VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Đánh giá khả năng sử dụng chỉ số PCSI trong phân loại cấp phối và dự báo chỉ tiêu thể tích bê tông nhựa chặt ở Việt Nam

Nguyễn Xuân Độ[1,2], Trần Danh Hợi[1*], Nguyễn Quang Phúc[1]

[1] Trường Đại học Giao thông vận tải

[2] Công ty TNHH Đầu tư hạ tầng và đô thị Bắc Ninh

TỪ KHOÁ

PCSI
Bê tông nhựa chặt
Cấp phối cốt liệu
VMA
Thiết kế Marshall
Kiểm soát chất lượng

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá khả năng sử dụng chỉ số Primary Control Sieve Index (PCSI) trong phân loại cấp phối và dự báo chỉ tiêu thể tích của bê tông nhựa chặt thiết kế theo phương pháp Marshall ở Việt Nam. Cơ sở dữ liệu hồi cứu gồm 40 thiết kế không sử dụng nhựa đường cải tiến polyme SBS: 12 BTNC12,5, 9 BTNC16 và 19 BTNC19. Tất cả đều thuộc cấp phối thô theo TCVN 13567-1:2022, nhưng PCSI biến thiên từ −17,92 đến −5,04. Quy đổi ngưỡng phân loại của tiêu chuẩn sang thang PCSI cho ba giá trị khác nhau là +0,88, −1,12 và −2,36, nghĩa là cùng một nhãn cấp phối thô ứng với ba vị trí khác nhau so với đường mật độ lớn nhất. Trên tập gộp, quan hệ PCSI–VMA có hệ số tương quan $r = -0{,}369$ và $R^2 = 0{,}136$. Tuy nhiên 64,3 % tích chéo của quan hệ này đến từ khác biệt giữa các loại hỗn hợp. Sau khi bổ sung hàm lượng nhựa và loại đá vào mô hình, PCSI không còn đóng góp và tương quan riêng phần chỉ còn $r = -0{,}020$. Quan hệ mạnh của BTNC16 với $r = -0{,}798$ đảo dấu và mất ý nghĩa khi chuyển sang quy ước $D = 25$ mm và PCS = 4,75 mm. Kết quả vì vậy phụ thuộc hoàn toàn vào quy ước xác định cỡ hạt danh định. Biên dự trữ VMA so với ngưỡng của tiêu chuẩn giải thích tốt hơn cấp phối sự khác biệt về cường độ tương quan giữa BTNC12,5 và hai nhóm còn lại. PCSI phù hợp làm biến mô tả và biến chuẩn hóa. Bằng chứng hiện có chưa đủ để dùng chỉ số này dự báo VMA hoặc quy định ngưỡng nghiệm thu.

KEYWORDS

Primary control sieve index
Dense-graded asphalt
Aggregate gradation
VMA
Marshall mix design
Quality control

ABSTRACT

This study assesses the Primary Control Sieve Index (PCSI) for gradation classification and for the prediction of volumetric properties under Vietnamese Marshall mix-design practice. The retrospective database comprises 40 dense-graded mix designs that do not use SBS polymer-modified bitumen, including 12 AC12.5, 9 AC16 and 19 AC19. All of them are coarse-graded under TCVN 13567-1:2022, whereas PCSI ranges from −17.92 to −5.04. Converting the coarse and fine thresholds of the standard onto the PCSI scale yields three different limits of +0.88, −1.12 and −2.36. One categorical label therefore corresponds to three distinct positions relative to the maximum density line. In the pooled dataset the PCSI–VMA relationship gives $r = -0.369$ and $R^2 = 0.136$. However, 64.3 % of the cross product arises from differences between mixture types. After binder content and aggregate type are added to the model, PCSI contributes nothing and the partial correlation falls to $r = -0.020$. The strong AC16 relationship of $r = -0.798$ reverses sign and loses significance under the alternative convention $D = 25$ mm and PCS = 4.75 mm. The result therefore depends entirely on the nominal maximum size convention. The VMA margin above the minimum required by the standard explains the difference in correlation strength between AC12.5 and the other two groups better than gradation does. PCSI is suitable as a descriptive and normalising variable. Current evidence does not support its use for VMA prediction or for acceptance limits.

1. Đặt vấn đề

Cấp phối cốt liệu quyết định cách các hạt phân bố, tiếp xúc để hình thành khung chịu lực của hỗn hợp bê tông nhựa (BTN). Sự thay đổi cấp phối có thể làm biến đổi độ rỗng cốt liệu (VMA), độ rỗng dư (V_a), nhu cầu sử dụng nhựa đường, khả năng đầm chặt, độ thấm và nhiều chỉ tiêu hiệu năng [1]. Các lý thuyết thiết kế cấp phối hiện hành dựa trên đường mật độ lớn nhất, lý thuyết lấp đầy, phương pháp Bailey,... Không một chỉ số đơn lẻ nào phản ánh đầy đủ toàn bộ cấu trúc hạt [2-4]. Các nghiên cứu gần đây tiếp tục xác nhận rằng biến động ở vùng hạt thô, vùng hạt mịn hoặc trên toàn đường cấp phối có thể làm VMA, V_a và hiệu năng thay đổi theo những hướng khác nhau [5-8].

Trong ứng dụng phương pháp Marshall, cấp phối thường được kiểm soát bằng đường bao và lượng lọt tại từng sàng. Hàm lượng

*Liên hệ tác giả: tdhoi@utc.edu.vn
Nhận ngày 16/09/2026, sửa xong ngày 02/10/2026, chấp nhận đăng ngày 05/10/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1505

nhựa được lựa chọn để đồng thời đáp ứng V_a, VMA, VFA, độ ổn định và độ dẻo Marshall [9-13]. Cách tiếp cận này minh bạch và phù hợp với công tác nghiệm thu. Tuy nhiên thông tin cấp phối chủ yếu tồn tại dưới dạng nhiều biến sàng riêng lẻ hoặc dưới dạng nhãn phân loại thô và mịn. Mặc dù các nhãn phân loại thuận tiện cho việc đánh giá sự phù hợp với yêu cầu kỹ thuật, chúng đồng thời làm giảm mức độ phân giải của thông tin về cấp phối. Ngược lại, toàn bộ vectơ lượng lọt sàng khó đưa trực tiếp vào hồi quy hoặc biểu đồ kiểm soát khi dữ liệu chưa đủ lớn. Ở Việt Nam, các nghiên cứu gần đây tập trung vào đặc tính cơ học và khả năng kháng hằn lún của từng loại hỗn hợp cụ thể [14, 15], hoặc vào mức độ biến động của các chỉ tiêu trong sản xuất và thi công [16]. Cả hai hướng đều cho thấy nhu cầu về một biến cấp phối liên tục, tính được từ hồ sơ sẵn có, để phục vụ công tác theo dõi thống kê.

Trong phương pháp thiết kế Superpave, sàng kiểm soát chính (Primary Control Sieve, viết tắt là PCS) được quy định theo cỡ hạt danh định lớn nhất để phân biệt cấp phối thô và cấp phối mịn [17]. Leiva và West [18] đề xuất chỉ số PCSI. Chỉ số PCSI được xác định bằng chênh lệch phần trăm lọt sàng giữa đường cấp phối thực tế và đường mật độ lớn nhất (Maximum Density Line – MDL) tại sàng kiểm soát chính. Trên dữ liệu của NCAT gồm nhiều cỡ hạt danh định và bao phủ cả hai phía MDL, quan hệ bậc hai giữa PCSI và VMA đạt R^2 = 0,7336. Báo cáo này cũng ghi nhận PCSI có liên hệ với khả năng đầm chặt, độ thấm và cấu trúc nhám vĩ mô. Điểm nổi bật của PCSI là đơn giản, có dấu và có thể tính lại từ các hồ sơ thiết kế thành phần (Job Mix Formula, viết tắt là JMF) đã có.

Tuy nhiên, trước khi áp dụng PCSI cho dữ liệu thực tế, cần xem xét ba vấn đề khái niệm. Thứ nhất, trong một loại hỗn hợp cố định, giá trị lượng lọt trên MDL tại sàng PCS là hằng số. Vì vậy PCSI chỉ là lượng lọt sàng PCS được tịnh tiến điểm gốc. Chỉ số này không thể tự tạo thêm thông tin dự báo so với chính lượng lọt sàng PCS trong cùng một nhóm. Giá trị tiềm năng của nó nằm ở việc chuẩn hóa vị trí tương đối so với MDL. Thứ hai, PCSI chỉ quan sát một sàng nên không phân biệt được hai cấp phối có cùng lượng lọt tại sàng PCS nhưng khác nhau ở vùng hạt thô, vùng cát hoặc bột khoáng. Đây là một giới hạn căn bản, không thể khắc phục bằng cách tăng cỡ mẫu [3, 18]. Thứ ba, việc tính PCSI đòi hỏi một quy ước xác định cỡ hạt lớn nhất D và sàng PCS. Vấn đề này chưa được đặt ra trong các nghiên cứu trước. Bảng tra cỡ hạt danh định và sàng PCS của AASHTO M 323 [17] chỉ quy định cho các cỡ 9,5 mm, 12,5 mm, 19 mm, 25 mm và 37,5 mm. BTNC16 theo TCVN 13567-1:2022 không có cỡ tương ứng trực tiếp, nên PCSI của loại hỗn hợp này không được xác định duy nhất. Nếu quy ước thay đổi thì toàn bộ giá trị PCSI dịch chuyển có hệ thống và kết quả phân tích có thể đổi khác.

