



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AGGREGATE BASE LAYER ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF ASPHALT PAVEMENTS USING A MECHANISTIC-EMPIRICAL APPROACH

Bui Tuan Anh ^{*}, Nguyen Quang Phuc, Pham Minh Phuc

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 08/07/2025

Revised: 25/09/2025

Accepted: 11/10/2025

Published online: 15/10/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.8.5>

^{*} *Corresponding author*

Email: tuananh.bui@utc.edu.vn; Tel: +84904127393

Abstract. Currently, asphalt pavement design in Vietnam largely relies on empirical standards, with limited analysis of the aggregate base layer's performance impact. This study investigates the role of the crushed stone base (CSB) in asphalt pavement structures using a mechanistic-empirical approach via the AASHTOWare Pavement ME Design software. By analyzing a wide range of pavement configurations with varying CSB thicknesses, subgrade modulus, and base modulus, the study evaluates their influence on performance indicators such as rutting (RD-T), surface roughness (IRI), bottom-up cracking (FC-BU), top-down cracking (FC-TD), and surface layer rutting (RD-AC). Results show that increasing CSB thickness yields optimal benefits at 300–400 mm, beyond which the effect diminishes. Subgrade modulus significantly impacts IRI and RD-T, while base modulus has a strong influence on FC-BU. The study demonstrates that applying a mechanistic-empirical framework can enhance pavement structure optimization and material efficiency, especially under Vietnamese conditions.

Keywords: Asphalt pavement, aggregate base layer, mechanistic-empirical method, pavement performance, resilient modulus, fatigue cracking, rutting.

@2025 University of Transport and Communications



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA LỚP CẤP PHỐI ĐÁ DẦM ĐẾN ĐẶC TRƯNG KHAI THÁC CỦA KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG BÊ TÔNG NHỰA BẰNG PHƯƠNG PHÁP CƠ HỌC THỰC NGHIỆM

Bùi Tuấn Anh*, Nguyễn Quang Phúc, Phạm Minh Phúc

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 08/07/2025

Ngày nhận bài sửa: 25/09/2025

Ngày chấp nhận đăng: 11/10/2025

Ngày xuất bản Online: 15/10/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.8.5>

* Tác giả liên hệ

Email: tuananh.bui@utc.edu.vn; Tel: 0904127393

Tóm tắt. Hiện nay, việc thiết kế kết cấu mặt đường bê tông nhựa tại Việt Nam chủ yếu vẫn dựa trên tiêu chuẩn kinh nghiệm và ít xem xét sâu đến ảnh hưởng của lớp móng cấp phối đá dăm (CPDD) trong điều kiện khai thác thực tế. Nghiên cứu này nhằm đánh giá vai trò của lớp CPDD trong kết cấu mặt đường bê tông nhựa bằng cách áp dụng phương pháp cơ học – thực nghiệm với phần mềm AASHTOWare Pavement ME Design. Thông qua việc khảo sát hàng loạt tổ hợp kết cấu với các biến số như chiều dày lớp CPDD, mô đun đàn hồi nền và lớp CPDD, nhóm tác giả đã phân tích tương quan giữa các yếu tố này với các chỉ tiêu khai thác như: hằn lún (RD-T), gồ ghề mặt đường (IRI), nứt mỗi đáy lên (FC-BU), nứt mỗi mặt xuống (FC-TD), và lún trong lớp mặt (RD-AC). Kết quả cho thấy hiệu quả của việc tăng chiều dày CPDD đạt tối ưu ở mức 300–400 mm, sau đó giảm dần. Mô đun đàn hồi nền đất có ảnh hưởng mạnh đến IRI và RD-T, trong khi mô đun lớp CPDD ảnh hưởng đến FC-BU. Nghiên cứu chứng minh rằng mô hình cơ học – thực nghiệm có thể hỗ trợ hiệu quả trong việc tối ưu cấu trúc áo đường và tiết kiệm vật liệu, đặc biệt trong điều kiện Việt Nam.

Từ khóa: mặt đường bê tông nhựa, lớp cấp phối đá dăm, phương pháp cơ học – thực nghiệm, đặc trưng khai thác mặt đường, mô đun đàn hồi, nứt mỗi, hằn lún.

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu mặt đường bê tông nhựa cấp cao tại Việt Nam thường được cấu tạo gồm 2 lớp mặt bê tông nhựa (chưa bao gồm lớp phủ tạo nhám hoặc có chức năng đặc biệt phía trên), có hoặc không có 1 hoặc 2 lớp móng gia cố bên trên và một lớp móng là vật liệu rời rạc bằng cấp phối đá dăm (CPDD). Với hiện trạng lưu lượng giao thông ngày càng lớn trên các tuyến đường thì kết cấu mặt đường bê tông nhựa tương ứng ngày càng được lựa chọn với số lớp nhiều hơn hoặc chiều dày các lớp lớn hơn. Ở Việt Nam, tiêu chuẩn thiết kế áp dụng cho kết cấu này ở các dự án thường chọn là TCCS 38 [1] (trước đây là 22TCN 211-06). Tại tiêu chuẩn này cấu tạo của tầng móng trên kết cấu áo đường được quy định phụ thuộc vào lượng giao thông. Đường có lượng giao thông nặng trở lên được yêu cầu sử dụng các lớp vật liệu gia cố chất dính kết hữu cơ, hỗn hợp gia cố nhựa và/hoặc gia cố chất dính kết vô cơ, hỗn hợp gia cố xi măng. Các đường có lượng giao thông nặng tổng chiều dày tối thiểu là 20 cm cho các lớp vật liệu có sử dụng chất dính kết (bao gồm cả tầng mặt và lớp móng trên gia cố), tương ứng là 25cm cho đường có lượng giao thông rất nặng và 30 cm cho đường có lượng giao thông đặc biệt nặng, đường có lượng giao thông trung bình trở xuống có thể là vật liệu hạt không gia cố. Lớp móng dưới có thể là vật liệu không gia cố hoặc gia cố chất liên kết vô cơ và được lựa chọn tùy thuộc điều kiện đất nền, chế độ thủy nhiệt của nền đường, điều kiện vật liệu địa phương hay đảm bảo dễ dàng trong thi công. Mặc dù nhìn vào quy định trên chúng ta thấy rất chi tiết, đã phân chia thành nhiều trường hợp tương ứng với tải trọng, tuy nhiên việc lựa chọn cấu tạo cho kết cấu áo đường thực tế vẫn còn nhiều vấn đề không thống nhất. Để làm rõ vấn đề này chúng ta xét hai kết cấu tại Bảng 1.

Bảng 1. Kết cấu áo đường tính toán theo TCCS 38 [1].

Kết cấu 1				Kết cấu 2		
TT	Lớp vật liệu	Chiều dày		TT	Lớp vật liệu	Chiều dày
1	BTN chặt C16	5 cm		1	BTN chặt C16	5 cm
2	BTN chặt C19	7 cm		2	BTN chặt C19	7 cm
3	ATB	10 cm		3	Cấp phối đá dăm loại I	55 cm
4	Cấp phối đá dăm loại I	36 cm				

Hai trường hợp kết cấu áo đường được đề xuất ở ví dụ trên đều đạt yêu cầu khi kiểm toán theo các trạng thái giới hạn được quy định tại TCCS 38 [1]; do đó rất nhiều dự án đường ô tô hiện nay lớp móng cấp phối đá dăm trong kết cấu mặt đường thông thường được chọn với chiều dày tối đa nhằm mục tiêu giảm thiểu chiều dày các lớp mặt bê tông nhựa hay có thể nói có xu hướng chọn chiều dày tối thiểu cho các lớp này. Từ vấn đề đã nêu ở trên, việc lựa chọn chiều dày các lớp móng cấp phối đá dăm cần phải có góc nhìn khác để bổ trợ cho tiêu chuẩn hiện hành nhằm tối ưu hóa thiết kế kết cấu mặt đường bê tông nhựa.

