

ΕΠΙΜΟΡΦΩΤΙΚΟ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ

“ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ. ΟΙ ΔΡΟΜΟΙ ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ”

3 - 6 Νοεμβρίου, 2008, Αθήνα

Οδοστρώματα από σκυρόδεμα.

Τεχνικοοικονομική και περιβαλλοντική θεώρηση

Ι. Παπαγιάννη

Καθηγήτρια Α.Π.Θ.



Ιστορικό

- Η χρήση του σκυρ/τος για την κατασκευή πλακών κύλισης σε οδοστρώματα χρονολογείται από την εποχή του 1^{ου} Παγκοσμίου πολέμου (San Antonio Texas, USA, 1914) [Taubert, 2006).
- Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 σε πολλές χώρες (όπως Καναδάς, ΗΠΑ, Γαλλία, Μ. Βρετανία, Βέλγιο, Ολλανδία, Ιταλία) κατασκευάζονται υψηλής κυκλοφορίας οδοστρώματα οδικών δικτύων από σκυρ/ματα οπλισμένα με συνεχή οπλισμό [ACPA, 2001].
- Στην πλειονότητά τους τα οδοστρώματα αυτά, ηλικίας πάνω από 50 χρόνια, με συνεχή κυκλοφορία, διατηρούνται σε πολλή καλή κατάσταση.

Ιστορικό



Χρόνος Κατασκευής:
1953

Κυκλοφοριακός φόρτος
σήμερα: 240.000ADT

Εικ. 1 – Interstate 10, κοντά στη Pomona, California, USA



Ιστορικό

- Μετά το 1960 παρατηρείται μία έκρηξη στην κατασκευή οδικών αρτηριών στην Ευρώπη και Αμερική, λόγω των αυξημένων αναγκών μετακίνησης εμπορευμάτων.
- Παράλληλα, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες στην κατασκευή οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά τους και τα κάνουν περισσότερο ανταγωνιστικά εν σχέση με τα ασφαλτο-οδοστρώματα, καθώς και τεχνικά μέσα (εξοπλισμός) που μειώνουν το χρόνο κατασκευής και αναβαθμίζουν την ποιότητα δαπέδων.



Ιστορικό

- Με την παγκοσμιοποίηση του εμπορίου, ο τομέας «μεταφορές» αποκτά ένα ιδιαίτερα ζωτικό ρόλο στην οικονομία και η κατασκευή μεταφορικών αξόνων ασφαλούς και ταχείας κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων με το χαμηλότερο δυνατό συνολικό κόστος, επιτάσσει υψηλής ποιότητας οδοστρώματα. Σε αυτή την πρόκληση, η λύση φαίνεται να είναι τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα.
- Σύμφωνα με την εκτίμηση του Forum of European National Highway Research Laboratories, το ποσοστό των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα στο σύνολο των εθνικών οδικών δικτύων, ποικίλει από χώρα σε χώρα, αποδίδεται κυρίως στο σχετικά υψηλότερο αρχικό κόστος κατασκευής συγκριτικά με τα εύκαμπτα ασφατικά οδοστρώματα, καθώς και στην έλλειψη εξοικείωσης / εμπειρίας του τεχνικού κόσμου με το σκυρ/μα οδοστρωσίας.



Ιστορικό

Οδοστρώματα από σκυρ/μα στο σύνολο του οδικού δικτύου των Ευρωπαϊκών χωρών

Χώρα	Ποσοστό
Τσεχία	50%
Αυστρία	36%
Βέλγιο	35%
Γερμανία	25%
Γαλλία	<10%
Ολλανδία	≤10%
Πολωνία	≤10%
Ισπανία	≤10%
Ελβετία	≤10%
Μεγ. Βρετανία	≤10%

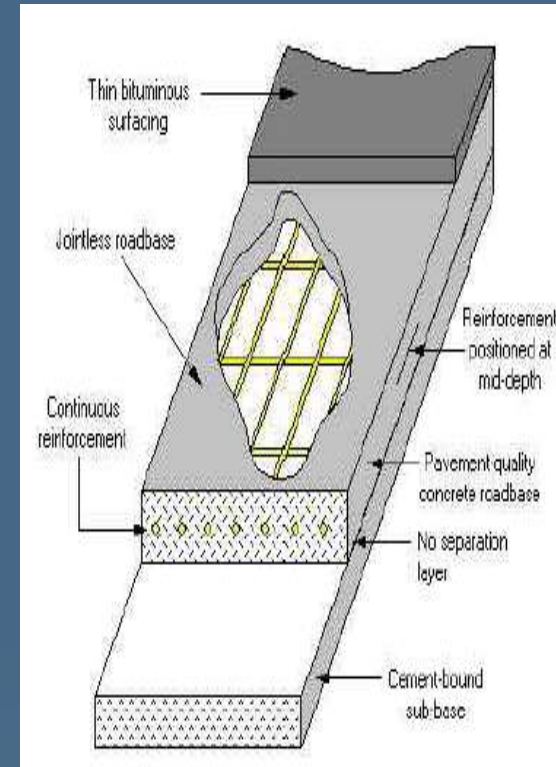
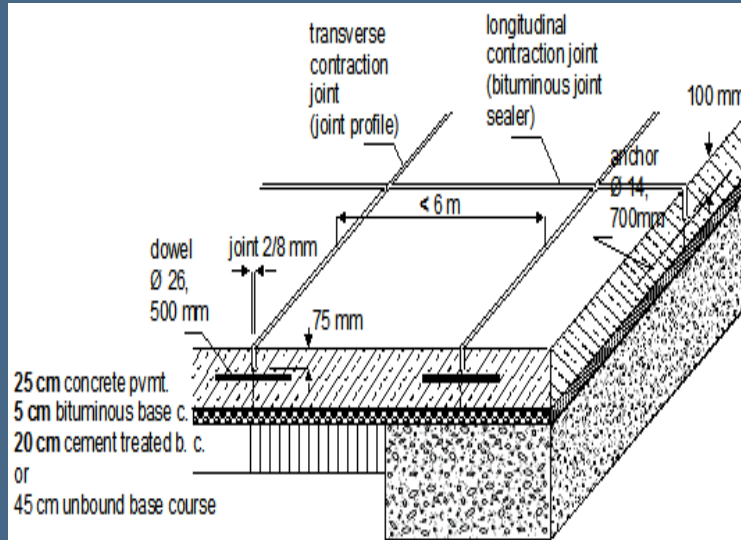
✓ Σήμερα στην κατασκευή δύσκαμπτων οδοστρωμάτων κυριαρχούν τα οπλισμένα με συνεχή οπλισμό σκυροδέματα.