TCVN 13567-1:2022 sử dụng lượng lọt sàng 2,36 mm hoặc 4,75 mm để phân loại cấp phối thô và mịn [9]. Điều này tạo điều kiện thử nghiệm PCSI trên cơ sở dữ liệu Marshall mà không cần bổ sung phép thử mới. Khoảng trống nghiên cứu vì vậy không chỉ nằm ở việc PCSI chưa được áp dụng tại Việt Nam, mà ở câu hỏi liệu chỉ số này còn mang thông tin hữu ích khi các JMF thực tế đã được tối ưu trong phạm vi yêu cầu thể tích, chủ yếu nằm ở phía thô của MDL và bao gồm nhiều loại BTN, nguồn đá và hàm lượng nhựa khác nhau.

Nghiên cứu này tập trung trả lời năm câu hỏi: (1) PCSI bổ sung độ phân giải nào so với phân loại thô–mịn của TCVN, và các ngưỡng phân loại này tương ứng với giá trị PCSI nào; (2) quan hệ PCSI–VMA có ổn định giữa BTNC12,5, BTNC16 và BTNC19 hay không; (3) kết quả có bền vững trước các quy ước xác định D và PCS hay không; (4) PCSI có cải thiện khả năng giải thích và dự báo VMA sau khi xét đến loại hỗn hợp, hàm lượng nhựa và loại đá hay không; và (5) mức độ ứng dụng nào có thể được chấp nhận trên cơ sở bằng chứng hiện có. Đóng góp của nghiên cứu gồm ba nội dung chính. Thứ nhất, lượng hóa các ngưỡng phân loại thô–mịn của TCVN trên một thang chuẩn hóa theo MDL. Thứ hai, kiểm chứng liệu quan hệ PCSI–VMA quan sát được có phản ánh đặc tính vật liệu hay chủ yếu xuất phát từ quy ước tính toán. Thứ ba, làm rõ vai trò của biên dự trữ VMA so với ngưỡng tiêu chuẩn trong khả năng phát hiện mối quan hệ giữa cấp phối và các chỉ tiêu thể tích của dữ liệu JMF sản xuất.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Cơ sở dữ liệu, đơn vị phân tích và kiểm soát chất lượng

Nghiên cứu này là một phân tích quan sát hồi cứu, sử dụng 40 hồ sơ thiết kế hỗn hợp bê tông nhựa chặt trong giai đoạn 2016–2026 [19]. Tập dữ liệu gồm 12 BTNC12,5, 9 BTNC16 và 19 BTNC19. Các ký hiệu BTNC12,5, BTNC16 và BTNC19 theo TCVN 13567-1:2022 tương ứng với AC12.5, AC16 và AC19 được dùng trong Tóm tắt tiếng Anh; ký hiệu AC16 chỉ biểu thị cỡ hạt danh định 16 mm tương ứng của BTNC16, không phải hạng hỗn hợp của AASHTO M 323. Có 29 thiết kế sử dụng đá vôi và 11 thiết kế sử dụng granite. Mỗi bản ghi có loại BTN, loại đá, hàm lượng nhựa P_b, lượng lọt các sàng chính, PCSI, V_a, VMA, VFA, độ ổn định và độ dẻo Marshall.

Nghiên cứu chỉ sử dụng các thiết kế dùng nhựa đường thông thường, không biến tính. Các thiết kế dùng nhựa đường cải tiến polyme SBS bị loại khỏi phạm vi vì ba lý do. Thứ nhất, TCVN 13567-1:2022 [9], tiêu chuẩn cung cấp ngưỡng phân loại thô – mịn và ngưỡng VMA tối thiểu dùng trong nghiên cứu này, chỉ áp dụng cho bê tông nhựa chặt dùng nhựa đường thông thường. Thứ hai, nhựa SBS làm thay đổi độ nhớt, nhiệt độ trộn và điều kiện đầm nén, nên có thể làm thay đổi tỷ trọng khối của mẫu đầm và VMA ở cùng một cấp phối, và trở thành biến gây nhiễu. Thứ ba, số lượng thiết kế dùng nhựa SBS trong cơ sở dữ liệu không đủ để phân tích thành một nhóm riêng. Kết quả của bài báo vì vậy không được ngoại suy cho hỗn hợp dùng nhựa biến tính.

Hàm lượng nhựa thiết kế biến thiên từ 4,20 % đến 4,80 %, trung bình 4,48 ± 0,17 %. Lượng lọt sàng 0,075 mm biến thiên từ 4,12 % đến 7,08 %, trung bình 5,38 ± 0,63 %. Giá trị $P_{0,075}$ chỉ được lưu ở dạng thống kê tổng hợp trong hồ sơ nguồn và không truy được theo từng JMF, nên không thể đưa vào mô hình hồi quy. Đây là một hạn chế được nêu rõ tại mục 4.3. Tương tự, tỷ trọng khối G_{sb} của cốt liệu tương ứng với từng hỗn hợp BTN và các chỉ

tiêu hình dạng hạt không có trong bảng tổng hợp, nên loại đá được dùng làm biến đại diện.

Bảng tổng hợp chưa duy trì đầy đủ mã dự án, mã trạm trộn và mã mỏ đá cho mọi JMF. Vì vậy không thể thực hiện kiểm chứng chéo theo cụm. Các giá trị p do đó được xem là chỉ báo thăm dò, không phải bằng chứng xác nhận tính độc lập tuyệt đối của 40 quan sát. Dữ liệu cũng trải qua hai thế hệ tiêu chuẩn là TCVN 8819:2011 và TCVN 13567-1:2022, khác nhau về đường bao cấp phối và về yêu cầu VMA. Việc phân loại lại toàn bộ theo bản năm 2022 là một thao tác hồi cứu và được thảo luận tại mục 3.5 và mục 4.3.

2.2. Xác định PCSI, quy ước tính toán và quy đổi ngưỡng của TCVN

Theo [18], PCSI bằng hiệu giữa lượng lọt thực tế tại sàng PCS, ký hiệu P_{PCS}, và lượng lọt trên đường MDL tại cùng sàng đó, ký hiệu $P_{\mathrm{MDL,PCS}}$. Đường MDL được xác định theo biểu đồ lũy thừa 0,45:

$$P_{\mathrm{MDL}} = 100\left(\frac{d}{D}\right)^{0{,}45} \qquad (1)$$

trong đó d là kích thước sàng đang xét và D là cỡ hạt lớn nhất dùng để thiết lập MDL. Giá trị PCSI âm biểu thị cấp phối nằm ở phía thô so với MDL, còn giá trị dương biểu thị phía mịn.

Quy ước xác định D và sàng PCS được thiết lập như sau. Giá trị D được xác định là cỡ sàng nhỏ nhất mà cấp phối lọt 100 % theo Bảng 1 của TCVN 13567-1:2022, tương ứng 19 mm đối với BTNC12,5 và BTNC16, và 25 mm đối với BTNC19. Sàng PCS được lựa chọn theo AASHTO M 323 [17] tương ứng với cỡ hạt danh định lớn nhất, gồm 2,36 mm đối với D = 19 mm và 4,75 mm đối với D = 25 mm. Quy ước này phù hợp với bảng tra của AASHTO đối với BTNC12,5 và BTNC19, nhưng không có cỡ hạt danh định tương ứng cho BTNC16. Theo TCVN 13567-1:2022, BTNC16 lọt 100 % qua sàng 19 mm nhưng lượng sót trên sàng 12,5 mm nằm trong khoảng 8–24 %. Nếu xác định cỡ hạt danh định là cỡ sàng lớn hơn liền kề với sàng đầu tiên có lượng sót vượt 10 %, một số JMF có thể được xác định với D = 25 mm và PCS = 4,75 mm. Do đó, nghiên cứu xem xét hai quy ước: A (D = 19 mm và PCS = 2,36 mm); và B (D = 25 mm và PCS = 4,75 mm). Phân tích chính sử dụng quy ước A để thống nhất với hồ sơ nguồn, trong khi toàn bộ kết quả đối với BTNC16 được kiểm tra lại theo quy ước B trong phân tích độ nhạy tại mục 3.3.

Sàng sử dụng để tính PCSI trùng với sàng phân loại cấp phối thô và mịn theo TCVN 13567-1:2022, do đó các ngưỡng phân loại của tiêu chuẩn có thể được quy đổi trực tiếp sang thang PCSI (Bảng 1). Kết quả này cung cấp một cơ sở định lượng để chuẩn hóa cách phân loại cấp phối. Đáng chú ý, cùng một nhãn 'cấp phối thô' theo TCVN có thể tương ứng với các ngưỡng PCSI khác nhau tùy loại hỗn hợp, lần lượt là $+0{,}88$, $-1{,}12$ và $-2{,}36$. Khoảng cách giữa các ngưỡng này lên tới 3,24 điểm phần trăm. Điều này cho thấy phân loại thô–mịn theo TCVN không tương ứng với một vị trí duy nhất so với MDL.