2. 2.MỘT SỐ NGHIÊN CỨU VÀ CƠ SỞ LÝ THUYẾT LIÊN QUAN

Theo báo cáo của W. R. Barker and W. N. Brabston tại [2], lớp cấp phối đá dăm rất nhạy cảm với độ ẩm; kết quả khảo sát mô đun đàn hồi tương ứng với độ ẩm khác nhau cho thấy khi tăng độ ẩm từ 17,8% lên 30,6% cho thấy mô đun giảm từ ~13.000 xuống khoảng ~1.200 psi. Do đó trong môi trường ẩm ướt, lớp CPDD dễ bị mất hiệu quả chịu lực nếu không có hệ thống thoát nước tốt hoặc không được gia cố. Đặc biệt tại [2] cũng cho thấy phải chú ý khi dùng CPDD trên lớp không thấm nước để tránh hiện tượng “bẫy nước” vì nếu nước ngấm từ trên xuống và không thoát được. Khi mô đun CPDD giảm, khả năng phân tán ứng suất của lớp móng giảm dẫn đến ứng suất truyền xuống nền tăng lên đáng kể; điều này làm giảm số

chu kỳ tác dụng tải trọng cho phép. Cũng tại báo cáo [2], khi khảo sát hiệu quả của việc tăng chiều dày cho thấy: với cùng loại nền và tải trọng, khi tăng chiều dày lớp CPĐD từ 6 inch lên 10 inch, ứng suất đứng tại đỉnh nền giảm rõ rệt, tuy nhiên, tăng tiếp từ 10 inch lên 12–14 (inch) thì mức giảm ứng suất đỉnh nền rất nhỏ hay hiệu quả tăng thêm là rất hạn chế. Do đó khi tăng chiều dày lớp móng cấp phối đá dăm vượt quá một giới hạn nhất định chỉ mang lại hiệu quả giảm ứng suất nền rất nhỏ. Điều này dẫn đến việc sử dụng lớp móng cấp phối đá dăm quá dày sẽ không có hiệu quả cao khi xét cả đến yếu tố về chi phí xây dựng.

Nghiên cứu của M. M. Rahman và các cộng sự [3] cho thấy mô đun của vật liệu móng giảm mạnh khi độ ẩm vượt mức tối ưu, dẫn đến gia tăng hằn lún và nứt mặt đường; qua đó cho thấy độ ẩm và mô đun đàn hồi của lớp CPĐD ảnh hưởng đáng kể đến tuổi thọ và hiệu suất khai thác của kết cấu mặt đường bê tông nhựa. Và để đánh giá ảnh hưởng của lớp móng đến các chỉ tiêu khai thác, nghiên cứu về mô hình hóa tại Trung tâm NCAT (Auburn University) của D. H. Timm và A. L. Priest [4] đã chứng minh hiệu quả rõ rệt của việc sử dụng dữ liệu thực nghiệm kết hợp phần mềm Pavement ME Design.

Phương pháp cơ học – thực nghiệm đã và đang được áp dụng tại nhiều quốc gia để thay thế phương pháp thiết kế kinh nghiệm cổ điển, trong tài liệu [5] đã xác định rõ các cơ sở lý thuyết và mô hình tính toán ứng dụng trong Pavement ME Design. Tại Việt Nam, Đề tài Bộ GTVT năm 2017 [6] là một trong những nghiên cứu đầu tiên đề xuất ứng dụng phương pháp này trong điều kiện nội địa. Đồng thời, nghiên cứu gần đây của Austroads (2025) [7] cũng đưa ra khuyến nghị rõ ràng về cấu hình tối ưu lớp móng cho các tuyến đường có tải trọng lớn.

Các báo cáo gần đây từ J. Metcalf [8] và N. Tran [9] nhấn mạnh rằng nếu không xác định rõ tương quan giữa chiều dày, mô đun và các chỉ tiêu khai thác thì việc tăng cấu tạo lớp móng sẽ không mang lại hiệu quả tương xứng với chi phí. Do đó, thiết kế kết cấu cần dựa vào các phân tích định lượng cụ thể thay vì kinh nghiệm đơn thuần.

Như vậy, từ tổng quan tài liệu và lý thuyết hiện có, việc sử dụng phần mềm Pavement ME Design để đánh giá ảnh hưởng của lớp CPĐD trong thiết kế mặt đường bê tông nhựa là có cơ sở khoa học rõ ràng và phù hợp với xu thế hiện đại.

3. PHÂN TÍCH LỚP MÓNG CẤP PHỐI ĐÁ DĂM THEO CƠ HỌC THỰC NGHIỆM

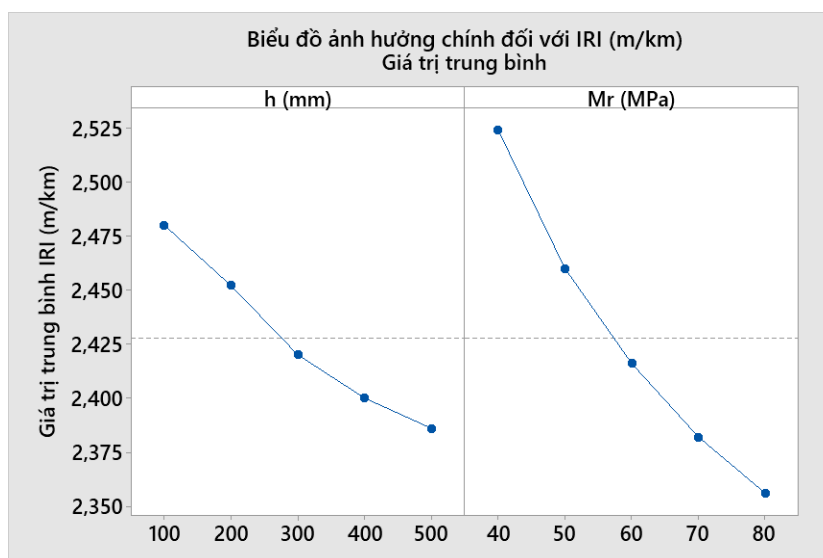
Phương pháp cơ học – thực nghiệm là phương pháp phối hợp các phương trình theo lý thuyết đàn hồi, phương trình theo lý thuyết nhiệt và các phương trình thu được từ các mối quan hệ thực nghiệm và kinh nghiệm. Tính toán mặt đường theo phương pháp này hiện tại sử dụng phần mềm AASHTOWare® (AASHTOWare Pavement ME Design); với các thông số thiết kế về lưu lượng giao thông, khí hậu, thông số về vật liệu các lớp và nền đất, phần mềm sẽ xác định được các thông số liên quan đến đặc trưng khai thác của mặt đường như chiều sâu hằn lún vệt bánh xe, nứt do mỏi, độ gồ ghề (IRI). Bằng việc đưa ra nhiều kết cấu với chiều dày lớp móng cấp phối đá dăm, chiều dày lớp mặt và kết cấu nền đất khác nhau, thông qua các kết quả của phần mềm tính toán cho các trường hợp kết cấu áo đường đưa ra được các đánh giá về ảnh hưởng của lớp cấp phối đá dăm đến đặc trưng khai thác của mặt đường.

