιφάνεια κίνησης δεν καλύπτεται πλέον από μεγάλες πλάκες, αλλά από κοκκομετρικά διαβαθμισμένο και συμπυκνωμένο υλικό. Υλικό που μεταγενέστε-

ρα έγινε γνωστό ως 3A, δηλαδή όχι A ποιότητας, ούτε καν AA ποιότητας, αλλά ό,τι καλύτερο ως αμμοχάλικο, AAA ποιότητας. Συγκριτικά, οι πλακοειδείς πέτρες πρόσφεραν, ίσως, καλύτερη επιφάνεια κύλισης, παρουσίαζαν, ωστόσο, και σοβαρά μειονεκτήματα. Από τη διάβρωση του νερού προέκυπτε συχνά πλημμυλής και ανομοιόμορφη υποστήριξή τους, με αποτέλεσμα να σπάζουν λόγω ανάπτυξης καμπτικών ροών από τα βαριά κάρρα. Άπαξ και έσπαζαν, η φθορά στο σημείο εκείνο ήταν επιταχυνόμενη και αποτελούσε σύντομα εμπόδιο στην κίνηση των τροχών. Θα έπρεπε άμεσα να αντικατασταθούν. Η σχετική συντήρησή τους, όμως, ήταν δύσκολη και δαπανηρή, διότι απαιτούσε μεταφορά πετρών, λάξευση με εργασία τεχνιτών και όχι εργατών, εμπειρείχε δηλαδή κόστος και χρόνο. Αντίθετα το αμμοχάλικο ήταν πολύ ευκολότερα διαθέσιμο, φθηνότερο, άμεσα προσαρμοσμένο στο μέγεθος της φθοράς, δεν αποτελούσε δέλεαρ κλοπής ως πολυτελές και ίσως δυσεύρετο δομικό υλικό όπως οι πλάκες και δεν απαιτούσε εξειδικευμένους τεχνίτες για εφαρμογή: φτυάριζαν, γέμιζαν την τρύπα, συμπύκνωναν και είχαν τελειώσει την επισκευή μέσα σε μια ώρα. Σχολιάζοντας συνολικότερα το ζήτημα, ανέτειλαν πλέον οι εποχές που οι ανάγκες συντήρησης άρχισαν να βαρύνουν στον σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου. Δεν ήταν όπως παλιότερα, που ενδιέφερε μόνο το έργο και σχεδόν καθόλου η συντήρηση και η διατήρησή του. Η τάση αυτή έχει εξελιχθεί τα μέγιστα σήμερα και ο σχεδιασμός κάθε σοβαρού έργου αφορά στη βέλτιστη απόδοση και συνολική λειτουργία του και στην ελαχιστοποίηση όχι μόνο του κατασκευαστικού κόστους, αλλά του ολικού για τη διάρκεια ζωής του.

Για να επανέλθουμε στον Tresquet, το 1775 εξέδωσε τις πρώτες οδηγίες κατασκευής οδών, οι οποίες και δικαιωματικά θεωρούνται ως οι πρώτες προδιαγραφές κατασκευής οδικών έργων. Είχε emphaticά διαβλέψει και περιγράψει τη σημασία της απομάκρυνσης του επιφανειακού νερού. Πριν κλείσουμε την αναφορά σε εκείνα τα χρόνια, ξανασυναντάμε τον Μ. Ναπολέοντα: του ανήκουν εύσημα στην εξέλιξη της οδοποιίας εκείνης της εποχής διότι με τις Διευρωπαϊκές εκστρατείες του ενθάρρυνε και επιτάχυνε την επέκταση του οδικού δικτύου.

Συνεχίζοντας το σύντομο οδοιπορικό εξέλιξης των οδοστρωμάτων συναντάμε έτερη προσωπικότητα-σταθμό στο αντικείμενο, τον Άγγλο McAdam (1815). Ο McAdam διαφοροποίησε την τεχνική του Tresquet, δημιουργώντας φθηνότερα οδοστρώματα, (Σχήμα 3). Πράγματι η θεμελίωση του οδοστρώματος σε ευμεγέθεις λίθους αποτελούσε Ρωμαϊκό κατάλοιπο, που δεν υπαγορεύονταν από κάποια εύλογη μηχανική ανάγκη και τελικά αύξαινε δυσανάλογα το κόστος. Η ορολογία, "οδοστρώματα τύπου McAdam", χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα.