Để tránh diễn giải quá mức, nghiên cứu tách bốn tầng thông tin cấp phối (Bảng 2). Trong một loại BTNC cố định, lượng lọt trên MDL tại sàng PCS là hằng số, nên PCSI bằng lượng lọt thực tế trừ đi một hằng số. Phép tịnh tiến này giữ nguyên phương sai, hệ số tương quan với VMA, hệ số dốc hồi quy và sai số dự báo, chỉ làm thay đổi hệ số chặn. Do đó giá trị bổ sung của PCSI không được đánh giá bằng cách so sánh PCSI với lượng lọt sàng PCS trong cùng một nhóm. Giá trị đó phải được đánh giá qua khả năng tạo tọa độ có dấu so với MDL và khả năng sử dụng nhất quán giữa các loại hỗn hợp có sàng PCS khác nhau.

Bảng 1. Quy ước tính PCSI và quy đổi ngưỡng phân loại của TCVN 13567-1:2022 sang thang PCSI.

Loại BTN	D (mm)	PCS (mm)	P_{MDL} tại PCS (%)	Công thức áp dụng	Ngưỡng cấp phối thô theo TCVN	Ngưỡng tương đương trên thang PCSI
BTNC12,5	19,0	2,36	39,12	$P_{2,36} - 39{,}12$	$P_{2,36} < 40$ %	PCSI $< +0{,}88$
BTNC16 (quy ước A)	19,0	2,36	39,12	$P_{2,36} - 39{,}12$	$P_{2,36} < 38$ %	PCSI $< -1{,}12$
BTNC16 (quy ước B)	25,0	4,75	47,36	$P_{4,75} - 47{,}36$	—	—
BTNC19	25,0	4,75	47,36	$P_{4,75} - 47{,}36$	$P_{4,75} < 45$ %	PCSI $< -2{,}36$

Bảng 2. Phạm vi thông tin của các cách biểu diễn cấp phối.

Cách biểu diễn	Dạng dữ liệu	Giá trị chính	Giới hạn	Vai trò phù hợp
Nhãn của TCVN	Rời rạc	Kiểm tra thô hoặc mịn	Mất độ phân giải trong cùng một nhãn	Tuân thủ
P_{PCS}	Liên tục	Lượng lọt tại sàng chính	Khó so sánh khi PCS và MDL khác nhau	Kiểm soát chất lượng theo loại BTN
PCSI	Liên tục có dấu	Khoảng cách tới MDL	Chỉ phản ánh một sàng, phụ thuộc quy ước D và PCS	Chuẩn hóa và mô tả
Toàn đường cấp phối	Vectơ nhiều sàng	Giữ thông tin hình dạng	Cần mô hình đa biến và dữ liệu lớn	Thiết kế và chẩn đoán

2.3. Chỉ tiêu thể tích

Các chỉ tiêu V_a, VMA và VFA được lấy tại hàm lượng nhựa thiết kế và được kiểm tra theo các quan hệ thể tích của phương pháp Marshall [10-13]:

$$V_a = 100\left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \quad (2)$$

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \cdot P_s}{G_{sb}} \quad (3)$$

$$VFA = 100\,\frac{VMA - V_a}{VMA} \quad (4)$$

Trong đó: G_{mb} là tỷ trọng khối của mẫu bê tông nhựa đã đầm; G_{mm} là tỷ trọng lớn nhất của hỗn hợp ở trạng thái rời; G_{sb} là tỷ trọng khối của cốt liệu và P_s là hàm lượng cốt liệu tính theo khối lượng hỗn hợp.

VMA được chọn làm đáp ứng cấu trúc ưu tiên vì phản ánh không gian rỗng trong khung cốt liệu. Chỉ tiêu V_a đã bị khống chế trong quá trình lựa chọn P_b nên có miền biến thiên hẹp. Chỉ tiêu VFA không độc lập vì được suy dẫn từ V_a và VMA. Ba hồi quy PCSI–VMA, PCSI–V_a và PCSI–VFA vì vậy không thể được xem như ba bằng chứng thống kê hoàn toàn độc lập. Các công thức (2), (3) và (4) cũng cho thấy PCSI không xuất hiện trực tiếp trong chỉ tiêu thể tích. Tác động của cấp phối phải truyền qua quá trình đóng gói cốt liệu và qua các đại lượng G_{mb}, P_s và G_{sb} (Hình 5, mục 4.1).

Một yếu tố cần xét là VMA không hoàn toàn độc lập, vì VMA tối thiểu được quy định theo V_a và loại hỗn hợp. Theo TCVN 13567-1:2022, các JMF phải đáp ứng giới hạn VMA tương ứng với V_a. Do đó, VMA quan sát được đã chịu ràng buộc bởi yêu cầu thiết kế. Để đánh giá phần VMA vượt trên giới hạn tối thiểu này, nghiên cứu sử dụng biên dự trữ VMA:

$$\Delta VMA = VMA - VMA_{min}(V_a, \text{loại BTN}) \quad (5)$$

Trong đó: VMA_{min} được nội suy tuyến tính theo V_a thực tế của từng JMF.

2.4. Phân tích thống kê và kiểm chứng

Phân tích gồm thống kê mô tả, tương quan Pearson kèm khoảng tin cậy 95 % theo phép biến đổi Fisher, hồi quy tuyến tính, sai số RMSE và sai số kiểm chứng chéo LOOCV-RMSE. RMSE là căn bậc hai của tổng bình phương phần dư (RSS) chia cho số quan sát n, tức $RMSE = \sqrt{RSS/n}$. Tương quan riêng phần được tính sau khi loại ảnh hưởng của các biến kiểm soát. Kiểm định tương tác giữa PCSI và loại BTNC đánh giá sự khác biệt hệ số dốc giữa các nhóm. Với BTNC16, độ ổn định của kết quả được kiểm tra bằng cách bỏ lần lượt từng quan sát. Nhóm BTNC16 được nêu bật vì có tín hiệu mạnh nhất trong ba nhóm, nên giá trị p của nhóm này được báo cáo kèm giá trị hiệu chỉnh Bonferroni cho ba phép so sánh.

Để kiểm tra giá trị gia tăng của PCSI, mười mô hình giải thích VMA lồng nhau được so sánh. Mô hình nền lần lượt được mở rộng bằng loại BTNC, hàm lượng nhựa P_b, loại đá và độ rỗng dư V_a. Tiêu chí đánh giá gồm R^2, R^2 hiệu chỉnh, RMSE, LOOCV-RMSE và AICc. Ngoài ra, mỗi lần thêm biến đều được kiểm định bằng thống kê F từng phần. Chỉ tiêu AICc được xác định theo:

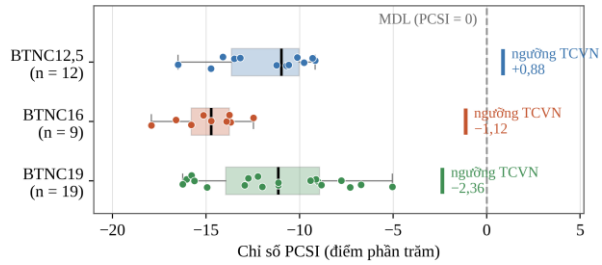
$$AIC_c = n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (6)$$

Trong đó: n là số quan sát, RSS là tổng bình phương phần dư và k là số tham số hồi quy. Một mô hình phức tạp hơn chỉ được xem là tốt hơn khi cải thiện đồng thời mức phù hợp trong mẫu và sai số kiểm chứng chéo.

3. Kết quả

3.1. PCSI tăng độ phân giải và cho phép so sánh ngưỡng giữa các loại hỗn hợp

Cả 40 JMF đều thuộc nhóm cấp phối thô theo TCVN 13567-1:2022, nên nhãn thô–mịn không có biến thiên và không thể dùng để phân biệt mức độ thô. Ngược lại, PCSI biến thiên từ −17,92 đến −5,04 điểm phần trăm, với giá trị trung bình −12,27 và độ lệch chuẩn 3,13. Toàn bộ PCSI đều âm, cho thấy dữ liệu chỉ bao phủ phía thô của MDL (Hình 1). Do đó, nghiên cứu chưa đủ dữ liệu để kiểm chứng quan hệ dạng chữ U trên cả hai phía như nghiên cứu của NCAT [18].



Hình 1. Phân bố PCSI theo loại BTNC. Vạch đậm là ngưỡng phân loại thô và mịn của TCVN 13567-1:2022 đã quy đổi sang thang PCSI.