Τύποι οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

- **Άοπλο οδόστρωμα (URC):** Η πλάκα κύλισης (με εγκάρσιους αρμούς συστολής / διαστολής με ή χωρίς διαμήκη οπλισμό) στηρίζεται στη στρώση υπόβασης (από ασύνδετο ή συνδεδεμένο με κονία αδρανές υλικό).
- **Οπλισμένο με συνεχή οπλισμό οδόστρωμα (CRCP):** Μικρότερου πάχους πλάκα κύλισης.

Τύποι οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα



Εικ. 2 – Σχηματικά διαγράμματα για JRC (αριστερά) και CRCP (δεξιά)

Τύποι οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

➤ Σύνθετος τύπος οδοστρώματος:

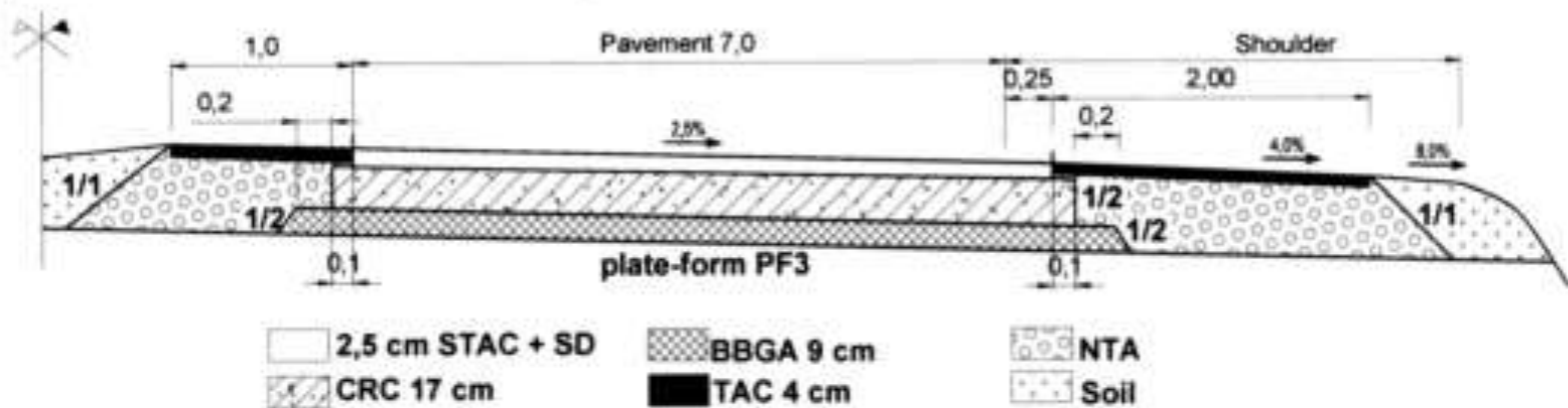


Figure 1 - Transversal coupe, new design CRCP/ BBGA

VTAC: Very Thin Asphalt Concrete

SD: Surface Dressing

CRCP: Continuous Reinforced Concrete Pavement

BBGA: Bituminous-bound graded Aggregates

NTA: Non-treatment Aggregates

TAC: Thin Asphalt Concrete



Τύποι οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

- Το **URC** οδόστρωμα είναι οικονομικότερο (σχετικά μικρότερου αρχικού κόστους κατασκευής εν σχέσει με το CRCP) και γι' αυτό αποτελούσε στις προηγούμενες δεκαετίες την πιο προσφιλή επιλογή. Οι πιθανές μετακινήσεις μεταξύ των πλακών του οδοστρώματος παραλαμβάνονται με τον οπλισμό των αρμών.
- Το **CRCP** αποτελεί την ιδανική επιλογή για υψηλής κυκλοφορίας οδούς ή για περιπτώσεις χαμηλής φέρουσας ικανότητας του εδάφους θεμελίωσης.



Τύποι οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

- Σύμφωνα με μελέτη του Πολυτεχνείου της Βιέννης και της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Αυστρίας, έχει βρεθεί ότι στις κυκλικές διασταυρώσεις οδικών αξόνων (roundabout) τα οδοστρώματα εκτίθενται σε υψηλά επίπεδα τάσεων που προκύπτουν από τις οριζόντιες διατμητικές δυνάμεις που δημιουργούνται από το φρενάρισμα ή την επιτάχυνση των οχημάτων στις εισόδους ή εξόδους αντίστοιχα των βρόγχων, καθώς και από τη φυγόκεντρο δύναμη που αναπτύσσεται από την κυκλική κίνηση.
- Ως συνέπεια των παραπάνω, τα εύκαμπτα οδοστρώματα των κυκλικών διασταυρώσεων αστοχούν πολύ γρήγορα, παρουσιάζοντας βαθειές αυλακώσεις και απαιτούνται υψηλά κόστη συντήρησης.