Καθώς περνούσαν οι δεκαετίες του 19ου αιώνα, ένα μαύρο απαίσιιο υλικό άρχισε να εμφανίζεται όλο και συχνότερα στα οδοστρώματα. Στην αρχή ήταν ως λιθρανθρακόπισσα με άφθονη φυσική παραγωγή σε Τρίνιταντ και Βενεζουέλα. Πρόκειται για θερμοπλαστικό και κολλώδες υλικό, δηλαδή θερμαινόμενο έφθανε στο ιξώδες του νερού, μπορούσε, συνεπώς, να το αντικαταστήσει και να λειτουργήσει αυτό ως λιπαντικό στην πυκνότερη αναδιάταξη των κόκκων του αμμοχάλικου κατά τη συμπύκνωσή του. Παράλληλα, μόλις κρύωνε αποκτούσε σκληρότητα και συγκρατούσε τους κόκκους μεταξύ τους. Έτσι, το βασικό πρόβλημα της απόσπασης των επιφανειακών χαλικιών από τις οριζόντιες δυνάμεις των τροχών των οχημάτων είχε αντιμετωπισθεί, αφού κάθε ψηφίδα συγκολλούνταν με τις γειτονικές της, αντί απλώς να βρίσκονταν εκεί σφηνωμένη από τη συμπύκνωση. Στα τέλη του αιώνα, και με τον πυρετό του πετρελαίου, ένα συγγενές μαύρο δύσοσμο υλικό συσσωρεύονταν ως παραπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου. Πρόκειται για την άσφαλτο, η διάθεση ή η απόθεση της οποίας θα αποτελούσε πραγματικό πρόβλημα, εξαιτίας και των τεράστιων ποσοτήτων παραγωγής της και της απωθητικότητας της ως υλικό. Ευτυχώς προέκυψε ο ιδανικός γάμος. Η θερμοπλαστική άσφαλτος προσφέρει την πολυπόθητη συνοχή και στεγανότητα στις επιφανειακές

στρώσεις των οδοστρωμάτων. Και ποσοτικά παντρεύτηκαν οι δύο διαδικασίες: η όλο και αυξανόμενη παραγωγή πετρελαίου ήρθε ακριβώς να ανταποκριθεί στην όλο και αυξανόμενη ζήτηση κατασκευής οδικών έργων. Αξίζει να σχολιαστεί σχετικά ότι μέχρι πριν λίγες δεκαετίες η τιμή διάθεσης της ασφάλτου στην οδοποιία ήταν ευτελής, σχεδόν το κόστος μεταφοράς της, ακριβώς διότι και η βιομηχανία πετρελαίου προσδοκούσε να απαλλαγεί από αυτήν. Επιπρόσθετα, η υιοθέτηση της ασφάλτου στις επιφανειακές στρώσεις έδωσε λύση και στο ζήτημα της σκόνης. Η κυκλοφορία είχε πλέον αυξηθεί στις πόλεις και η παραγωγή σκόνης αναδεικνύονταν σε πρόβλημα. Η ασφάλτινη επιφάνεια με τη συνοχή που προσέφερε, εκμηδένισε και την παραγωγή σκόνης. Κοντολογίς, η χρήση της ασφάλτου απετέλεσε επανάσταση στην εξέλιξη των οδοστρωμάτων. Παράλληλα, οι ξύλινοι τροχοί αντικαθίσταντο από τους πλεονεκτικότερους ελαστικούς και η χημική συγγένεια καουτσούκ-ασφάλτου ίσως έπαιξε και αυτή τον θετικό της ρόλο.