Hình 1 cho thấy các JMF cùng được phân loại là cấp phối thô có thể khác nhau hơn 10 điểm phần trăm tại sàng PCS, cho thấy PCSI phản ánh mức độ lệch so với MDL chi tiết hơn nhãn phân loại. Các ngưỡng của TCVN lần lượt là +0,88 đối với BTNC12,5, −1,12 đối với BTNC16 và −2,36 đối với BTNC19. Khoảng cách từ các JMF đến ngưỡng tương ứng lần lượt là 10,05 – 17,38; 11,34 – 16,80; và 2,68 – 13,89 điểm phần trăm. Như vậy, các JMF BTNC19 nằm gần ranh giới thô – mịn hơn so với hai loại còn lại.

Phép kiểm tra tái lập xác nhận sai lệch giữa lượng lọt sàng PCS quan sát và tổng của PCSI với lượng lọt trên MDL nhỏ hơn 10^{-14}, tức chỉ là sai số số học. PCSI do đó không bổ sung thông tin mới so với lượng lọt sàng PCS trong từng loại BTNC.

3.2. Mối tương quan giữa PCSI và VMA

Trên tập gộp với $n = 40$, PCSI tương quan âm ở mức vừa với VMA, $r = -0{,}369$ với khoảng tin cậy 95 % từ −0,611 đến −0,065 và $p = 0{,}019$. Phương trình VMA = 13,843 − 0,05697 PCSI có $R^2 = 0{,}136$, RMSE = 0,443 % và LOOCV-RMSE = 0,469 %. Sai số dự báo

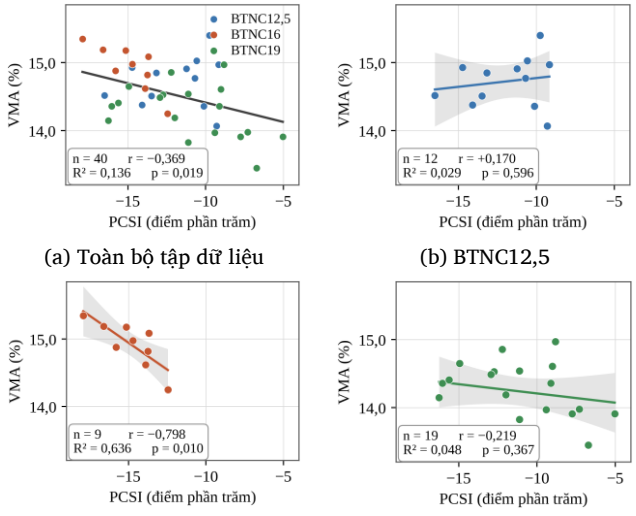
gần bằng độ lệch chuẩn VMA của toàn tập là 0,483 %. Do đó, mặc dù mối quan hệ có ý nghĩa thống kê, khả năng dự báo của mô hình đối với VMA còn hạn chế về mặt kỹ thuật.

Phân rã tích chéo cho thấy 64,3 % mức biến thiên của quan hệ PCSI–VMA đến từ khác biệt giữa ba loại BTNC, trong khi chỉ 35,7 % đến từ biến thiên nội nhóm. Do đó, tương quan gộp ($r = -0{,}369$) chủ yếu phản ánh sự khác biệt giữa các nhóm, không đại diện cho quan hệ trong từng nhóm và không nên dùng để suy luận ứng xử của một JMF cụ thể.

Bảng 3. Đặc trưng PCSI, P_b, VMA và quan hệ PCSI–VMA theo loại hỗn hợp.

Nhóm	n	PCSI trung bình ± SD	P_b trung bình ± SD (%)	VMA trung bình ± SD (%)	r	R^2	p
BTNC12,5	12	−11,91 ± 2,41	4,59 ± 0,15	14,73 ± 0,37	+0,170	0,029	0,596
BTNC16	9	−14,88 ± 1,68	4,52 ± 0,17	14,93 ± 0,34	−0,798	0,636	0,010
BTNC19	19	−11,26 ± 3,44	4,39 ± 0,13	14,24 ± 0,43	−0,219	0,048	0,367
Toàn bộ	40	−12,27 ± 3,13	4,48 ± 0,17	14,54 ± 0,48	−0,369	0,136	0,019

Sau khi khống chế chênh lệch trung bình giữa ba loại BTNC, tương quan riêng phần giảm còn r = −0,189 với p = 0,244. Kiểm định tương tác giữa PCSI và loại BTNC cho F(2, 34) = 2,01 và p = 0,149. Dữ liệu cho thấy hệ số dốc khác nhau cả về độ lớn và về dấu, nhưng lực thống kê chưa đủ để bác bỏ giả thiết đồng nhất hệ số dốc ở mức 5 %. Cần phát biểu chính xác rằng việc dùng một phương trình gộp cho ba loại là chưa được kiểm chứng, chứ không phải đã bị bác bỏ. Khoảng tin cậy của ba hệ số dốc (Bảng 3 và Hình 2) chồng lấn đáng kể trong khi dấu lại trái nhau, nên hồi quy gộp vẫn không phải lựa chọn hợp lý.



(a) Toàn bộ tập dữ liệu (b) BTNC12,5

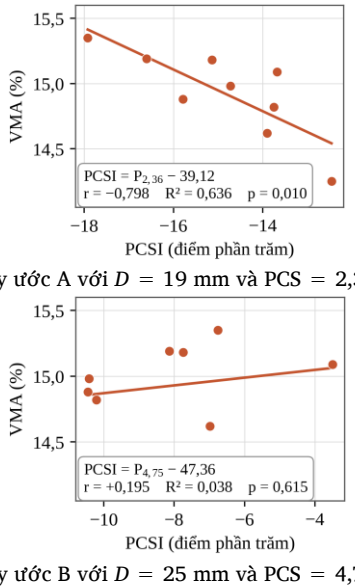
(c) BTNC16 (d) BTNC19

Hình 2. Quan hệ PCSI–VMA trên tập gộp và theo từng loại hỗn hợp. Dải xám là khoảng tin cậy 95 % của đường hồi quy.

BTNC16 cho quan hệ cục bộ rõ nhất, với phương trình VMA = 12,552 − 0,1597·PCSI. Các chỉ số tương ứng là $r = -0{,}798$ với khoảng tin cậy 95 % từ −0,956 đến −0,284, $R^2 = 0{,}636$, $p = 0{,}010$ và RMSE = 0,192 %. Khi hiệu chỉnh Bonferroni cho ba phép so sánh nhóm, giá trị p bằng 0,030. Khi bỏ lần lượt từng quan sát, hệ số dốc vẫn âm trong khoảng từ −0,182 đến −0,110, R^2 dao động từ 0,499 đến 0,797 và giá trị p lớn nhất xấp xỉ 0,050, với LOOCV-RMSE = 0,252 %. Tín hiệu do đó không do một điểm duy nhất chi phối. Nhóm BTNC12,5 có $r = +0{,}170$ với $p = 0{,}596$, còn nhóm BTNC19 có $r = -0{,}219$ với $p = 0{,}367$. Khoảng tin cậy hệ số dốc của cả hai nhóm này đều chứa giá trị 0.

3.3. Quan hệ của BTNC16 phụ thuộc vào quy ước xác định D và PCS

BTNC16 không có cỡ danh định tương ứng trong AASHTO M 323, nên quan hệ mạnh nêu trên được kiểm tra lại theo quy ước B với $D = 25$ mm và PCS = 4,75 mm. Kết quả đảo ngược hoàn toàn (Hình 3). Với quy ước A, $r = -0{,}798$, $R^2 = 0{,}636$ và $p = 0{,}010$. Với quy ước B, $r = +0{,}195$, $R^2 = 0{,}038$ và $p = 0{,}615$. Đáng chú ý hơn, hai bộ giá trị PCSI của cùng chín JMF gần như không tương quan với nhau, $r = 0{,}075$ và $p = 0{,}848$, vì lượng lọt sàng 2,36 mm và lượng lọt sàng 4,75 mm của các hồ sơ này thay đổi độc lập.



(a) Quy ước A với $D = 19$ mm và PCS = 2,36 mm

(b) Quy ước B với $D = 25$ mm và PCS = 4,75 mm

Hình 3. Quan hệ PCSI–VMA của BTNC16 theo hai quy ước xác định D và sàng PCS.

Kết quả này cho thấy ba hệ quả chính. Thứ nhất, quan hệ PCSI–VMA mạnh nhất trong tập dữ liệu không phản ánh trực tiếp đặc tính vật liệu mà chịu ảnh hưởng của việc lựa chọn sàng 2,36 mm cho BTNC16, do đó chưa đủ cơ sở để xem đây là giả thuyết ưu tiên cho các nghiên cứu tiếp theo khi quy ước PCS chưa thống nhất. Thứ hai, PCSI chỉ có tính xác định duy nhất khi cỡ danh định của hỗn hợp được quy định trong AASHTO M 323. Với các loại hỗn hợp riêng của TCVN như BTNC16, cần thống nhất quy ước PCS trước khi xem xét ứng dụng. Thứ ba, đây là hạn chế mang tính hệ thống của quy ước, không phải do cỡ mẫu, nên việc tăng số lượng JMF không giải quyết được tính đa nghĩa của PCSI.

3.4. Đánh giá đóng góp của PCSI trong các mô hình hồi quy lồng nhau

Bảng 4 so sánh mười mô hình giải thích VMA. Cột cuối là kiểm định F từng phần cho biến được thêm vào ở dòng tương ứng.