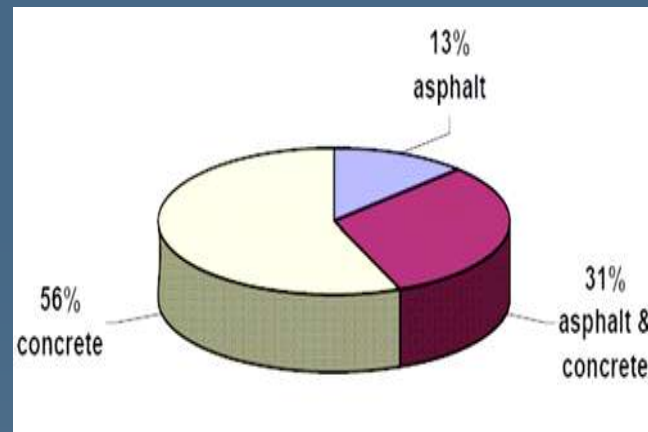


Ασφαλτοσκυρόδεμα κεντρικού δρόμου της Θεσσαλονίκης



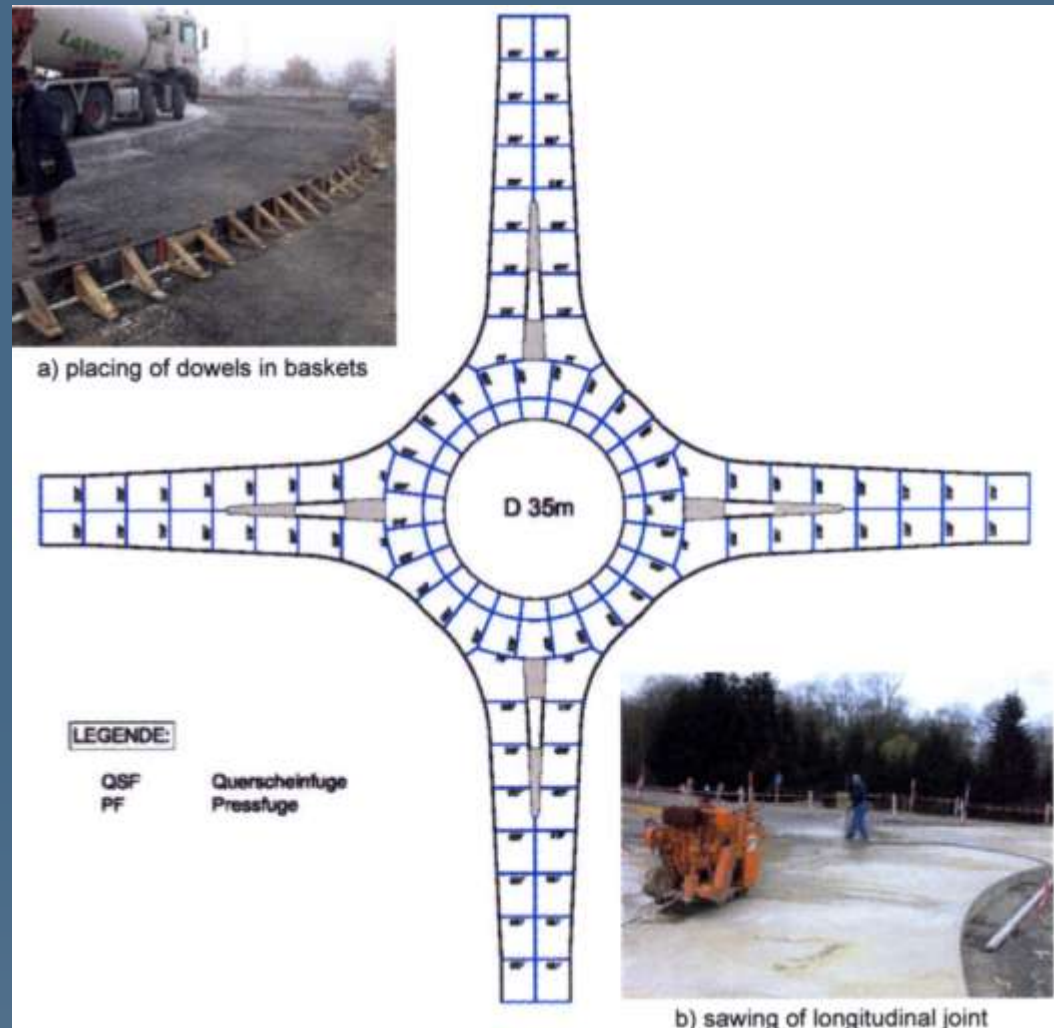
Τύποι οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

- Στην Αυστρία, μέχρι το 2005, 16 οδικοί κυκλικοί κόμβοι, κατασκευάστηκαν με οδόστρωμα σκυρ/τος.
- Στους κανονισμούς της Αυστρίας προτείνεται κατηγορία σκυρ/τος για τους κόμβους κυρίων δρόμων C25 / 30 / XF4 / XM2 (A)



Ποσοστιαία αναλογία από διαφορετικούς κατασκευαστικούς τύπους οδοστρωμάτων στην είσοδο και έξοδο βρόγχων roundabouts

Τύποι οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα



Παράδειγμα σχεδιασμού και κατασκευής αρμού σε βρόγχο
κατασκευασμένο από σκυρμα



Τεχνικοοικονομικά και Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά

- Το μεγάλο πλεονέκτημα των οδοστρωμάτων από σκυρ/μα εν σχέσει με τα ασφαλτικά (η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου κάνει το εύκαμπτο οδόστρωμα ευαίσθητο στα παραμένοντα φορτία και στη θερμοκρασία), είναι ο σχετικά μεγάλος ωφέλιμος χρόνος ζωής (30-50 χρόνια), χωρίς να απαιτούνται επεμβάσεις αποκατάστασης της λειτουργικότητας.
- Αυτό βέβαια προϋποθέτει συνετό σχεδιασμό του σκυρ/τος και καλή εφαρμογή.