6. Τα πρόσφατα χρόνια και το μέλλον που έρχεται

Στο μεταξύ, η μηχανοκίνηση της αυτοκίνησης όλο και κέρδιζε ποσοστά σε βάρος των ιππήλατων. Μια σημαντική επίπτωση της μηχανοκίνησης ήταν η αύξηση των ταχυτήτων των οχημάτων. Και όταν οι εξωφρενικοί νόμοι που περιόριζαν την ταχύτητα των μηχανοκίνητων οχημάτων σε λίγα μίλια ωριαίως αποσύρθηκαν, τότε άρχισε να υπεισέρχεται στην οδοποιία ένα νέο, πρωτόγνωρο ζήτημα: η υπηρέτηση της δυναμικής της κίνησης των οχημάτων. Μέχρι τότε οι δρόμοι ακολουθούσαν τη Ρωμαϊκή γεωμετρία των μέγιστων ευθυγραμμιών και στροφών με ακτίνες κύκλων της τάξης των 30-50m. Με την αύξηση των ταχυτήτων δύο θέματα προέκυψαν: η αύξηση των ακτίνων στροφής, ζήτημα εύκολο που υπακούει στις επιταγές της φυγόκεντρης δύναμης συνδυαστικά με την πρόσφυση των τροχών και η σύνδεση ευθυγραμμίας και στροφής, ζήτημα συνθετότερο αλλά και πιο ενδιαφέρον.

Ανάλογα, συνεπώς, με τις προσδοκώμενες ταχύτητες, οι ακτίνες στροφών των νέων υπό σχεδιασμό οδών θα έπρεπε να είχαν κατ' ελάχιστο τέτοιες τιμές, ώστε για χαμηλούς συντελεστές πρόσφυσης να εξισορροπείται η αναπτυσσόμενη φυγόκεντρος δύναμη στα οχήματα. Σχετικά με το ποιές τιμές των συντελεστών πρόσφυσης θεωρούνται χαμηλές, εδώ κυριαρχεί η θεμελιώδης αρχή σχεδιασμού έργων μηχανικού: μέριμνα για ασφαλή λειτουργία στον δυσμενέστερο πιθανό συνδυασμό παραγόντων, δηλαδή, επί τούτου, για λεία βρεγμένα οδοστρώματα και φθαρμένα ελαστικά οχημάτων. Το ενδιαφέρον από πλευράς μηχανικής θέμα είναι η συστράτευση της επίκλισης ως αρωγού. Στις ευθυγραμμίες το προφίλ των οδοστρωμάτων έχει αμφικλινή διατομή με κλίση 2,5% με αποκλειστικό σκοπό την απορροή των ομβρίων υδάτων. Στις στροφές θα ήταν έξυπνο, αν η εγκάρσια αυτή κλίση προσαρμόζονταν ώστε να αντισταθμίζει ποσοστό της φυγόκεντρης δύναμης. Πράγματι, στις στροφές η εγκάρσια κλίση έχει τιμές της τάξης του 7% και είναι και "μονόπατη". Και γιατί να μην λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, ώστε να εξισορροπεί μεγαλύτερο ποσοστό της φυγόκεντρης και να αυξηθεί η ασφάλεια κίνησης στις στροφές; Γιατί να μην κατασκευάζουμε εκείνες τις επικλίσεις που οι νόμοι της φυσικής υπαγορεύουν, όπως στα ποδηλατοδρόμια, (της τάξης του 40%), ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος πλαγιολίσθησης και εκτροπής εξαιτίας της φυγόκεντρος; Η απάντηση δεν είναι τόσο προφανής και συνίσταται στο ότι μια οδό τη χρησιμοποιούν και αργά κινούμενα οχήματα, που σε περιπτώσεις πολύ χαμηλής πρόσφυσης (πχ χιόνι) θα ολίσθαιναν "ανάποδα" εξαιτίας κάποιας υπερβολικής επίκλισης και θα κολλούσαν στο χαμηλό εσωτερικό σημείο της στροφής.