Kết quả phân tích cho thấy ba điểm chính. Thứ nhất, mô hình chỉ gồm loại BTNC đã đạt $R^2 = 0{,}378$, cao hơn hẳn mô hình PCSI đơn biến. Khi bổ sung PCSI, R^2 chỉ tăng 0,022 với $F = 1{,}33$ và $p = 0{,}257$, trong khi LOOCV-RMSE lại tăng từ 0,404 % lên 0,410 %. Thứ hai, hàm lượng nhựa được đưa vào mô hình theo đúng nguyên tắc kiểm soát biến đồng hành, nhưng sau khi đã biết loại BTNC thì P_b không đóng góp thêm, với $F = 0{,}01$ và $p = 0{,}923$. Nguyên nhân là miền biến thiên của P_b rất hẹp, từ 4,20 % đến 4,80 % với độ lệch chuẩn 0,17 %, và một phần đã được loại BTNC hấp thụ, vì loại BTNC giải thích 28,6 % biến thiên của P_b. Các thiết kế đều đã hội tụ về vùng hàm lượng nhựa tối ưu. Kết quả này bác bỏ giả thiết cho rằng quan hệ PCSI–VMA quan sát được là do nhiễu từ P_b. Thứ ba, loại đá là biến giải thích mạnh nhất trong nhóm biến vật liệu, với $F = 12{,}62$ và $p = 0{,}001$. Ngay khi loại đá có mặt thì PCSI mất hoàn toàn vai trò, với $F = 0{,}01$ và $p = 0{,}908$. Bổ sung V_a, tức biến thể tích liên hệ trực tiếp với VMA qua các công thức (2), (3) và (4), làm R^2 tăng lên 0,768 nhưng cũng không cứu được PCSI, với $F = 0{,}13$ và $p = 0{,}725$.

Tương ứng, tương quan riêng phần giữa PCSI và VMA giảm dần theo mức độ kiểm soát. Giá trị này là $r = -0{,}189$ với $p = 0{,}244$ khi khống chế loại BTNC, là $r = -0{,}062$ với $p = 0{,}704$ khi thêm loại đá, và là $r = -0{,}020$ với $p = 0{,}903$ khi thêm cả P_b. Mô hình hệ số dốc riêng làm tăng R^2 trong mẫu nhưng không cải thiện LOOCV-RMSE, phản ánh nguy cơ quá khớp khi cỡ mẫu theo nhóm nhỏ. Cần lưu ý rằng chênh lệch RMSE giữa các mô hình trong Bảng 4 chỉ vào khoảng 0,05–0,15 điểm %, cùng bậc với độ chụm của chính phép xác định VMA nêu tại mục 4.3. Vì vậy không nên diễn giải các khác biệt nhỏ này như một cải thiện kỹ thuật thực chất.

3.5. Biên dự trữ VMA và sự khác biệt về tương quan giữa các nhóm

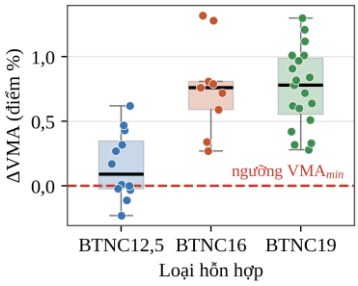
Bảng 5 và Hình 4 trình bày biên dự trữ ΔVMA theo công thức (5). Kết quả cho thấy ba nhóm không có cùng mức tự do để VMA biến thiên. Nhóm BTNC12,5 chỉ còn trung bình 0,16 điểm % trên ngưỡng, trong khi BTNC16 và BTNC19 còn khoảng 0,76 điểm %.

Bảng 4. So sánh các mô hình giải thích VMA ($n = 40$).

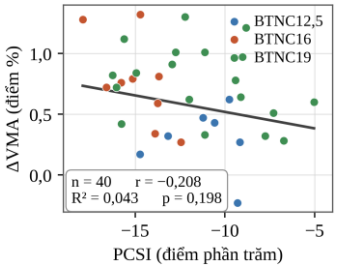
Mô hình	k	R^2	R^2 hiệu chỉnh	RMSE (%)	LOOCV-RMSE (%)	AICc	F từng phần (p)
PCSI	2	0,136	0,114	0,443	0,469	−60,84	—
Loại BTNC	3	0,378	0,344	0,376	0,404	−71,62	—
Loại + PCSI	4	0,400	0,350	0,369	0,410	−70,59	1,33 (0,257)
Loại + P_b	4	0,378	0,326	0,376	0,418	−69,16	0,01 (0,923)
Loại + P_b + PCSI	5	0,400	0,332	0,369	0,422	−67,98	1,29 (0,264)
Loại + P_b + đá	5	0,543	0,491	0,322	0,361	−78,85	12,62 (0,001)
Loại + P_b + đá + PCSI	6	0,543	0,476	0,322	0,378	−76,08	0,01 (0,908)
Loại + P_b + đá + V_a	6	0,768	0,733	0,230	0,276	−103,12	32,86 (<0,001)
Loại + P_b + đá + V_a + PCSI	7	0,768	0,726	0,229	0,287	−100,32	0,13 (0,725)
Hệ số dốc PCSI riêng theo loại	6	0,464	0,385	0,349	0,405	−69,67	2,01 (0,149)

Bảng 5. Biên dự trữ ΔVMA so với ngưỡng của TCVN 13567-1:2022 và quan hệ với PCSI.

Nhóm	n	ΔVMA trung bình ± SD (điểm %)	ΔVMA nhỏ nhất	r (PCSI, ΔVMA)	p	R^2 (PCSI, VMA) trong nhóm
BTNC12,5	12	0,158 ± 0,263	−0,23	+0,204	0,525	0,029
BTNC16	9	0,764 ± 0,360	+0,27	−0,653	0,057	0,636
BTNC19	19	0,758 ± 0,305	+0,28	−0,311	0,196	0,048
Toàn bộ	40	0,580 ± 0,409	−0,23	−0,208	0,198	0,136



(a) Phân bố ΔVMA theo loại hỗn hợp



(b) Quan hệ giữa PCSI và ΔVMA

Hình 4. Biên dự trữ VMA so với ngưỡng tối thiểu của TCVN 13567-1:2022.

Có hai kết quả đáng chú ý. Thứ nhất, cường độ tương quan PCSI–VMA giữa các nhóm giảm theo thứ tự BTNC16, BTNC19 và BTNC12,5, phù hợp với thứ tự biên dự trữ VMA. Một cách giải thích hợp lý là khi VMA của hỗn hợp tiến sát ngưỡng tối thiểu, phương sai VMA bị thu hẹp, làm giảm khả năng quan sát mối liên hệ với các biến cấp phối. Đối với BTNC12,5, sáu trong mười hai JMF có ΔVMA < 0,05 điểm %, trong đó bốn hồ sơ có giá trị âm, thấp nhất là −0,23 điểm %. Điều này cho thấy VMA của nhóm BTNC12,5 bị giới hạn đáng kể bởi yêu cầu tối thiểu, qua đó có thể làm suy yếu tương quan với PCSI. Tuy nhiên, BTNC16 và BTNC19 có biên dự trữ gần như bằng nhau (0,764 và 0,758 điểm %) trong khi cường độ tương quan khác nhau rõ rệt XX, nên ΔVMA chỉ giải thích được sự khác biệt giữa BTNC12,5 với hai nhóm còn lại, không giải thích được sự khác biệt giữa BTNC16 và BTNC19.

Thứ hai, khi thay VMA thô bằng ΔVMA, tương quan gộp giảm từ $r = -0{,}369$ ($p = 0{,}019$) xuống $r = -0{,}208$ ($p = 0{,}198$), trong khi tương quan của BTNC16 giảm từ $r = -0{,}798$ xuống $r = -0{,}653$ ($p = 0{,}057$). Kết quả cho thấy một phần quan hệ PCSI–VMA quan sát được trên tập gộp có thể bắt nguồn từ sự khác biệt về ngưỡng VMA tối thiểu giữa ba loại hỗn hợp, thay vì chỉ phản ánh đặc tính vật liệu. Do đó, mức $R^2 = 37{,}8$ % của mô hình loại BTNC cần được diễn giải thận trọng, vì biến này đồng thời phản ánh cỡ hạt danh định, cấu trúc cốt liệu và yêu cầu VMA. Khi sử dụng ΔVMA làm biến đáp ứng, loại BTNC vẫn giải thích 46,7 % biến thiên, trong khi việc bổ sung PCSI không cải thiện mô hình có ý nghĩa thống kê ($F = 2{,}12$, $p = 0{,}154$).