Τεχνικοοικονομικά και Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά

- Σχετικά με το σχεδιασμό υπάρχει εμπειρία και κανονιστικά πλαίσια: τα απαιτούμενα επίπεδα αντοχής (θλιπτικής και καμπτικής) είναι:

Πίνακας 1 – Σχεδιασμός αντοχής σκυρ/τος

Country	Age of testing (days)	Concrete strength (MPa)		
		Compressive	Flexural	Tensile (splitting)
Austria	28	35/40	5.5	-
Belgium	90	62.5	-	-
Czech Republic	28	25 - 35	3.5 - 4.5	-
France	28	-	-	2.7
Germany	28	30/37	-	-
Netherlands	28	35/45	-	-
Poland	28	-	4 - 6	-
Spain	28	-	3.5 - 4.5	-
Switzerland	28	30	5.5	-
UK	28	-	4.5 - 6	-



Τεχνικοοικονομικά και Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά

- Σχετικά με την κατασκευή υπάρχει σύγχρονος εξοπλισμός που μειώνει το χρόνο κατασκευής



Οδός από σκυρ/μα μετά το τελείωμα

Pressing-in of dowels every 5 m and tie bars in spacing of 1 m into fresh concrete



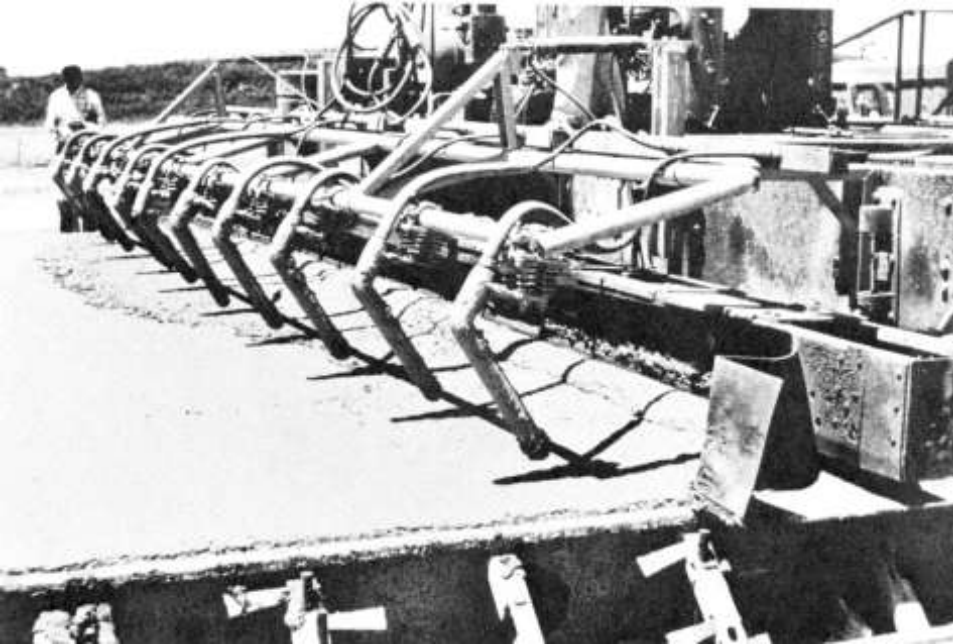
Dowels \varnothing 25 mm, 60 cm long, spacing 25 cm -
tie bars \varnothing 20 mm, 80 cm long, spacing each 1 m



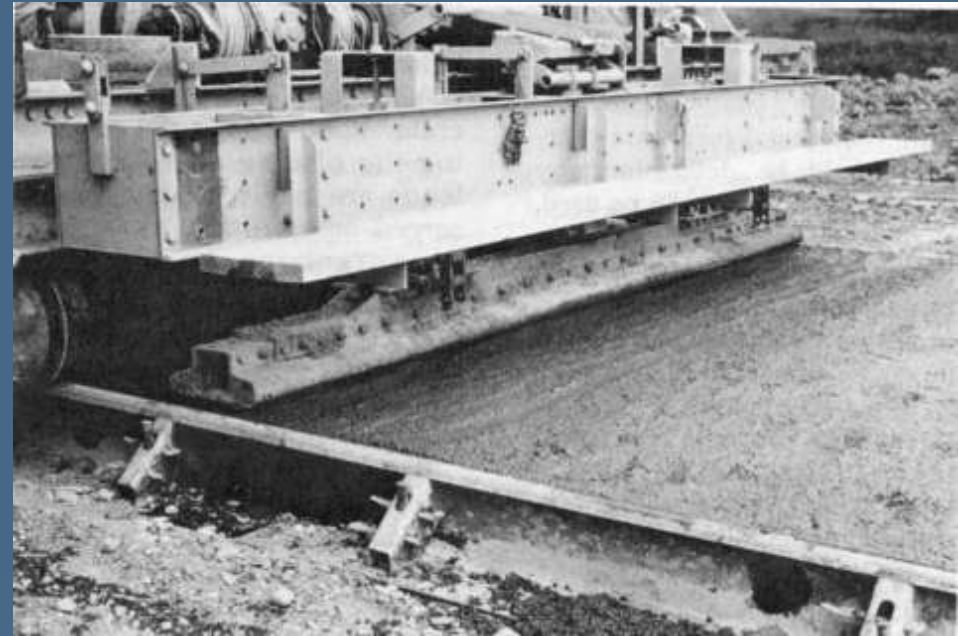
Κατασκευή οδοστρώματος από σκυρ/μα



Κατασκευή οδοστρώματος από σκυρ/μα
τη νύχτα



Gang mounted spud vibrators, in the withdrawn position, for consolidating pavement concrete



Pan type surface vibrator for pavement construction



Σχετικοί κανονισμοί και Οδηγίες για οδοστρώματα από σκυρ/μα

➤ EUROPEAN STANDARD

EN 138771 (2004): Concrete Pavements

EN13877-2 (2004):Concrete-Pavements-Functional requirements for concrete pavements

EN13877-3 (2004):Concrete-Pavements-Specifications for dowels to be used in concrete pavements

➤ BRITISH CEMENT ASSOCIATION (1994): Concrete pavements for Highways. Publication Document 46-030 UK

➤ AASHTO (1986): Guide for design of pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC

➤ CSN-736123: Pavement-Construction-Rigid Pavements, Czech Standard

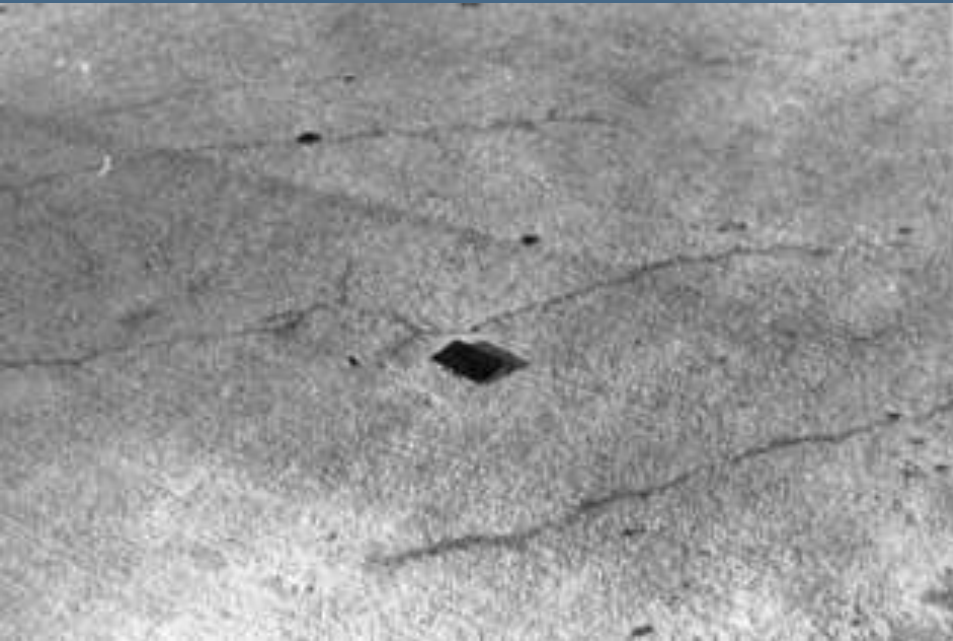
Οι πιο συχνά παρατηρούμενες φθορές αφορούν στην επιφάνεια του σκυρ/τος και είναι:



Εγκάρσιες ρηγματώσεις



Ρηγματώσεις τυχαίου προσανατολισμού



Διαγώνιες ρηγματώσεις



Ρηγματώσεις χαρακτηριστικού pattern



Αποφλοίωση επιφάνειας



Απολέπιση επιφάνειας



Polish coarse aggregates
contributes to low skid resistance



Αποφλοίωση επιφάνειας σκυροδέματος



Scaling



Pop-out



Βάσει των συμπερασμάτων από τον έλεγχο των υφιστάμενων οδοστρωμάτων

- Στα CRCP η υψηλή καμπτική αντοχή προστατεύει από την ρηγματώση. Η τοποθέτηση οπλισμού στο $1/3$ του πάχους από την επιφάνεια της πλάκας ελατώνει το εύρος των ρηγματώσεων.
- Τα ασβεστολιθικά αδρανή συμπεριφέρονται στις θερμοκρασιακές μεταβολές καλύτερα εν σχέση με τα πυριτικά.
- Τα τσιμέντα χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης ευνοούν τη μείωση των θερμοκρασιακών βαθμίδων και αποφεύγεται η ανάπτυξη εντάσεων στη μάζα του υλικού.



- Εν σχέσει με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα δύσκαμπτα από σκυρ/μα, παρουσιάζουν μεγαλύτερο θόρυβο κύλισης τροχών.
- Σχετικά με το θέμα αυτό, έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές τεχνολογίας φινιρίσματος του καταστρώματος (Γερμανία, Αυστρία, Μ. Βρετανία), που βελτιώνουν το κράτημα των τροχών και την ελάτωση του θορύβου (σε πολλές χώρες υπάρχει όριο αποδοχής).



Προετοιμασία επιφάνειας σκυρ/τος, σύμφωνα με ZTV Beton - StB 91 and 01



Evaluation of structured concrete and exposed aggregate concrete

Surface designs	Skid resistance		tire/ carriageway noise
	Initially	Long-term	
structured concrete			
-horizontal line drawn by a steel brush	excellent	favourable	less favourable
- longitudinal burlap line	favourable	partly less favourable	very favourable
- longitudinal steel brush line	very favourable	partly less favourable	very favourable
- longitudinal burlap/comb line	very favourable	partly less favourable	favourable
- longitudinal artificial turf line	very favourable	partly less favourable	very favourable
exposed aggregate concrete			
exposed aggregate concrete 0/8	very favourable	favourable	very favourable
exposed aggregate concrete 0/5		- rougher aggregates are brushed off and partly driven off by traffic; washed out concrete type 0/5 should therefore not be generally used	
exposed aggregate concrete 0/11		- too rough for a low tire/carriageway noise	



Για τη σύγκριση από οικονομικής και περιβαλλοντικής άποψης των εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων έχουν αναπτυχθεί μοντέλα cost-benefits analysis (CBA), όπως το PASI model από το IM3 Group “Economic Evaluation of long-life Pavements” (OECD, 2005), που λαμβάνουν υπόψη:

- Το αρχικό κόστος κατασκευής
- Το κόστος επεμβάσεων και διευθέτησης της κυκλοφορίας (παρακαμπτήριες οδοί)
- Το κόστος που καταβάλλει ο χρήστης από τις καθυστερήσεις και το κόστος των ατυχημάτων που μπορούν να συμβούν στο διάστημα των επισκευαστικών εργασιών
- Τις οικονομικές επιπτώσεις στο περιβάλλοντα χώρο από την κατασκευή και τις επισκευές που απαιτούνται
- Την απομένουσα αξία του δαπέδου



- Σχετικά με το αρχικό κόστος κατασκευής η αρχική διαφορά (15-20% ακριβότερο οδόστρωμα από σκυρ/μα εν σχέσει με αντίστοιχο ασφαλτικό) έχει μειωθεί σε 10% περίπου.
- Αρκετές μελέτες έχουν αποδείξει ότι τα βαρέα οχήματα προκαλούν μεγαλύτερη παραμόρφωση στο εύκαμπτο οδόστρωμα. Αυτό συντελεί στην απορρόφηση μέρους της ενέργειας κίνησης / προώθησης των τροχών και επομένως υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου.
- Με αρκετά συντηρητική θεώρηση, η μείωση αυτή των καυσίμων κυμαίνεται από 0,8 στα 100km/h ταχύτητα σε 6,9% για 60km/h ταχύτητα. Λαμβάνοντας ως πρότυπο μία τυπική οδική αρτηρία [1000km που κινούνται 20.000 οχήματα (15% trucks)], τα αποτελέσματα ανάγονται στο παρακάτω πίνακα.