Nghiên cứu này sử dụng phần mềm AASHTOWare® phiên bản 1.3.28 [10] để phân tích. Thông số khí hậu được lấy từ trạm MERRA2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) số hiệu ID_122570 Hà Nội; các số liệu về khí hậu để phân tích bao gồm nhiệt độ không khí, lượng mưa, vận tốc gió, độ ẩm ... Các thông số về tải trọng bao gồm lưu lượng xe, tỷ lệ từng loại xe tương ứng, các loại trục xe, hệ số phân bố tải trọng trục, các hệ số điều chỉnh cho thông số tải trọng... Tỷ lệ các loại xe trong dòng xe được lấy tương tự như tỷ lệ phân bố trên các tuyến Quốc lộ chính của Việt Nam thể hiện tại Bảng 2.

Bảng 2. Tỷ lệ phân bố trên các tuyến Quốc lộ chính của Việt Nam [6].

Nhóm xe	Loại xe	Tỷ lệ (%)
Nhóm 5	Xe 2 trục (xe tải đơn)	73,85
Nhóm 6	Xe 2 trục (xe tải đơn và rơ moóc)	14,25
Nhóm 7	Xe 3 trục (xe tải đơn)	1,93
Nhóm 9	Xe 2 trục, đơn, và 2 trục đôi (rơ moóc)	8,58
Nhóm 10	Xe 3 trục đôi (rơ moóc)	1,39
Tổng		100,00

Lưu lượng xe sử dụng trong phân tích là 5500 xe/ngày đêm với mặt cắt ngang 2 chiều xe chạy mỗi chiều 2 làn xe, tăng trưởng xe được xác định theo hàm số mũ với hệ số tăng trưởng hàng năm là 3%. Tập số liệu kết cấu áo đường được đưa vào tính toán khảo sát như sau: lớp mặt bao gồm bê tông nhựa polyme BTNP16 PMB3 dày 4,0cm và bê tông nhựa thường BTNC19 dày 7,0cm; lớp móng trên hỗn hợp cấp phối đá chặt gia cố nhựa nóng ĐNC25 (ATB) chiều dày thay đổi từ 7,0-120(cm) với bước thay đổi 1,0cm; lớp móng dưới cấp phối đá dăm chiều dày thay đổi từ 10,0-50,0 (cm) với bước thay đổi 10,0cm, mô đun lớp thay đổi từ 150-350 (MPa) với bước thay đổi 100 MPa; nền đất có thông số mô đun thay đổi từ 40-80 (MPa) với bước thay đổi 10MPa. Từ tập số liệu đầu vào này, sử dụng phần mềm AASHTOWare® sẽ cho ra kết quả các chỉ tiêu khai thác tương ứng. Với kết quả thu được, sử dụng phần mềm Minitab18 để phân tích các tương quan giữa các thông số kết cấu và các chỉ tiêu khai thác.



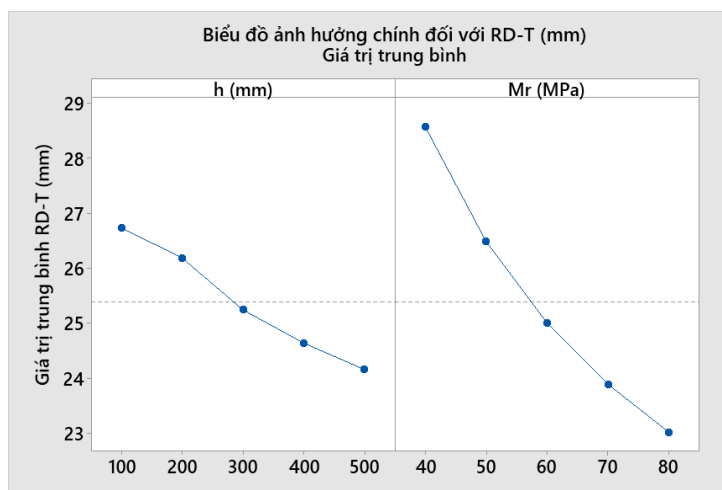
Hình 1. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun nền với IRI.

3.1. Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối đá dăm, mô đun nền và chỉ tiêu khai thác

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối đá dăm, mô đun nền với IRI được thể hiện tại Hình 1. Tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm h từ 100 → 500 mm, IRI giảm từ khoảng 2,48 → 2,385 m/km (giảm tổng $\approx 0,095$ m/km). Khi tăng Mr từ 40 → 80 MPa, IRI giảm từ khoảng 2,525 → 2,355 m/km (giảm tổng $\approx 0,17$ m/km), IRI

giảm rõ ràng với xu hướng tuyến tính. Trong khoảng khảo sát, khoảng giảm IRI do M_r ($\approx 0,17$) lớn hơn h ($\approx 0,095$), nghĩa là cải thiện tính chất cơ lý nền (tăng M_r) mang lại hiệu quả mạnh hơn so với tăng độ dày lớp đá dăm. Trong thiết kế cân đối ưu tiên gia cố nền (tăng M_r), sau đó mới tính đến tăng độ dày lớp đá dăm.

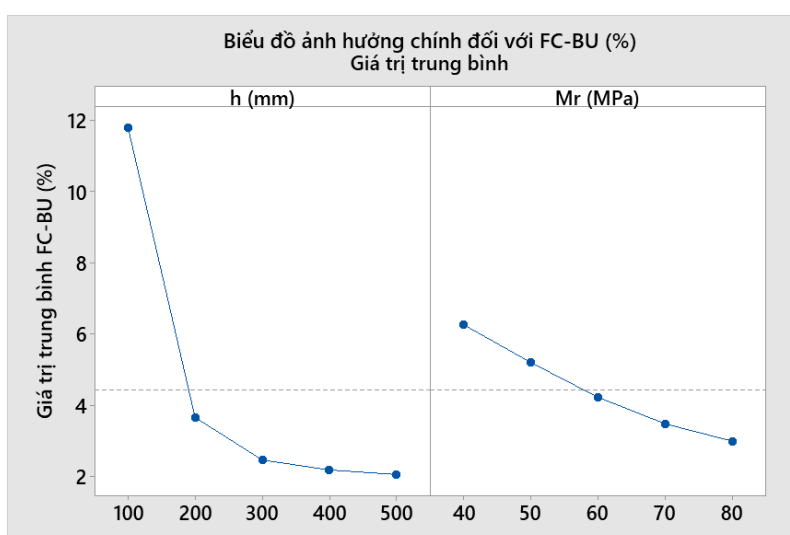
Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối đá dăm, mô đun nền với tổng chiều sâu hằn lún vết bánh xe (RD-T) được thể hiện tại Hình 2.



Hình 2. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun nền với IRI và tổng chiều sâu hằn lún vết bánh xe (RD-T).