Cần lưu ý rằng ΔVMA của toàn bộ hồ sơ được tính theo VMA_{min} của TCVN 13567-1:2022, kể cả hồ sơ thiết kế theo TCVN 8819:2011. Với các hồ sơ này, ΔVMA là biên dự trữ hồi cứu so với yêu cầu hiện hành, không phải biên tại thời điểm thiết kế; giá trị âm vì vậy không đồng nghĩa với hồ sơ không đạt khi được duyệt. Do ngưỡng VMA và đường bao cấp phối khác nhau giữa hai thế hệ tiêu chuẩn, ΔVMA có thể bị lệch có hệ thống theo thế hệ và sai lệch này có thể tương quan một phần với PCSI. Các kết quả dựa trên ΔVMA ở mục này do đó chỉ được dùng để giải thích định tính sự khác biệt về cường độ tương quan giữa các nhóm, và các giá trị r, p tính trên ΔVMA ở Bảng 5 chỉ nên xem là chỉ báo thăm dò; kết luận về giá trị gia tăng của PCSI dựa trên VMA ở Bảng 4 và không phụ thuộc vào ΔVMA.

3.6. PCSI và mối tương quan với V_a và VFA

Độ rỗng dư V_a chỉ dao động từ 4,05 % đến 4,97 %, trung bình 4,55 ± 0,21 %. Miền biến thiên hẹp này phản ánh việc P_b đã được điều chỉnh để đưa các cấp phối khác nhau về vùng V_a mục tiêu. Hạn chế miền biến thiên làm quan hệ PCSI–V_a chỉ đạt $R^2 = 0{,}024$. Đối với VFA, độ lệch chuẩn là 1,07 %, trong khi RMSE của hồi quy PCSI–VFA là 1,047 %. Hệ số tương quan giữa PCSI và VFA là −0,150 và không có ý nghĩa thống kê ($p = 0{,}355$), cho thấy chưa có bằng chứng về mối tương quan tuyến tính có ý nghĩa thống kê giữa hai biến. Các kết quả thống kê tương ứng được trình bày trong Bảng 6.

Vai trò của biến đồng hành thể hiện rõ trong một hồ sơ BTNC19 dạng hot-bin của cùng cơ sở dữ liệu. Khi cấp phối cơ bản và PCSI gần như không đổi, việc tăng P_b từ 3,2 % lên 5,2 % làm V_a giảm từ 6,19 % xuống 3,11 %, làm VMA tăng từ 13,40 % lên 15,12 % và làm VFA tăng từ 53,79 % lên 79,40 %. Mức thay đổi này tương đương khoảng 0,86 điểm % VMA cho mỗi 1 % nhựa. Con số đó lớn hơn toàn bộ độ lệch chuẩn VMA của tập dữ liệu là 0,48 điểm %, và là lý do P_b được đưa vào Bảng 4. Tuy nhiên, do các JMF thực tế chỉ chênh nhau tối đa 0,6 % nhựa và đều đã hội tụ về vùng tối ưu, ảnh hưởng của P_b trong tập dữ liệu này không còn tách được khỏi loại hỗn hợp.

Bảng 6. Quan hệ giữa PCSI và các chỉ tiêu thể tích trên tập gộp.

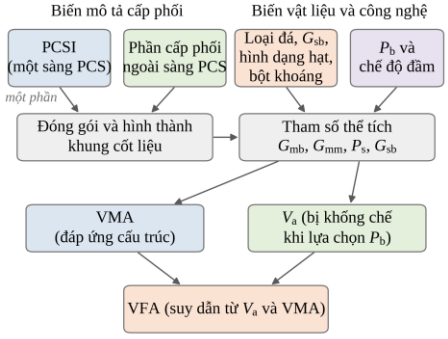
Biến đáp ứng	r (khoảng tin cậy 95 %)	R^2	p	Hệ số PCSI (khoảng tin cậy 95 %)	RMSE (%)
VMA	−0,369 (−0,611 đến −0,065)	0,136	0,019	−0,0570 (−0,1040 đến −0,0099)	0,443
V_a	−0,155 (−0,445 đến +0,164)	0,024	0,338	−0,0105 (−0,0323 đến +0,0114)	0,206
VFA	−0,150 (−0,441 đến +0,169)	0,023	0,355	−0,0514 (−0,1626 đến +0,0598)	1,047

4. Thảo luận

4.1. Cơ chế sắp xếp hạt cốt liệu và ý nghĩa của PCSI

Trên nhánh phía thô, khi lượng hạt lọt qua sàng PCS tăng và cấp phối tiến gần MDL, các hạt nhỏ có xu hướng lấp một phần khoảng trống giữa khung hạt lớn, nên VMA có thể giảm. Nếu cấp phối vượt sang phía quá mịn, tiếp xúc giữa các hạt thô giảm, hạt mịn trở thành pha chi phối và VMA có thể tăng trở lại. Cơ chế này tạo cơ sở cho quan hệ dạng chữ U giữa PCSI và VMA trong các tập dữ liệu bao phủ hai phía MDL [2, 3, 18]. Tuy nhiên, kết quả mục 3.3 cho thấy không nên dùng nhóm BTNC16 của tập dữ liệu này làm minh chứng cho nhánh giảm của cơ chế đó, vì dấu của quan hệ đảo ngược khi đổi sàng quan sát.

PCSI không trực tiếp đo số điểm tiếp xúc, độ chèn lấp, phân bố lỗ rỗng hoặc tính định hướng hạt. Hai đường cấp phối có cùng PCSI vẫn có thể khác nhau về tỷ lệ hạt thô và hạt trung gian, về vùng cát, về bột khoáng và về hình dạng đường cong (Hình 5). Các chỉ số dùng nhiều sàng như tỷ số Bailey, mô đun độ lớn, số chiều fractal hoặc mô hình đóng gói hạt giữ được nhiều thông tin cấu trúc hơn nhưng yêu cầu dữ liệu và công hiệu chỉnh lớn hơn [3-8]. PCSI nên được xem là một tọa độ bậc thấp, dễ giải thích, không phải đại diện đầy đủ cho toàn đường cấp phối.



Hình 5. Quan hệ giữa PCSI và các chỉ tiêu thể tích.

Một kiểm chứng bổ sung trên cùng cơ sở dữ liệu củng cố kết luận trên. Trong mô hình đa biến giải thích chiều sâu hằn lún vệt bánh xe với các biến PCSI, P_b, số lượt tác dụng, loại đá và loại hỗn hợp, mô hình đạt $R^2 = 0{,}428$. Hệ số của PCSI là $+0{,}017$ mm cho mỗi điểm phần trăm với $p = 0{,}848$. Trong khi đó, số lượt tác dụng với $p = 0{,}015$, loại đá với $p = 0{,}019$ và P_b với $p = 0{,}048$ đều có ý nghĩa thống kê [19]. Như vậy, kết luận rằng PCSI không phải biến dự báo độc lập không chỉ đúng với chỉ tiêu thể tích mà còn đúng với chỉ tiêu hiệu năng sẵn có trong cùng tập dữ liệu.

4.2. Khác biệt giữa dữ liệu Việt Nam và NCAT

NCAT phân tích 72 hỗn hợp cho quan hệ PCSI–VMA, sử dụng nhiều cỡ hạt danh định, nhiều loại cốt liệu và nhiều mức đầm, đồng thời bao phủ PCSI từ phía thô sang phía mịn [18]. Miền dữ liệu rộng cho phép mô hình bậc hai nhận diện cực tiểu VMA gần MDL. Tập dữ liệu Việt Nam chỉ có 40 JMF đã hoàn tất tối ưu, toàn bộ PCSI đều âm và V_a bị nén vào một cửa sổ hẹp. Vì vậy, giá trị R^2 thấp hơn không chứng minh rằng PCSI không phù hợp với Việt Nam. Kết quả này cho thấy quy luật rút ra từ một ma trận thí nghiệm rộng không tự động chuyển thành mô hình dự báo trên một tập JMF sản xuất đã qua sàng lọc thiết kế. Cần bổ sung rằng quan hệ của NCAT cũng gộp nhiều cỡ hạt danh định, nên một phần giá trị $R^2 = 0{,}7336$ của báo cáo đó cũng là thành phần giữa nhóm, giống như phân rã ở mục 3.2.

Khác biệt về phương pháp đầm cũng quan trọng. Các chỉ báo $\%G_{mm}$ tại N_{ini}, độ dốc đầm nén và chỉ số CEI của đầm xoay mô tả cả quá trình chặt dần [20, 21], trong khi phương pháp Marshall chủ yếu cung cấp trạng thái cuối sau số chày quy định. PCSI có thể liên hệ với quỹ đạo đầm, nhưng tín hiệu này bị mất khi chỉ quan sát V_a và VMA tại một điểm thiết kế cuối.

Một khác biệt nữa là cấp phối theo khối lượng có thể không đại diện chính xác cho thể tích hạt khi các nguồn cốt liệu có G_{sb} khác nhau. NCAT lưu ý rằng cấp phối theo khối lượng và cấp phối theo thể tích gần tương đương khi miền G_{sb} hẹp, nhưng có thể lệch đáng kể khi phối trộn cốt liệu có tỷ trọng khác nhau [18]. Kết quả mục 3.4 phù hợp với cảnh báo đó, vì khi thêm biến loại đá thì vai trò riêng của PCSI biến mất hoàn toàn. Muốn xác nhận cơ chế thì cần có G_{sb} theo từng kho vật liệu, các chỉ tiêu hình dạng hạt và một thiết kế thí nghiệm cân bằng.