Σχετικά με τη σύνδεση ευθυγραμμιών και καμπυλών, όσο αυξάνονται οι ταχύτητες, επίσης, η εισαγωγή κάποιοι μεταβατικού τμήματος καθίστατο αναγκαίοτε-

ρη. Το ιδανικό θα ήταν να προσομοιωθεί επακριβώς η χάραξη της οδού στη φυσιογνωσία της στροφής του οχήματος. Η πρώτη προσέγγιση ήταν χοντροειδής και συνίστατο στην εισαγωγή μεταξύ ευθυγραμμίας και καμπύλης μιας νέας καμπύλης τόξου λίγων μέτρων, διπλάσιας ακτίνας. Όμως ο οδηγός όταν μεταβαίνει από ευθυγραμμία σε καμπύλη, το ιδανικό θα ήταν να γυρίζει με σταθερή ταχύτητα το τιμόνι του οχήματός του και όχι απότομα και τμηματικά. Και ποιά είναι εκείνη η καμπύλη που ανταποκρίνεται σε αυτήν ακριβώς την κίνηση; Είναι η κλωθοειδής, καμπύλη (σπείρα) με αναλογικά του μήκους της μεταβαλλόμενη καμπυλότητα, που σε κάθε σημείο από την αρχή της ($Lx=0$: τέλος ευθυγραμμίας = ∞ ακτίνα καμπυλότητας = 0 καμπυλότητα) έχει μήκος Lx και κατάλληλα μεταβαλλόμενη ακτίνα στο πέρας της (Rx), ώστε: $Lx \times Rx = A^2$ και η οποία να καταλήγει στην ακτίνα R της στροφής που συνδέει. Η τιμή της σταθεράς A δείχνει το "απότομο" της μετάβασης και έχει συνήθως τιμές λίγο μικρότερες της R . Η μεταβατική αυτή καμπύλη προσομοιάζει επακριβώς το ίχνος της πλέον άνετης και ασφαλούς μετάβασης ενός οχήματος από την ευθύγραμμη κίνησή του σε στροφή, δηλαδή, τη με σταθερή γωνιακή ταχύτητα στροφή του τιμονιού του. Χρονολογικά το 1942 αποτελεί το πρώτο έτος εφαρμογής της κλωθοειδούς στη χάραξη. Είναι οι χρονιές που έχουν ήδη κατασκευαστεί οι πρώτοι υψηλών προδιαγραφών δρόμοι στην Ευρώπη. Ιστορικά, ο πρώτος αυτοκινητόδρομος κατασκευάστηκε στην Ιταλία το 1924 είχε μήκος 130 km. Ακολούθησαν Γερμανία και ΗΠΑ. Τις επόμενες δεκαετίες ακολουθεί φρενήρης κατασκευή αυτοκινητοδρόμων σε όλες τις προηγμένες χώρες και εκατοντάδες χιλιόμετρα προστίθενται στο σχετικό δίκτυο ετησίως.

Παράλληλα, στα άλλα έργα μηχανικού σημειώνεται αλματώδης πρόοδος. Μεγάλες γέφυρες και σήραγγες δεν αποτελούν πλέον έργα αποτρεπτικής δυσκολίας. Τα μεγάλα φυσικά εμπόδια, όπως όρη, ποτάμια και χαράδρες κάποτε κυβερνούσαν τις χαράξεις των οδών, οι οποίες τα διέσχίζαν μόνο όπου η βατότητά τους ήταν συμβατή με τη "μηχανική" της εποχής. Η μαζικοποίηση των μετακινήσεων, ως αποτέλεσμα της οικονομικής ανάπτυξης, κατέστησε οικονομοτεχνικά σκόπιμο τη μείωση των χρόνων που επιτυγχάνεται, προφανώς, με την ευθυτένεια των χαράξεων. Άλλωστε, πέραν παράκαμψης των φυσικών εμποδίων, η ίδια η φύση των αυτοκινητοδρόμων είναι αδιάρρηκτα συνδεδεμένη με τα επιτεύγματα έργων μηχανικού. Ένας επαρχιακός δρόμος έχει ακτίνες στροφής της τάξης των 50m και κλίσεις έως 12%, τιμές που είναι σχετικά συμβατές με τις φυσικές λοφοπλαγιές. Ωστόσο, η ταχύτητα, η άνεση και η ασφάλεια που προσφέρουν οι αυτοκινητόδρομοι απαιτεί πολλαπλάσιες ακτίνες και υποδιπλάσιες μέγιστες κλίσεις οπότε, είναι προφανές ότι, όσο αυξάνει η ποιότητα της οδού, τόσο αυτή αναγκαστικά θα αποκολλάται από το έδαφος, αφού η γεωμετρία της χάραξης της γίνεται όλο και πιο ασύμβατη με την τοπογραφία των πλαγιών. Αυτήν ακριβώς την αποκόλληση και την ποιότητα των οδών καλούνται να υπηρετήσουν οι κοιλαδογέφυρες και οι σήραγγες: οι δρόμοι πλέον, όλο και λιγότερο προσαρμόζονται στο ανάγλυφο και είναι δέσμιόι του. Άλλο επακόλουθο του παντρέματος γεφυρών και αυτοκινητοδρόμων αποτελεί η ανάπτυξη πολύπλοκων πολύροφων κόμβων, που διαμοιράζουν μεγάλες κυκλοφοριακές ροές εξυπηρετώντας τις ανάγκες ζήτησης (Σχήμα 4).