Ετήσια εξοικονόμηση σε \$, CO₂, NO_x, SO₂ για τυπικές οδικές αρτηρίες

% Fuel Savings	Fuel Saved (litres)	Fuel Savings (\$)	CO ₂ Eq (tonnes)	NO _x (kg)	SO ₂ (kg)
0.8 min.	376,680	\$301,344	1038.9	11,758	1,486
3.85 avg.	1,812,772	\$1,450,218	4999.6	56,585	7,152
6.9 max.	3,248,865	\$2,599,092	8960.4	101,413	12,818

- Είναι φανερό η σημασία της μείωσης των εκπομπών για τη δημόσια υγεία, καθώς και της επίπτωσης της μείωσης του κόστους μεταφοράς στο κόστος των καταναλωτικών ειδών.



- Λόγω της απαίτησης συνδετικής κονίας χαμηλής έκλυσης θερμότητας ενυδάτωσης, ένα ποσοστό του clinker του τσιμέντου συνήθως αντικαθίσταται με βιομηχανικά προϊόντα (ιπτάμενες τέφρες, σκωρίες υψικαμίνων).
- Λόγω των μεγάλων ποσοστών σκυρ/τος που συνήθως απαιτούνται για την ολοκλήρωση ενός έργου, αυτό συντελεί εκτός από την οικονομία στην απορρόφηση σημαντικών ποσοστών των παραπροϊόντων και απαλλαγή από το κόστος διαχείρισής τους, όπως και από τις επιπτώσεις της απόθεσής τους στο περιβάλλον.



Particulars	Laboratory, Gujarat	Ropar, Punjab	Ambujanagar, Gujarat
Grade of HVFA Concrete	M40	M40	M40
Ordinary Portland Cement	225 kg / m ³	225 kg / m ³	225 kg / m ³
Processed fly ash	225 kg / m ³	225 kg / m ³	225 kg / m ³
Coarse aggregates (cursh sedimentary stone)	1283 kg / m ³	1392 kg / m ³	1283 kg / m ³
Fine aggregates (river sand)	547 kg / m ³	435 kg / m ³	547 kg / m ³
Plasticizer - Polymer based (water reducers)	2.25 ltr. / m ³	2.25 ltr. / m ³	2.25 ltr. / m ³
Water to cementitious material ratio	0.32	0.40	0.32

Αναμίγματα σκυρ/τος που χρησιμοποιήθηκαν για κατασκευή
οδοστρωμάτων HVFA στην Ινδία



Average Compressive Strength (Mpa)			
1 Day	3 Days	7 Days	28 Days
9.5	18.4	24.1	41.6
Average Flexural Strength (Mpa) at 28 Days			
7.6			

Αποτελέσματα θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής
οδοστρωμάτων HVFA στο Ropar, Punjab

Average Compressive Strength (Mpa)			
1 Day	3 Days	7 Days	28 Days
9.2	19.5	25.5	40.0
Average Flexural Strength (Mpa) at 28 Days			
6.8			

Αποτελέσματα θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής
οδοστρωμάτων HVFA στο Gujarat



1^ο οδόστρωμα HVFA στην Ινδία
(Ropar, Punjab)



Οδόστρωμα HVFA στο Ambujanagar, Gujarat



- Επιπλέον το σκυρ/μα οδοστρωμάτων είναι σχεδόν 100% ανακυκλώσιμο υλικό.
- Τα σκυροδέματα οδοστρωμάτων στο τέλος της ζωής τους θραύονται και χρησιμοποιούνται ως υλικό υπόβασης για το νέο οδόστρωμα.