4.3. Độ tin cậy và giới hạn suy luận

Các kết luận được phân thành ba mức độ bằng chứng. Thứ nhất, các kết luận có bằng chứng trực tiếp gồm: TCVN không phân tầng được 40 JMF cùng nằm ở phía thô; PCSI tạo thang liên tục từ $-17{,}92$ đến $-5{,}04$ và quy đổi ba ngưỡng phân loại về cùng một trục; trong từng loại BTN, PCSI tương đương toán học với lượng lọt sàng PCS sau phép tịnh tiến; và PCSI không bổ sung khả năng giải thích VMA sau khi kiểm soát loại hỗn hợp, hàm lượng nhựa và loại đá. Thứ hai, kết luận có điều kiện là tương quan âm PCSI–VMA của BTNC16, ổn định khi loại từng quan sát nhưng chỉ dựa trên 9 JMF và phụ thuộc vào quy ước tính. Thứ ba, chưa đủ bằng chứng để suy luận quan hệ nhân quả, xác định ngưỡng PCSI tối ưu, mở rộng sang phía mịn hoặc dự báo hiệu năng hiện trường.

Sai số đo đặt ra một giới hạn đối với độ chính xác của VMA. VMA được tính từ G_{mb}, P_s và G_{sb} theo Công thức (3). Với tổ ba mẫu và độ lặp lại của phép xác định khối lượng thể tích theo TCVN 8860-5 [22], sai số chuẩn của VMA thiết kế ước khoảng 0,1–0,2 điểm %, chưa kể bất định của G_{sb}. Do đó, chênh lệch RMSE giữa các mô hình trong Bảng 4 nếu cùng cỡ với sai số phép thử cần được diễn giải thận trọng. Đối với BTNC16, RMSE $= 0{,}192$ % cho thấy sai số dự báo đã ở gần mức bất định đo lường, nên khả năng cải thiện $R^2 = 0{,}636$ bằng mô hình phức tạp hơn có thể bị hạn chế.

Sai số phân tích sàng được truyền vào PCSI và có thể làm suy giảm mối liên hệ hồi quy. Sai số trong biến độc lập thường làm hệ số dốc bị kéo về 0 và làm giảm R^2. Với độ lệch chuẩn PCSI trong các nhóm chỉ từ 1,68 đến 3,44 điểm %, trong khi độ lặp lại của lượng lọt sàng 2,36 mm khoảng 1–2 điểm %, ảnh hưởng này có thể không nhỏ. Do đó, các kết quả không cho thấy đóng góp có ý nghĩa của PCSI nên được diễn giải là chưa phát hiện được đóng góp trong thiết kế nghiên cứu này, thay vì kết luận rằng PCSI không chứa thông tin.

Năm nguồn bất định chính gồm: dữ liệu hồi cứu không cân bằng, thiếu mã cụm dự án và trạm trộn để kiểm tra tính độc lập, thiếu G_{sb} cùng các chỉ tiêu hình dạng cốt liệu và $P_{0,075}$ theo từng JMF, PCSI chỉ phản ánh một sàng và phụ thuộc vào quy ước D và PCS, và tập dữ liệu bao gồm hai thế hệ tiêu chuẩn khác nhau về đường bao cấp phối và yêu cầu VMA, nên ΔVMA chỉ là biên dự trữ hồi cứu so với yêu cầu hiện hành (mục 3.5). Bài báo không loại bỏ các dữ liệu bất thường khi chưa có bằng chứng xác đáng. Ngoài ra, phương trình hồi quy của BTNC16 không được ngoại suy ngoài miền quan sát và mức $p < 0,05$ không được sử dụng làm tiêu chí duy nhất để diễn giải kết quả.

5. Định hướng ứng dụng và kiểm chứng ở Việt Nam

5.1. Khung ứng dụng theo mức độ bằng chứng

PCSI có thể triển khai theo ba cấp tăng dần (Bảng 7). Cấp 1 là mức mô tả, tức ghi PCSI cùng JMF để định lượng vị trí tương đối so với MDL và so sánh các phương án phối trộn trong cùng một loại BTN. Cấp 2 là mức giám sát, tức tính PCSI từ kết quả phân tích sàng theo lô và chỉ dùng như tín hiệu yêu cầu rà soát toàn đường cấp phối. Cấp 3 là mức dự báo, tức xây dựng mô hình đa biến cho VMA hoặc cho hiệu năng sau khi đã có thiết kế thí nghiệm chủ động và kiểm chứng ngoài mẫu. Với các loại hỗn hợp không có cỡ danh định tương ứng trong AASHTO M 323, trước hết là BTNC16, điều kiện tiên quyết của cả ba cấp là thống nhất quy ước D và PCS, vì mục 3.3 cho thấy kết luận có thể đảo dấu theo quy ước.

Bảng 7. Khung ứng dụng PCSI theo mức độ bằng chứng.

Cấp độ	Mục đích	Dữ liệu tối thiểu	Quyết định phù hợp	Điều chưa được phép
1. Mô tả	Định lượng mức độ thô và mịn	JMF cùng quy ước D và PCS đã thống nhất	So sánh phương án trong cùng loại BTN	Không suy ra hiệu năng
2. Giám sát	Phát hiện dịch chuyển tại sàng PCS	JMF, dữ liệu sản xuất, độ chụm phép thử	Cảnh báo và rà soát toàn cấp phối	Không thay dung sai từng sàng
3. Dự báo	Giải thích VMA và hiệu năng	PCSI, P_b, loại đá, G_{sb}, hình dạng hạt, tập kiểm chứng độc lập	Hỗ trợ tối ưu đa biến	Không dùng mô hình chưa kiểm chứng để nghiệm thu

Trong kiểm soát chất lượng, giới hạn cảnh báo không được lấy từ dải −17,92 đến −5,04 hoặc từ hồi quy của 40 JMF. Trước hết cần đánh giá độ lặp lại của phân tích sàng, sai số lấy mẫu và năng lực quá trình của từng trạm trộn theo cách tiếp cận đã được áp dụng cho các chỉ tiêu bê tông nhựa khác ở Việt Nam [16]. Giới hạn kiểm soát phải được xây dựng từ chuỗi sản xuất ổn định quanh JMF, có phân biệt nguyên nhân thông thường và nguyên nhân đặc biệt. Một phép so sánh đơn giản cho thấy mức độ khắt khe của yêu cầu này. Theo hệ số dốc mạnh nhất quan sát được là −0,16 điểm % VMA cho mỗi điểm PCSI, để VMA thay đổi 0,5 điểm % thì PCSI phải thay đổi khoảng 3 điểm, tức 3 % lượng lọt tại sàng chính. Mức thay đổi đó thường vẫn nằm trong dung sai sản xuất cho phép. Nói cách khác, một giới hạn cảnh báo theo PCSI đủ nhạy để hữu ích có nguy cơ nằm gọn bên trong dải dung sai hợp lệ của tiêu chuẩn. Khi PCSI dịch chuyển, hành động đúng là kiểm tra sàng PCS và các sàng lân cận, kiểm tra hot-bin, tỷ lệ cấp liệu và VMA. Không nên điều chỉnh hàm lượng nhựa chỉ để bù một biến động cấp phối chưa được chẩn đoán.

5.2. Chương trình kiểm chứng tối thiểu và kiến trúc dữ liệu

Để chuyển PCSI từ biến mô tả sang biến dự báo, cần thiết kế thí nghiệm theo khối, ưu tiên BTNC16 và BTNC19. Với mỗi loại, cần chọn ít nhất năm mức PCSI bao phủ phía thô, vùng gần 0 và phía mịn nhưng vẫn nằm trong đường bao. Cần sử dụng tối thiểu hai nguồn cốt liệu bố trí theo khối và bố trí ít nhất ba mẻ phối trộn độc lập cho mỗi tổ hợp. Trong mỗi loạt thí nghiệm cần giữ hoặc ghi đầy đủ P_b, G_{sb}, độ góc cạnh, hàm lượng hạt dẹt dài, bột khoáng, loại nhựa và chế độ đầm. Đầu ra không chỉ gồm V_a, VMA và VFA mà còn gồm chỉ báo khả năng đầm chặt bằng đầm xoay, chiều sâu hằn lún vệt bánh xe và thí nghiệm nứt phù hợp. Số mẻ nêu trên là mức khởi đầu. Cỡ mẫu chính thức phải được xác định bằng phân tích lực thống kê dựa trên độ phân tán VMA và sai số lặp của từng phòng thí nghiệm.