Với hình 2, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm h từ 100 $\rightarrow$ 500 mm, RD-T giảm từ khoảng 26,7 $\rightarrow$ 24,2 mm (giảm $\approx 2,5$ mm). Khi tăng M_r từ 40 $\rightarrow$ 80 MPa, RD-T giảm từ khoảng 28,6 $\rightarrow$ 23,0 mm (giảm $\approx 5,6$ mm). Trong khoảng khảo sát, khoảng giảm RD-T do M_r gấp đôi h (5,6 mm vs. 2,5 mm). Từ đây cũng cho thấy ưu tiên gia cố nền (tăng M_r) trước rồi mới tăng tăng độ dày lớp đá dăm để tối ưu chi phí.

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối, mô đun nền với tỷ lệ nứt mỗi phát sinh từ đáy lớp mặt lên bề mặt FC-BU được thể hiện tại Hình 3.

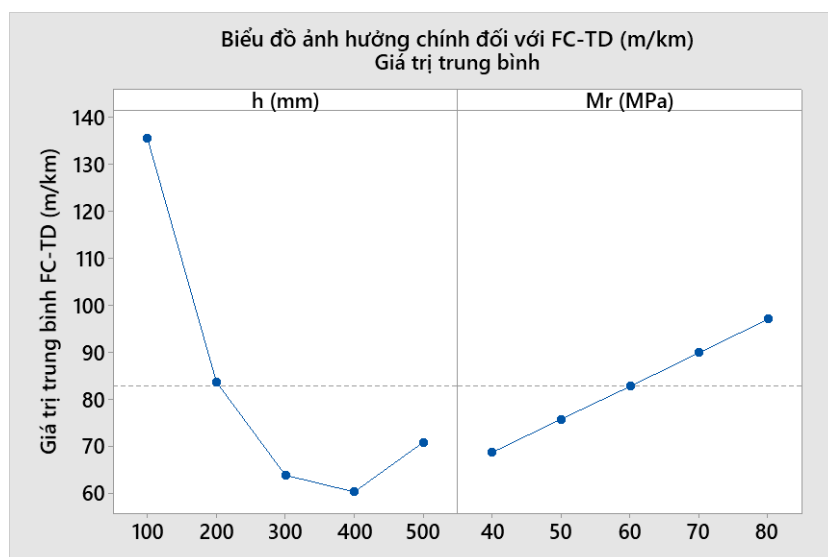


Hình 3. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun nền với tỷ lệ nứt mỗi phát

sinh từ đáy lớp mặt lên bề mặt FC-BU.

Với hình 3, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm h từ 100 → 500 mm, FC-BU giảm từ khoảng 11,8% → 2,1% (giảm $\approx 9,7\%$); khoảng giảm mạnh nhất khi h lên 200 mm (từ khoảng 11,8% xuống 3,7%), tốc độ này suy giảm (h từ 300 → 500mm chỉ giảm thêm khoảng 1,4%). Khi tăng Mr từ 40 → 80 MPa, FC-BU giảm từ khoảng 6,2% → 3,0% (giảm $\approx 3,2\%$). Trong khoảng khảo sát ảnh hưởng của h gấp khoảng 3 lần Mr về khả năng giảm FC-BU (9,7% với 3,2%). Với kết quả này nếu mục tiêu là giảm nứt dưới lớp mặt thì ưu tiên tăng độ dày lớp đá dăm trước, tuy nhiên nên cân nhắc ở chiều dày tối đa 400mm.

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối, mô đun nền với nứt mỗi phát sinh từ bề mặt xuống FC-TD được thể hiện tại Hình 4.

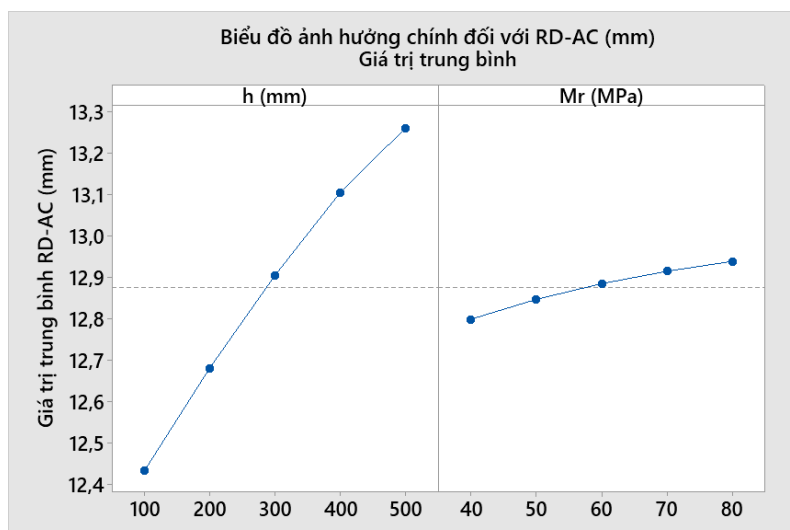


Hình 4. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun nền với nứt mỗi phát sinh từ bề mặt xuống FC-TD.

Với hình 4, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm từ 100 → 400 mm, FC-TD giảm rất mạnh từ khoảng 135 m/km xuống 60 m/km (giảm ≈ 75 m/km); tại $h=400$ mm đạt giá trị thấp nhất, khi tiếp tục tăng lên 500 mm thì FC-TD lại tăng lên khoảng 71 m/km. Khi Mr tăng từ 40 → 80 MPa, FC-TD tăng từ khoảng 69 m/km lên 97 m/km (tăng ≈ 28 m/km). Với kết quả này nếu mục tiêu là giảm nứt mỗi phát sinh từ bề mặt thì chiều dày cấp phối đá dăm 400 mm là tối ưu.

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối, mô đun nền với chiều sâu lún phát sinh trong lớp mặt bên tông nhựa RD-AC được thể hiện tại Hình 5

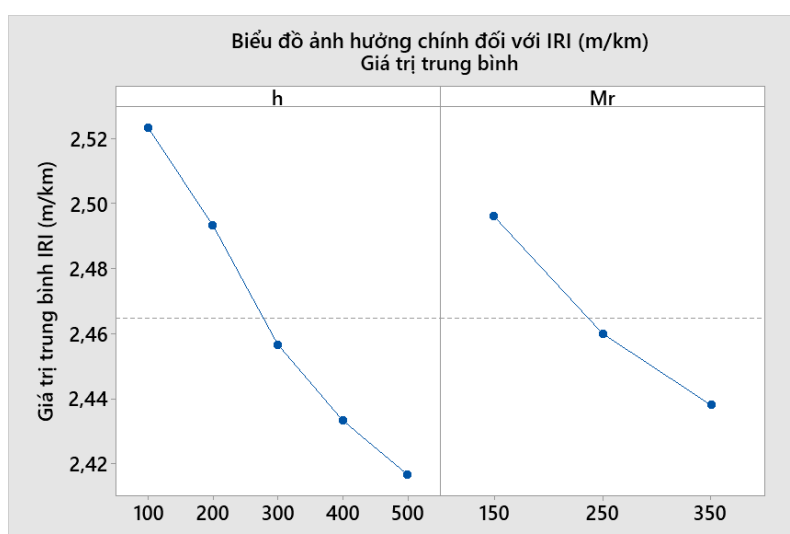
Với hình 5, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm h từ 100 → 500 mm, RD-AC tăng từ khoảng 12,43 → 13,25 mm (tăng $\Delta \approx 0,82$ mm). Khi tăng Mr từ 40 → 80 MPa, RD-AC tăng từ khoảng 12,80 → 12,94 mm (tăng $\approx 0,14$ mm). Trong khoảng khảo sát ảnh hưởng của h gấp khoảng 6 lần Mr về RD-AC (0,82 mm với 0,14 mm). Với kết quả này nếu mục tiêu là hạn chế RD-AC cần quan tâm đến lựa chọn h vừa đủ, không quá còn mô đun nền không ảnh hưởng nhiều.