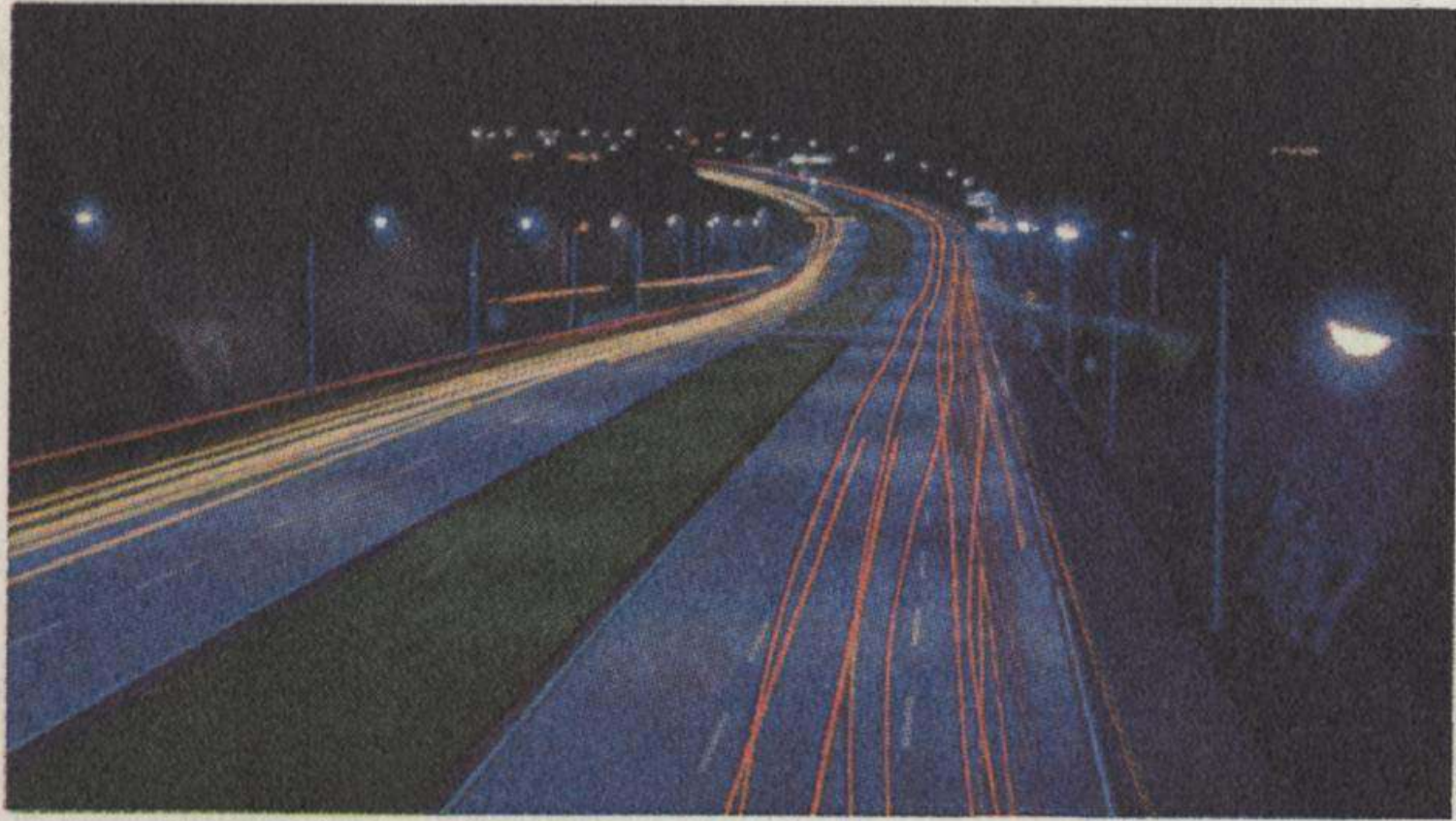
Διαδικασία ανακύκλωσης σκυρ/τος



- Σύμφωνα με μελέτες (ACPA, 2004) ένα οδόστρωμα εύκαμπτο συγκρίσιμων σχεδιαστικών δεδομένων για μία αρτηρία χαμηλής αντοχής υπόβασης, απαιτεί τουλάχιστον διπλάσια στρώση αδρανούς υλικού με όλες τις συνέπειες που αυτό έχει στην εξάντληση των φυσικών αποθεμάτων καθώς και στην επιβάρυνση (κοστολογική + περιβαλλοντική) από τη μεταφορά των επιπλέον αδρανών.



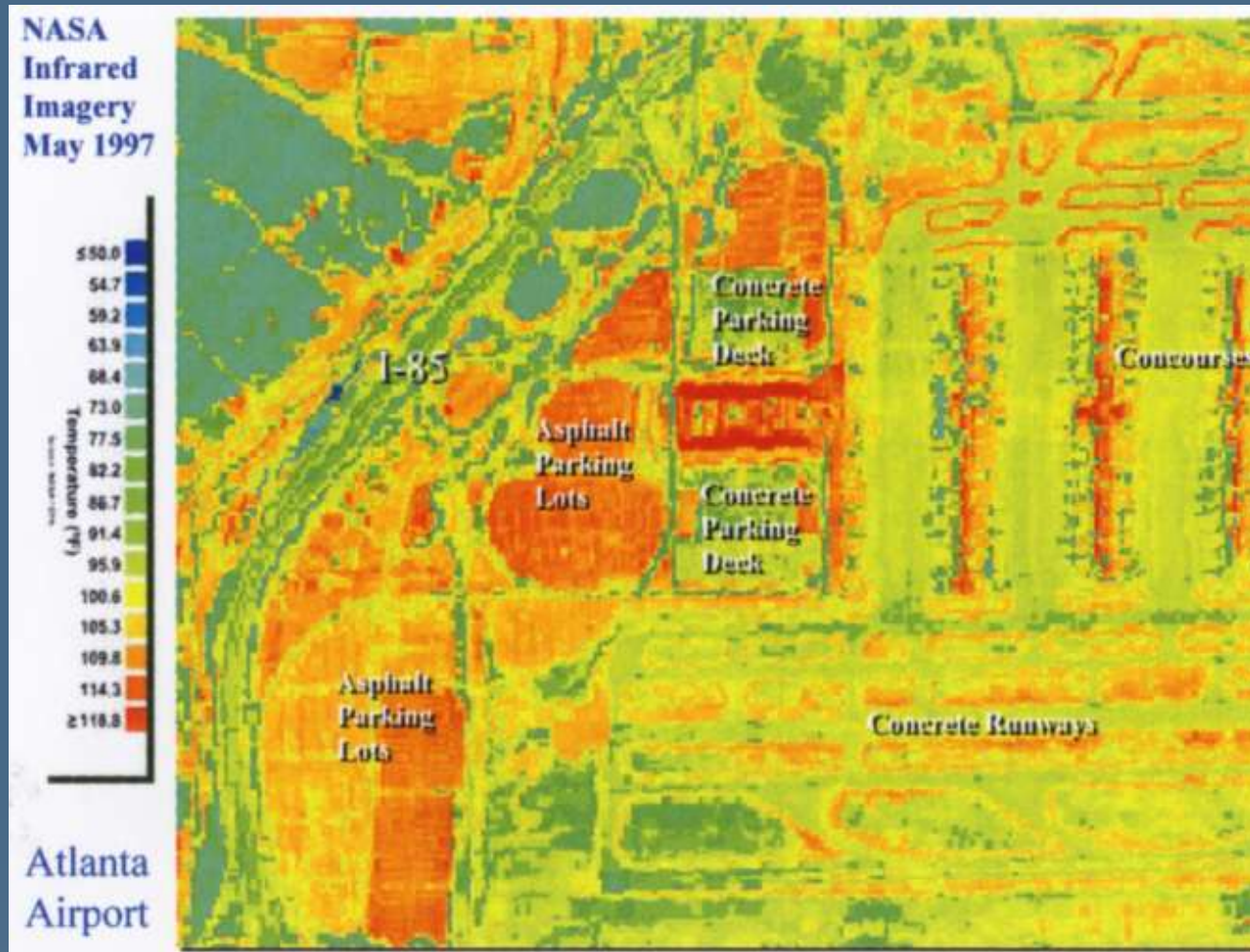
- Τα οδοστρώματα από σκυρ/μα έχουν μεγαλύτερη ανακλασιμότητα του φωτός και απαιτείται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας φωτισμού στις σκοτεινές ώρες του 24ώρου, ενώ στις ώρες ηλιοφάνειας ανακλάται το φως πίσω στην ατμόσφαιρα.
- Τα οδοστρώματα ασφάλτου ανακλούν λιγότερο φως και απορροφούν περισσότερο, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας την οποία αποδίδουν στην ατμόσφαιρα, συντελώντας έτσι στη δημιουργία θερμών νησίδων και του φαινομένου σχηματισμού νέφους (smog).
- Επίσης χρειάζονται περισσότερο φωτισμό (λαμπτήρες) ανά μήκος δρόμου, για το ίδιο επίπεδο φωτισμού του δρόμου. Αυτό αντιστοιχεί σε αυξημένο κόστος κατά 31% εν σχέσει με οδοστρώματα από σκυρ/μα.