Στα τέλη του 20^{ου} αιώνα αρχίζει να αναθεωρείται και η σπουδαιότητα της ευθυγραμμίας ως στοιχείο της χάραξης, διότι θεωρείται ότι δημιουργεί επικίνδυνες ταχύτητες στα πέρατά της, ενισχύει το αίσθημα της κόπωσης και μονοτονίας, δυσχεραίνει την εκτίμηση των αποστάσεων και αυξάνει τον κίνδυνο θάμβωσης κατά τις νυχτερινές ώρες, επηρεάζει, δηλαδή, συνολικά δυσμενώς την οδική ασφάλεια. Μια συνεχούς και ήπιας καμπυλότητας χάραξη με προβλέψιμη ροή θεωρείται ο στόχος. Οι Οδηγίες αναθεωρούνται τακτικά με στόχο την κατασκευή σύγχρονων οδικών έργων, τα οποία θα διακρίνονται πρωτίστως για την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα, την οικονομία, την άνεση και την προστασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 4. Εξάωροφος (!) ανισόπεδος κόμβος αυτοκινητοδρόμων

Σχετικά με το περιβάλλον, η αξία του και η διατήρησή του ανατιμάται συστηματικά (και ορθώς) τις τελευταίες δεκαετίες. Τα οδικά έργα αποτελούν, εξ ορισμού, τον τυπικό εχθρό του περιβάλλοντος, δεσμεύοντας τεράστιες λωρίδες γης και αποτείνοντας περιβαλλοντικά υποσυστήματα. Ο μόνος τρόπος απόλυσης της εν λόγω επιρροής είναι πάλι η εισαγωγή τεχνικών έργων. Με τίμημα την αύξηση του κόστους, οι οδοί μέσω κοιλαδογεφυρών και σηράγγων ελαχιστοποιούν το περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους, αφού αφήνουν εκεί ανεπηρέαστο το έδαφος.