Hình 5. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun nền với chiều sâu lún phát sinh trong lớp mặt bên tông nhựa RD-AC.

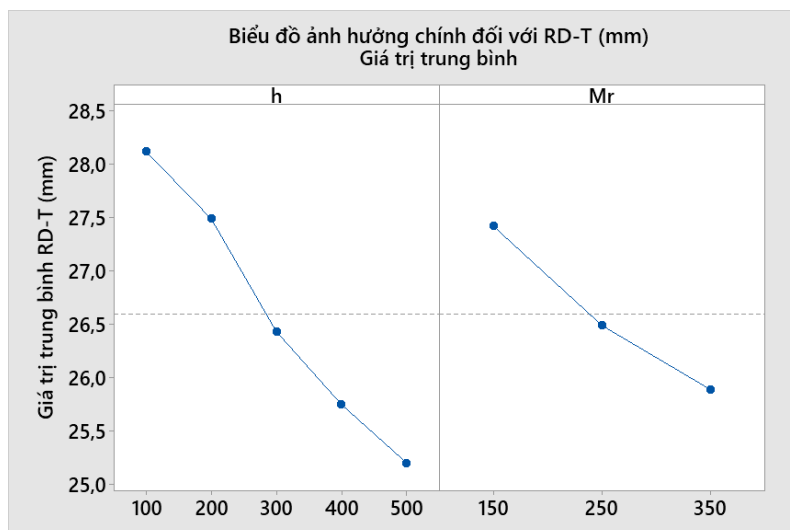
3.2. Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối đá dăm, mô đun lớp cấp phối đá dăm và chỉ tiêu khai thác

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối đá dăm, mô đun lớp cấp phối đá dăm với IRI và tổng chiều sâu hằn lún vết bánh xe (RD-T) được thể hiện tại Hình 6. Tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm h từ 100 $\rightarrow$ 500 mm, IRI giảm từ khoảng 2,523 $\rightarrow$ 2,417 m/km (giảm tổng $\approx 0,106$ m/km). Khi tăng Mr từ 150 $\rightarrow$ 350 MPa, IRI giảm từ khoảng 2,495 $\rightarrow$ 2,438 m/km (giảm tổng $\approx 0,057$ m/km). Trong khoảng khảo sát, khoảng giảm IRI do h ($\approx 0,106$) lớn hơn Mr ($\approx 0,057$), nghĩa là tăng chiều dày lớp móng cấp phối đá dăm mang lại hiệu quả mạnh hơn so với tăng mô đun lớp cấp phối đá dăm. Trong thiết kế cân đối ưu tiên tăng độ dày lớp đá dăm, sau đó mới tính đến tăng mô đun lớp cấp phối đá dăm.



Hình 6. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun lớp cấp phối đá dăm với IRI.

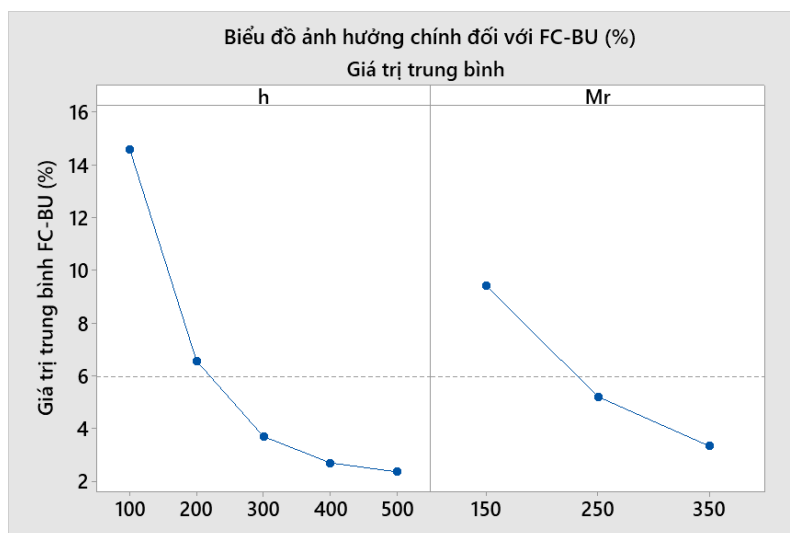
Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối đá dăm, mô đun lớp cấp phối đá dăm với IRI và tổng chiều sâu hằn lún vết bánh xe (RD-T) được thể hiện tại Hình 7.



Hình 7. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun lớp cấp phối đá dăm với tổng chiều sâu hằn lún vết bánh xe (RD-T).

Với hình 7, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm h từ 100 → 500 mm, RD-T giảm từ khoảng 28,1 → 25,2 mm (giảm $\approx 2,9$ mm). Khi tăng Mr từ 150 → 350 MPa, RD-T giảm từ khoảng 27,4 → 25,9 mm (giảm $\approx 1,5$ mm). Trong khoảng khảo sát, khoảng giảm RD-T do h lớn hơn so với Mr (2,9 mm với 1,5 mm). Từ đây cũng cho thấy ưu tiên tăng độ dày lớp đá dăm, sau đó mới tính đến tăng mô đun lớp cấp phối đá dăm.

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối, mô đun lớp cấp phối đá dăm với tỷ lệ nứt mỗi phát sinh từ đáy lớp mặt lên bề mặt FC-BU được thể hiện tại Hình 8.

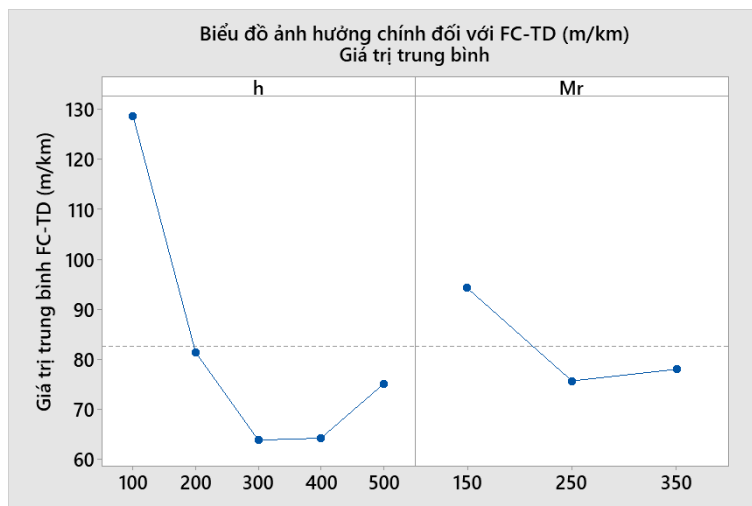


Hình 8. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun lớp cấp phối đá dăm với tỷ lệ nứt mỗi phát sinh từ đáy lớp mặt lên bề mặt FC-BU.