Concrete cuts highway lighting costs. Studies show proper lighting levels can be reached on concrete with 50% fewer fixtures than needed for dark-colored pavement. Yearly savings on electricity total up to \$720 per mile.



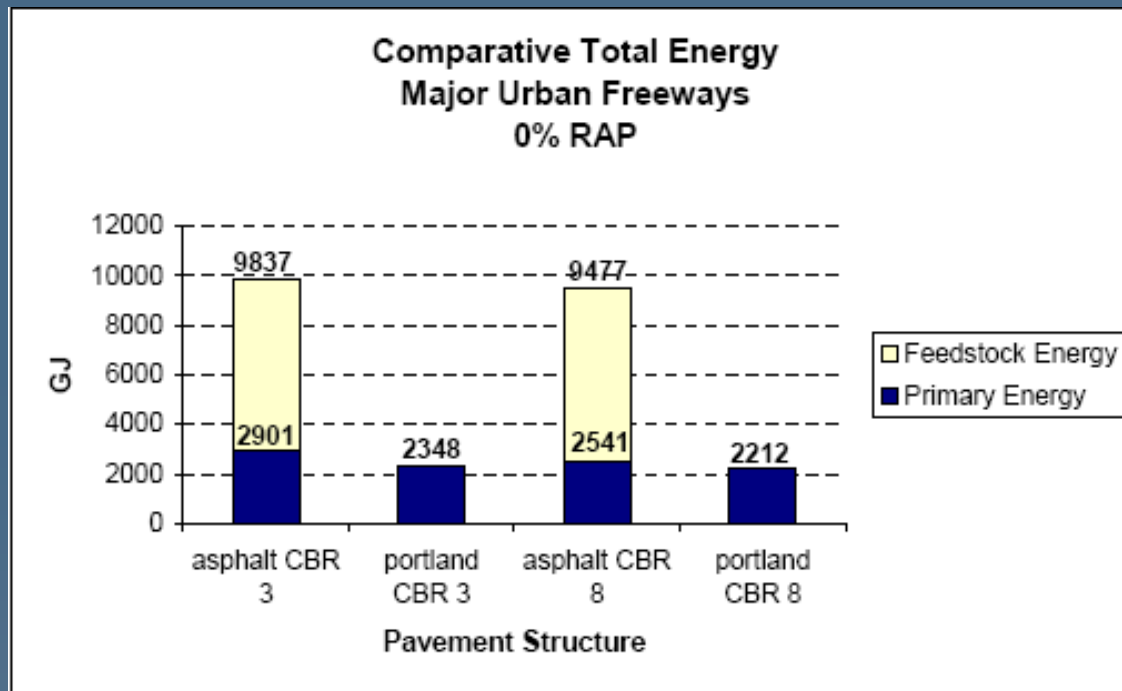
- Λόγω του φαινομένου των θερμών νησίδων των ασφαλτοστρωμένων δαπέδων, η θερμοκρασία των κέντρων των πόλεων είναι κατά 5°C υψηλότερη των περιφερειακών οικισμών και απαιτεί τους θερμούς μήνες extra ενέργεια για air-conditioning.
- Έτσι τα δάπεδα σκυρ/τος εν σχέσει με τα ασφαλτοδοστρώματα θεωρούνται ψυχρές επιφάνειες που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας για ψύξη κατά \$ 5 δισεκ. το χρόνο στις Η.Π.Α. [Akbari, 2005]



Υπέρυθρη φωτογραφία της NASA από το Atlanta Hartsfield Airport



- Η Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών του Καναδά με το Ινστιτούτο Athena Sustainable Materials, ερεύνησαν το ενεργειακό profile των εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και τις εκπομπές ρυπαντών για 40 χρόνια ζωής, συγκρίνοντας 12 αντίστοιχα οδοστρώματα διαφόρων κατηγοριών.



Σύγκριση συνολικής εμπεριεχόμενης ενέργειας μεταξύ οδοστρωμάτων σκυρ/τος και ασφάλτου



- Είναι φανερό ότι τα ασφαλτοδοστρώματα των περιφερειακών δρόμων είναι επιβαρυμένα με 30,2% επιπλέον ενέργεια.
- Συμπερασματικά τα οδοστρώματα από σκυρ/μα είναι η ορθολογικότερη επιλογή με περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια. Λόγω του μεγάλου χρόνου ωφέλιμης ζωής και της οικονομίας που προκύπτει, πλεονεκτούν σημαντικά των ασφαλτικών και είναι το βέλτιστο για οδοστρώματα υλικό που συμβάλλει στη διατήρηση αειφορίας στην ανάπτυξη ενός τόπου.



The “green” material της κατασκευής οδοστρωμάτων