Και ποιά είναι το μέλλον των οδών, τι έρχεται και τι πρόκειται να ακολουθήσει στις επόμενες δεκαετίες; Οι μικροηλεκτρονικές εφαρμογές, που πλέον κυριαρχούν σε πλείστους όσους τομείς της ζωής μας θα διεισδύουν και στις οδούς όλο και περισσότερο. Ήδη σήμερα λαμβάνονται συχνά δεδομένα από τις οδούς μέσω καμερών και ανιχνευτών οδοστρώματος και οι υπεύθυνοι λειτουργίας των οδών επικοινωνούν με τους χρήστες με ηλεκτρονικά μηνύματα. Ήδη, κυκλοφορούν οχήματα που συλλέγουν πληροφορίες από την οδό και ανάλογα προσαρμόζουν την κίνησή τους ή ειδοποιούν τον οδηγό. Τα ηλεκτρονικά δίοδια αποτελούν άλλο διαδεδομένο επακόλουθο αυτής της εξέλιξης. Η είσοδος της ηλεκτρονικής είναι χωρίς επιστροφή: χρόνο με τον χρόνο η οδός θα ανταλλάσει όλο και περισσότερες πληροφορίες με τα οχήματα με ή και χωρίς τη διαμεσολάβηση των οδηγών. Παράλληλα, τα φωτοβολταϊκά κυρίως συστήματα εξαπλώνονται, ώστε οι δρόμοι να είναι ενεργειακά αυτόνομοι και συστήματα υποτυπώδους θέρμανσης εγκαθίστανται σε γέφυρες επιρρεπείς στη δημιουργία πάγου. Ανοιχτόχρωμοι ασφαλτοτάπητες εφαρμόζονται στις αρτηρίες, προς αύξηση της οδικής ασφάλειας τη νύχτα και ηχοαπορροφητικά οδοστρώματα εφαρμόζονται στις πόλεις. Όσο για το μακρυνότερο μέλλον, μπορεί να εκφραστεί η εικασία ότι μερίδιο της αυτοκίνησης θα περάσει στο επίπεδο των ατομικών πτητικών μηχανών.

Σχετικά με το ερώτημα του "τι φέρνει τι" η ανάπτυξη τους δρόμους ή το αντίστροφο, που τέθηκε στην αρχή του άρθρου, η απάντηση είναι ξεκάθαρη: είναι οι δρόμοι που ακολουθούν την ανάπτυξη. Ιστορικά, κανείς δεν ενδιαφερόταν να κατασκευάσει έναν δρόμο για να αρχίσει να υφίσταται εμπόριο μεταξύ δύο περιοχών. Πρώτα είχε αναπτυχθεί το εμπόριο, είχε προδήλως θετικά αποτελέσματα στις κοινωνίες και κατόπιν οι άρχοντες αποφάσιζαν να το διευκολύνουν φτιάχνοντας δρόμους. Πρώτα γίνονταν κατακτήσεις και επεκτάσεις των αυτοκρατοριών σε νέα εδάφη και κατόπιν επεκτείνονταν το οδικό δίκτυο και εκεί, ώστε να διευκολυνθεί

η διοίκηση και η επικοινωνία με τις νέες κτίσεις. Με την πρόοδο της κοινωνίας και της οικονομίας και έχοντας πλέον καλυφθεί όλες οι βασικές χερσαίες επικοινωνίες, τίθεται το ερώτημα και αντιστρόφως: μήπως η διάνοιξη μιας νέας οδού (πχ μιας νέας σήραγγας στις Άλπεις) θα δώσει ώθηση στην ανάπτυξη μιας περιοχής ή και ευρύτερα; Όπως υπάρχει σχεδιασμός όλων των υποδομών, έτσι συμβαίνει και για τις νέες οδούς, αποτελούν, δηλαδή, ένα βασικό εργαλείο ανάπτυξης.

7. Οι ιδιομορφίες οδών και οδοστρωμάτων ως έργα μηχανικού

Η βασικότερη ιδιαιτερότητα των οδών ως έργα μηχανικού είναι ότι υπό τη σκέπη τους παντρεύονται πλείστα όσα έργα μηχανικού: πέραν των γεφυρών και των σιράγγων που προαναφέρθηκαν, εκτεταμένα εδαφοτεχνικά έργα, αλλά και κτηριακά (κτίρια ελέγχου) και υδραυλικά και ηλεκτρομηχανολογικά έργα συνυπάρχουν.