Với hình 8, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm h từ 100 → 500 mm, FC-BU giảm từ khoảng 14,6 % → 2,4 % (giảm $\approx 12,2$ %); khoảng giảm mạnh nhất khi h lên 200 mm (từ khoảng 14,6% xuống 6,5%), tốc độ này suy giảm (h từ 300 → 500mm chỉ giảm thêm khoảng 1,3%). Khi tăng Mr từ 150 → 350 MPa, FC-BU giảm từ khoảng 9,4 % → 3,3 % (giảm $\approx 6,1$ %). Trong khoảng khảo sát ảnh hưởng của h gấp khoảng 2 lần Mr về khả

năng giảm FC-BU (12,2% với 6,1%). Với kết quả này nếu mục tiêu là giảm nứt dưới lớp mặt thì ưu tiên tăng độ dày lớp đá dăm trước, tuy nhiên nên cân nhắc ở chiều dày tối đa 400mm.

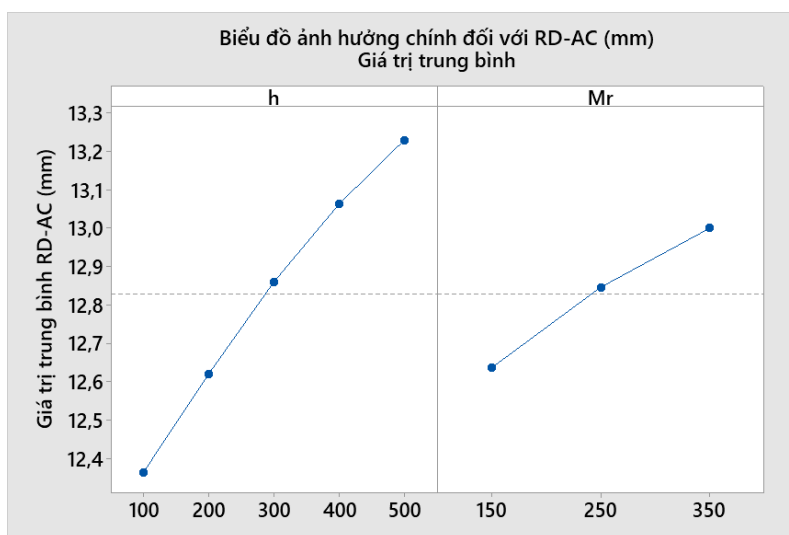
Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối đá dăm, mô đun lớp cấp phối đá dăm với nứt mỗi phát sinh từ bề mặt xuống FC-TD được thể hiện tại Hình 9.



Hình 9. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun lớp cấp phối đá dăm với nứt mỗi phát sinh từ bề mặt xuống FC-TD.

Với hình 9, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm từ 100 → 300 mm, FC-TD giảm rất mạnh từ khoảng 129 m/km xuống 64 m/km (giảm ≈ 65 m/km); tại $h=300-400$ mm đạt giá trị thấp nhất, khi tiếp tục tăng lên 500 mm thì FC-TD lại tăng lên khoảng 75 m/km. Khi Mr tăng từ 150 → 250 MPa, FC-TD giảm từ khoảng 94 m/km xuống 75 m/km (giảm ≈ 19 m/km); Mr tăng tiếp lên 350 MPa, FC-TD lại tăng lên ≈ 78 m/km. Với kết quả này nếu mục tiêu là giảm nứt mỗi phát sinh từ bề mặt thì chiều dày cấp phối đá dăm 300-400 mm là tối ưu, mô đun lớp cấp phối đá dăm khoảng 250MPa là tối ưu.

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối, mô đun lớp cấp phối đá dăm với chiều sâu lún phát sinh trong lớp mặt bên tông nhựa RD-AC được thể hiện tại Hình 10.



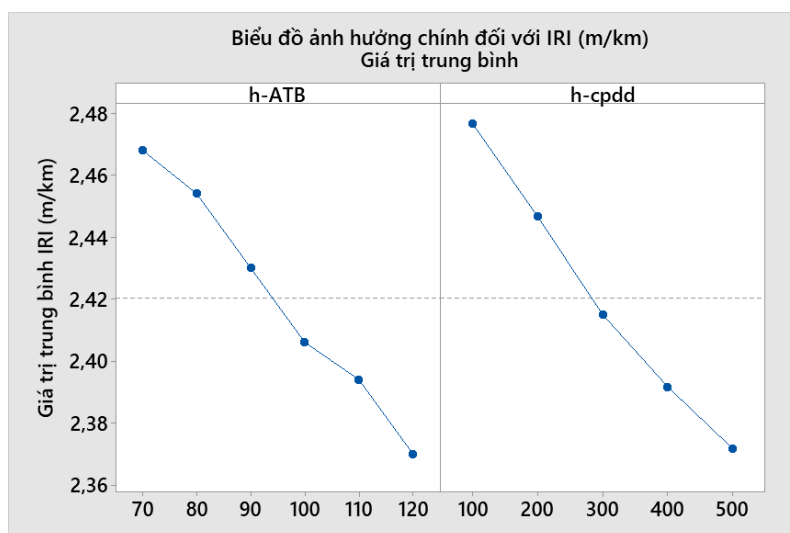
Hình 10. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – mô đun lớp cấp phối đá dăm với

chiều sâu lún phát sinh trong lớp mặt bên tông nhựa RD-AC.

Với hình 10, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm h từ 100 → 500 mm, RD-AC tăng từ khoảng 12,37 → 13,23 mm (tăng $\approx 0,86$ mm). Khi tăng M_r từ 150 → 350 MPa, RD-AC tăng từ khoảng 12,63 → 13,00 mm (tăng $\approx 0,37$ mm). Với kết quả này nếu mục tiêu là hạn chế RD-AC cần quan tâm đến lựa chọn h và mô đun lớp cấp phối đá dăm vừa đủ.

3.3. Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối, chiều dày móng ATB và chỉ tiêu khai thác

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối đá dăm, chiều dày móng ATB với IRI Hình 11. Tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày lớp cấp phối đá dăm gia cố nhựa nóng h -ATB từ 70 → 120 mm, IRI giảm từ khoảng 2,469 → 2,317 m/km (giảm tổng $\approx 0,098$ m/km). Khi tăng chiều dày cấp phối đá dăm h -cpdd từ 100 → 500 MPa, IRI giảm từ khoảng 2,476 → 2,371 m/km (giảm tổng $\approx 0,105$ m/km). Trong khoảng khảo sát, tăng chiều dày lớp ATB luôn có hiệu quả giảm IRI; tương tự tăng chiều dày lớp móng cấp phối đá dăm cũng mang lại hiệu quả giảm IRI và tốc độ giảm tăng mạnh ở 300mm đầu và bắt đầu giảm tốc độ khi tiếp tục tăng chiều dày cấp phối đá dăm.

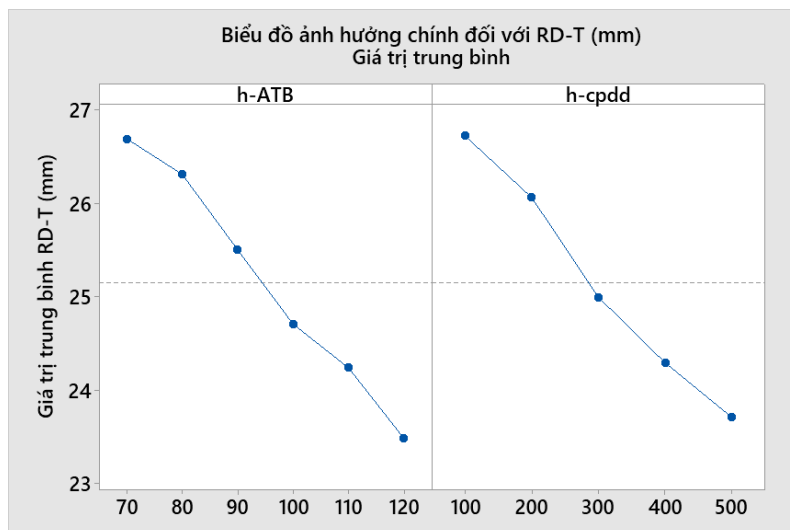


Hình 11. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – chiều dày móng ATB với IRI.

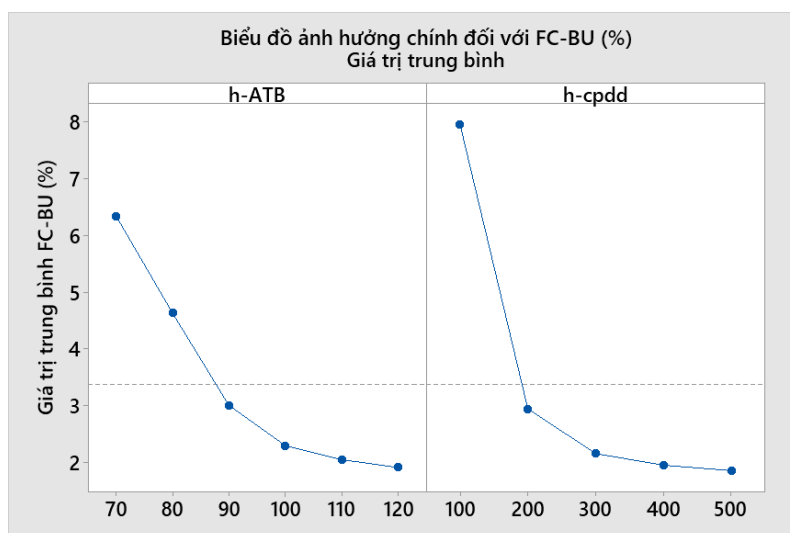
Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối đá dăm, chiều dày móng ATB với tổng chiều sâu hần lún vết bánh xe (RD-T) được thể hiện tại Hình 12.

Với hình 12, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày lớp cấp phối đá dăm gia cố nhựa nóng h -ATB từ 70 → 120 mm, RD-T giảm từ khoảng 26,7 → 23,5 mm (giảm $\approx 3,2$ mm). Khi tăng chiều dày lớp cấp phối đá dăm h -cpdd từ 100 → 500 MPa, RD-T giảm từ khoảng 26,7 → 23,7 mm (giảm $\approx 3,0$ mm). Trong khoảng khảo sát, khi tăng h -ATB có hiệu quả giảm RD-T; tương tự như thế khi tăng h -cpdd cũng có hiệu quả giảm RD-T và có hiệu quả nhất ở 300mm đầu.

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối, chiều dày móng ATB với tỷ lệ nứt mỗi phát sinh từ đáy lớp mặt lên bề mặt FC-BU được thể hiện tại Hình 13.



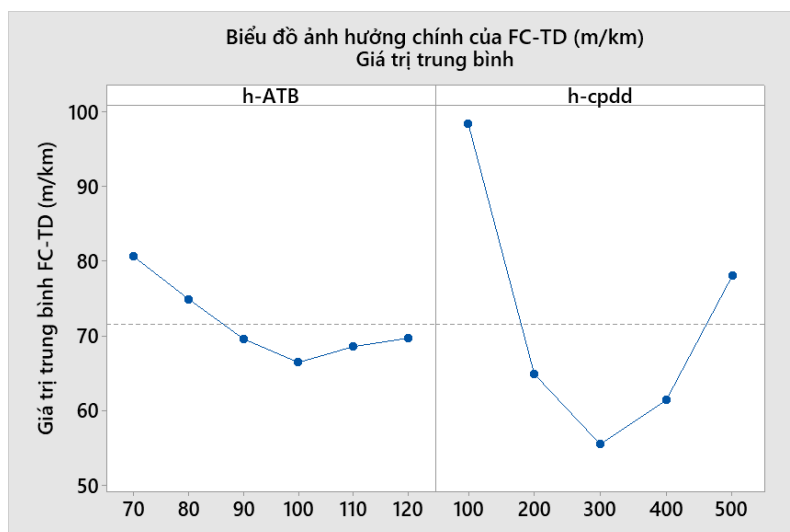
Hình 12. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – chiều dày móng ATB với tổng chiều sâu hằn lún vết bánh xe (RD-T).



Hình 13. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – chiều dày móng ATB với tỷ lệ nứt mỗi phát sinh từ đáy lớp mặt lên bề mặt FC-BU.

Với hình 13, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày lớp cấp phối đá chặt gia cố nhựa nóng h-ATB từ 70 → 120 mm, FC-BU giảm từ khoảng 6,3 % → 1,9 % (giảm ≈ 4,4 %); khoảng giảm mạnh nhất khi h-ATB lên từ 70 → 90 mm (từ khoảng 6,3% xuống 3,0%), tốc độ này suy giảm (h-ATB từ 90 → 120mm chỉ giảm thêm khoảng 1,1%). Khi tăng chiều dày lớp cấp phối đá dăm h-cpdd từ 100 → 500 MPa, FC-BU giảm từ khoảng 7,9% → 1,9 % (giảm ≈ 6,0 %); khoảng giảm mạnh nhất khi h lên từ 100 → 200 mm (từ khoảng 7,9% xuống 2,9%), tốc độ này suy giảm (h từ 200 → 500mm chỉ giảm thêm khoảng 1,0%).

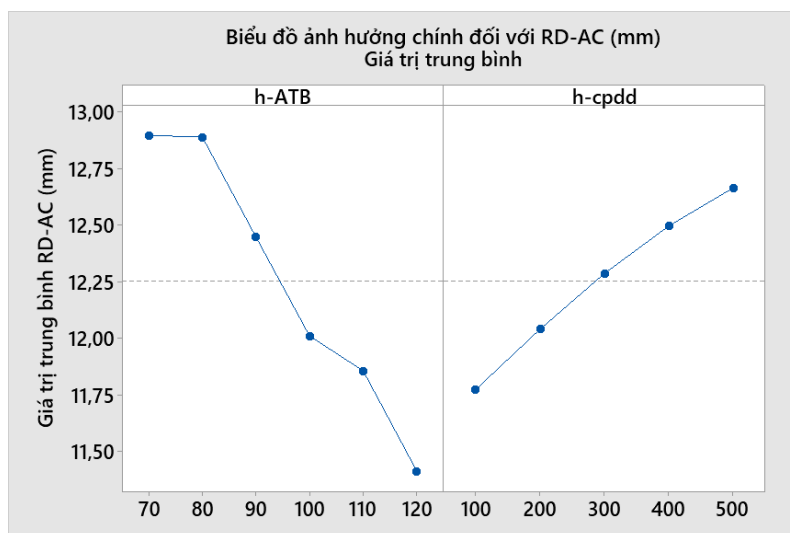
Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối, chiều dày móng ATB với nứt mỗi phát sinh từ bề mặt xuống FC-TD được thể hiện tại Hình 14.