Επίσης, είναι καταφανές ότι οι οδοί και τα οδοστρώματα είναι τα πλέον εκτεταμένα και ταυτόχρονα εκτεθειμένα έργα μηχανικού. Εκτεθειμένα, όχι μόνο στις καιρικές συνθήκες, όπως όλοι αντιλαμβάνονται, αλλά ταυτόχρονα και σε εδαφοτεχνικές συνθήκες (πχ διέλευση από ελώδη εδάφη), που κάθε άλλο έργο μηχανικού θα απόφευγε. Αυτή η πραγματικότητα ουσιαστικά κάνει αποδεκτές τις σποραδικές τοπικές αστοχίες στα έργα οδοποιίας: είναι, για παράδειγμα, αδύνατο (ή μάλλον εξαιρετικά δαπανηρό) η γεωτεχνική έρευνα να είναι τόσο εκτενής και λεπτομερής που να διαβλέψει κάθε ασθενή θύλακα υποκείμενου εδάφους ή πρηνούς που θα προκαλέσει τοπική αστοχία. Είναι, επίσης, εξαιρετικά δαπανηρό ο όλος σχεδιασμός και η κατασκευή ενός εκτεταμένου οδικού έργου να γίνει με υψηλούς συντελεστές ασφαλείας, ώστε να καλυφθούν οι εν λόγω αδυναμίες. Μια τέτοια υπερδιαστασιολόγηση θα αυξήσει υπέρμετρα το κόστος. Συνεπώς, τα οδικά έργα αποτελούν ίσως το μοναδικό έργο που κάποιες τοπικές αστοχίες είναι ενσωματωμένες στο σχεδιασμό τους και οι οποίες, με το που θα εκδηλωθούν, θα υπάρχει η παρέμβαση αποκατάστασης, ώστε το συνολικό έργο να προκύψει ανταγωνιστικό.

Ακόμα, η φθορά και η επιδείνωση των οδοστρωμάτων είναι βαθμιαία και σταδιακή. Σπανίως συναντάται ψαθυρά αστοχία. Βαθμιαίες αστοχίες συμβαίνουν, βέβαια, και σε άλλα έργα πολιτικού μηχανικού. Ωστόσο μόνο στα οδοστρώματα συναντάται η έννοια της αστοχίας τόσο σταδιακά προβλέψιμη, αλλά και συνδεμένης με το οικονομικό-λειτουργικό περιβάλλον τους: ένα οδόστρωμα μιας επαρχιακής οδού μπορεί να έχει υποστεί ικανές φθορές, αλλά παρόλα αυτά η οδός να θεωρείται ότι λειτουργεί αποδεκτά. Το ίδιο ακριβώς οδόστρωμα σε εθνική οδό (και κατά μείζονα λόγο σε αυτοκινητόδρομο) θα θεωρούνταν απαράδεκτο και θα έχρηζε άμεσης αποκατάστασης. Ένα οδόστρωμα εθνικής οδού σε μια φτωχή χώρα, έστω της Αφρικής, θα ήταν αποδεκτό, ακόμα και αν είχε πληθώρα φθορών και παραμορφώσεων. Το ίδιο οδόστρωμα θα ήταν απαράδεκτο ακόμα και για επαρχιακή οδό μιας πλούσιας οικονομικά χώρας. Η αστοχία, συνεπώς, των οδοστρωμάτων είναι συνάρτηση του σε τι κατηγορίας οδό βρίσκονται ως και της οικονομικής ευμάρειας της χώρας. Επιπρόσθετα, η εξέλιξη της παρακμής των οδοστρωμάτων ως προς κάθε μια από τις 3 σημαντικές βλάβες τους (παραμορφώσεις, ρηγματώσεις, ολισθηρότητα) είναι προβλέψιμη και υπακούει σε μαθηματικά μοντέλα. Δηλαδή, παρατηρώντας το οδόστρωμα και ορίζοντας κατώφλια αποδεκτής λειτουργικότητας, ο μηχανικός γνωρίζει πόσο σύντομα στο μέλλον η επιδείνωση θα φθάσει σε μη αποδεκτά μεγέθη, οπότε θα χρειάζεται αποκατάσταση του οδοστρώματος. Συνεπώς, γνωρίζει εκ των προτέρων πότε θα πρέπει να δρομολογήσει τη σχετική επέμβαση, άρα και να προγραμματίσει τη διάθεση του σχετικού κονδυλίου. Ο συνδυασμός αυτός δεν συναντάται συχνά σε άλλα έργα μηχανικού και αποτελεί ενδιαφέρον πάντρεμα της μηχανικής και της οικονομικής επιστήμης.