Hình 14. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – chiều dày móng ATB với nứt mỗi phát sinh từ bề mặt xuống FC-TD.

Với hình 14, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày lớp cấp phối đá chặt gia cố nhựa nóng h-ATB từ 70 → 100 mm, FC-TD giảm rất mạnh từ khoảng 80 m/km xuống 66 m/km (giảm ≈ 14 m/km); từ 100 → 120 mm đảo chiều giá trị FC-TD lại tăng lên đến khoảng 69 m/km. Khi tăng chiều dày lớp cấp phối đá dăm h-cpdd từ 100 → 300 MPa, FC-TD giảm từ khoảng 98 m/km xuống 55 m/km (giảm ≈ 43 m/km); tăng tiếp lên 500 MPa, FC-TD lại tăng lên ≈ 78 m/km. Với kết quả này nếu mục tiêu là giảm nứt mỗi phát sinh từ bề mặt thì chiều dày cấp phối đá chặt gia cố nhựa nóng khoảng 100 mm là tối ưu, chiều dày lớp cấp phối đá dăm khoảng 300mm là tối ưu.

Kết quả phân tích tương quan giữa chiều dày móng cấp phối, chiều dày móng ATB với chiều sâu lún phát sinh trong lớp mặt bên tông nhựa RD-AC được thể hiện tại Hình 15.



Hình 15. Tương quan giữa chiều dày cấp phối đá dăm – chiều dày móng ATB với chiều sâu lún phát sinh trong lớp mặt bên tông nhựa RD-AC.

Với hình 15, tương quan này cho thấy khi tăng chiều dày lớp cấp phối đá chặt gia cố nhựa nóng h-ATB từ 70 → 120 mm, RD-AC giảm trong khoảng khảo sát, riêng khoảng 70→80mm giá trị RD-AC hầu như không thay đổi. Khi tăng chiều dày lớp cấp phối đá dăm

h-cpdd từ 100 → 500 MPa, RD-AC tăng đều mỗi 100mm tăng $\approx 0,50$ mm. Với kết quả này nếu mục tiêu là hạn chế RD-AC cần quan tâm đến lựa chọn chiều dày lớp cấp phối đá dăm vừa đủ và tăng chiều dày hay bổ sung thêm lớp cấp phối đá chặt gia cố nhựa nóng.

3.4. Nhận xét chung

- Chiều dày lớp CPDD có ảnh hưởng rõ rệt đến các chỉ tiêu khai thác như IRI, RD-T, FC-BU và FC-TD. Tuy nhiên, khi chiều dày vượt ngưỡng khoảng 300–400 mm thì hiệu quả gia tăng giảm dần, đặc biệt với FC-BU và FC-TD.
- Mô đun đàn hồi của nền đất (M_r nền) có ảnh hưởng lớn đến IRI và RD-T; nếu mục tiêu là giảm hằn lún và gồ ghề, ưu tiên đầu tư cải thiện nền sẽ mang lại hiệu quả cao hơn so với tăng chiều dày CPDD.
- Mô đun lớp CPDD cũng ảnh hưởng đáng kể đến RD-T và FC-BU, nhưng tác động nhỏ hơn so với tăng chiều dày lớp. Do đó, mô đun CPDD cần được lựa chọn hợp lý, nên tối thiểu đạt 250 MPa và đi kèm với kiểm soát độ ẩm và vật liệu.
- Chiều dày lớp ATB (cấp phối đá chặt gia cố nhựa nóng) có hiệu quả mạnh trong việc giảm IRI, RD-T, FC-BU và FC-TD, nhưng hiệu quả tối ưu đạt được ở mức 100 mm. Việc tăng quá mức không mang lại hiệu quả bổ sung tương xứng.
- Chỉ tiêu RD-AC có xu hướng tăng khi chiều dày lớp CPDD tăng, do đó cần kiểm soát chiều dày lớp CPDD trong ngưỡng hợp lý để không làm tăng nguy cơ lún trong lớp mặt.

4. KẾT LUẬN

- Cần áp dụng phương pháp cơ học – thực nghiệm trong thiết kế mặt đường để khai thác tối đa hiệu quả phân tích và dự báo, từ đó xây dựng kết cấu bền vững và tiết kiệm chi phí trong điều kiện Việt Nam.
- Trong thiết kế kết cấu mặt đường bê tông nhựa, nên ưu tiên gia cố nền đất (tăng mô đun nền) trước khi tăng chiều dày lớp CPDD nhằm đạt hiệu quả về giảm hằn lún và gồ ghề.
- Mô đun lớp CPDD nên tối thiểu đạt 250 MPa, đồng thời cần kiểm soát chặt điều kiện độ ẩm và thoát nước trong thiết kế thi công để duy trì khả năng chịu tải.
- Cần phải xem xét xác định chiều dày tối ưu cho lớp CPDD, lớp ATB khi thiết kế kết cấu nhằm đảm bảo hiệu quả chịu lực vừa tránh lãng phí vật liệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tổng Cục Đường bộ Việt Nam, TCCS 38-2022/TCĐBVN, Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế, Hà Nội, 2022.
- [2]. W. R. Barker, W. N. Brabston, Development of a Structural Design Procedure for Flexible Airport Pavements. Final Report, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory, Tech. Rep. ADA1019205, Vicksburg, 1975.
- [3]. M. M. Rahman, S. L. Gassman, K. M. Islam, Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting, Geosciences, 13 (2023) 103. <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>
- [4]. D. H. Timm, A. L. Priest, Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track, NCAT Report 06-01, Auburn University, 2006.
- [5]. AASHTO, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice, ISBN: 978-1-56051-597-5, AASHTO, Washington D.C, 2015.

- [6]. Bộ Giao thông vận tải, Nghiên cứu cơ sở khoa học để áp dụng phương pháp cơ học – thực nghiệm trong phân tích kết cấu áo đường mềm ở Việt Nam, Đề tài Bộ Giao thông vận tải, mã số DT 174055, Hà Nội, 2017.
- [7]. H. Farmer, J. Tong, O. Yang, B. Clark, M. Bushby, B. Clayton, Zero Emission Heavy Vehicles and Road Pavements: Comparing Australia and New Zealand to Europe and North America, Austroads Research Report AP-R725-25, Austroads Ltd, Sydney, Australia, 2025.
- [8]. R. Haas, S. Tighe, G. Dore, D. Hein, Mechanistic-Empirical Pavement Design: Evolution and Future Direction, 2007 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada: Transportation - An Economic Enabler, (2007). <https://trid.trb.org/View/858980>
- [9]. N. Tran, R.C. Williams, T. Scholz, Use of Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Pavement Rehabilitation Projects, Transportation Research Record, 2641 (2017) 67–76.
- [10]. AASHTOWare, Pavement ME Design Software, <https://me-design.com/MEDesign/?AspxAutoDetectCookieSupport=1>.