Phân tích phải kiểm tra PCSI ở cả dạng tuyến tính và dạng bậc hai, phải xét tương tác giữa PCSI với loại BTN và giữa PCSI với nguồn đá, đồng thời phải công bố độ lớn hiệu ứng, khoảng tin cậy và sai số dự báo. Điểm then chốt là cách chia dữ liệu. Nếu nhiều JMF thuộc cùng một dự án hoặc cùng một trạm trộn thì không được chia ngẫu nhiên từng JMF, mà phải giữ nguyên cụm và lần lượt khóa ngoài một dự án, một trạm hoặc một nguồn đá. Khi dữ liệu được cập nhật theo thời gian, nên hiệu chỉnh mô hình trên giai đoạn trước và kiểm chứng trên giai đoạn sản xuất sau. Muốn làm được điều đó, cơ sở dữ liệu phải lưu ba lớp thông tin. Lớp nhận dạng gồm mã dự án, trạm trộn, mỏ, kho vật liệu, thời gian, phiên bản JMF và thế hệ tiêu chuẩn áp dụng khi thiết kế. Lớp vật liệu gồm toàn bộ lượng lọt sàng, D, PCS,

PCSI, G_{sb} theo từng thành phần, độ góc cạnh, hàm lượng hạt dẹt dài, bột khoáng và loại nhựa. Lớp quá trình và đáp ứng gồm tỷ lệ phối liệu, P_b, nhiệt độ, chế độ trộn và đầm, G_{mb}, G_{mm}, V_a, VMA, VFA cùng các chỉ tiêu hằn lún, nứt và độ chặt hiện trường. Chính việc thiếu lớp nhận dạng và thiếu một phần lớp vật liệu là nguyên nhân khiến nghiên cứu này chỉ dừng ở mức thăm dò.

Tiêu chí quyết định cần được định trước. Một mô hình có PCSI chỉ được nâng từ cấp mô tả lên cấp dự báo khi đáp ứng đồng thời năm điều kiện. Thứ nhất, mô hình phải cải thiện có ý nghĩa kỹ thuật, không chỉ có ý nghĩa thống kê, so với mô hình nền gồm loại BTN và các biến vật liệu sẵn có. Thứ hai, mức cải thiện phải vượt trần sai số của phép thử tương ứng. Thứ ba, sai số và độ lệch hiệu chỉnh phải ổn định trên các tập khóa ngoài. Thứ tư, dấu và miền tin cậy của hiệu ứng phải nhất quán. Thứ năm, kết quả không được phụ thuộc vào một nhóm nhỏ, một giá trị ảnh hưởng lớn hay một quy ước tính toán. Nếu các điều kiện này không đạt, quyết định hợp lý vẫn là giữ PCSI như một trường mô tả đã chuẩn hóa.

5.3. Định hướng chuẩn hóa và áp dụng PCSI

Đối với TCVN 13567-1, trước mắt cần thống nhất cách xác định *D*, PCS, đường MDL và cách tính, ghi nhận PCSI, đặc biệt đối với BTNC16 và các loại hỗn hợp không có cỡ danh định tương ứng trong AASHTO M 323. Việc này giúp tránh trường hợp cùng một JMF cho các giá trị PCSI khác nhau do quy ước tính.

Bảng quy đổi các ngưỡng phân loại sang thang PCSI có thể được sử dụng như thông tin tham khảo để so sánh giữa các loại hỗn hợp. Tuy nhiên, chưa nên thay đổi ranh giới phân loại hoặc quy định dung sai PCSI. Ở giai đoạn hiện tại, PCSI phù hợp với vai trò chỉ tiêu bổ trợ cho thiết kế JMF và kiểm soát chất lượng, trong khi đường bao cấp phối và dung sai từng sàng vẫn là yêu cầu chính. Việc xem xét PCSI như một chỉ tiêu kiểm soát chính thức cần dựa trên dữ liệu mở rộng từ nhiều trạm trộn và mối liên hệ với các chỉ tiêu thể tích, độ chặt và hiệu năng mặt đường.

6. Kết luận

1) Trong 40 thiết kế BTNC không sử dụng nhựa đường cải tiến polyme SBS, toàn bộ đều thuộc cấp phối thô theo TCVN 13567-1:2022, nhưng PCSI dao động từ $-17{,}92$ đến $-5{,}04$. PCSI bổ sung khả năng định lượng mức độ thô trong cùng một nhãn phân loại và cho phép quy đổi ba ngưỡng phân loại của TCVN về một trục chung so với MDL, lần lượt là $+0{,}88$, $-1{,}12$ và $-2{,}36$. Qua đó, có thể thấy cùng một nhãn cấp phối thô có thể tương ứng với các mức độ lệch khác nhau so với MDL. Đây là giá trị chuẩn hóa rõ ràng của chỉ số.

2) Trong từng loại BTNC, PCSI bằng lượng lọt sàng PCS trừ đi một hằng số MDL. Do đó, PCSI và lượng lọt sàng PCS có cùng hệ số tương quan, hệ số dốc và sai số dự báo. Giá trị khoa học của PCSI nằm ở việc chuẩn hóa điểm gốc theo MDL và khả năng biểu diễn có dấu giữa các loại hỗn hợp, thay vì tạo thêm thông tin dự báo trong cùng một nhóm.

3) Hồi quy gộp PCSI–VMA chỉ giải thích 13,6 % biến thiên, và 64,3 % tích chéo của quan hệ này đến từ khác biệt giữa các loại hỗn hợp thay vì biến thiên nội bộ nhóm. Sau khi bổ sung hàm lượng nhựa và loại đá, PCSI không còn đóng góp, với $F = 0{,}01$ và $p = 0{,}908$, trong khi tương quan riêng phần chỉ còn $r = -0{,}020$. Do đó, chưa có cơ sở sử dụng một phương trình PCSI–VMA chung cho BTNC12,5, BTNC16 và BTNC19.

4) Quan hệ cục bộ mạnh nhất của BTNC16, với $r = -0{,}798$, $R^2 = 0{,}636$ và $n = 9$, không bền vững trước thay đổi quy ước tính toán. Khi chuyển sang $D = 25$ mm và PCS = 4,75 mm, hệ số tương quan đổi dấu và mất ý nghĩa, với $r = +0{,}195$ và $p = 0{,}615$, trong khi hai bộ giá trị PCSI gần như không tương quan với nhau. Vì BTNC16 không có cỡ hạt danh định tương ứng trong AASHTO M323, việc thống nhất quy ước xác định *D* và PCS cần được thực hiện trước khi xem xét ứng dụng PCSI cho loại hỗn hợp này.

5) Biên dự trữ VMA so với ngưỡng của TCVN, thay vì cấp phối, có liên hệ rõ hơn với sự khác biệt về cường độ tương quan giữa BTNC12,5 và hai nhóm còn lại. Nhóm BTNC12,5 chỉ còn 0,16 điểm % trên ngưỡng và không cho thấy tín hiệu rõ rệt, trong khi BTNC16 và BTNC19 còn khoảng 0,76 điểm %. Khi sử dụng ΔVMA làm biến đáp ứng, tương quan gộp giảm còn $r = -0{,}208$ với $p = 0{,}198$. Điều này cho thấy các nghiên cứu dựa trên hồ sơ JMF sản xuất cần tính đến hiệu ứng chọn lọc do ngưỡng tiêu chuẩn trước khi quy kết biến thiên cho cấp phối. Do ΔVMA được tính hồi cứu theo ngưỡng của TCVN 13567-1:2022 cho cả hai thế hệ tiêu chuẩn, các kết quả dựa trên ΔVMA chỉ có giá trị thăm dò.

6) PCSI nên được áp dụng trước hết ở mức biến mô tả JMF và với vai trò chỉ tiêu hỗ trợ giám sát dịch chuyển cấp phối. Mọi ứng dụng cho dự báo, nghiệm thu hoặc tiêu chuẩn hóa đều cần có quy ước tính toán thống nhất, thí nghiệm chủ động bao phủ hai phía MDL, mẫu lặp độc lập, thông tin đầy đủ về biến cốt liệu, P_b và chế độ đầm, đồng thời cần được kiểm chứng theo dự án hoặc theo nguồn đá.

Tài liệu tham khảo

[1]. E. R. Brown, M. R. Hainin, L. A. Cooley, and G. Hurley, *Relationships of HMA In-place Air Voids, Lift Thickness, and Permeability*, NCHRP Report 531. Washington, DC: Transportation Research Board, 2004.

[2]. F. L. Roberts, P. S. Kandhal, E. R. Brown, D. Y. Lee, and T. W. Kennedy, *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*, 2nd ed. Lanham, MD: NAPA Education Foundation, 1996.

[3]. M. Fang, D. Park, J. L. Singuranayo, H. Chen, and Y. Li, "Aggregate gradation theory, design and its impact on asphalt pavement performance: A review," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 20, no. 12, pp. 1408–1424, 2019. DOI: 10.1080/10298436.2018.1430365.

[4]. M. R. Pouranian and J. E. Haddock, "Effect of aggregate gradation on asphalt mixture compaction parameters," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 32, no. 9, art. 04020244, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003315.

[5]. S. Liu, L. Zhu, H. Zhang, T. Liu, P. Ji, and W. Cao, "Effect of gradation variability on volume parameter and key performances of HMA," *Frontiers in Materials*, vol. 7, art. 611409, 2021. DOI: 10.3389/fmats.2020.611409.

[6]. W. Li, W. Cao, X. Ren, S. Lou, S. Liu, and J. Zhang, "Impacts of aggregate gradation on the volumetric parameters and rutting performance of asphalt concrete mixtures," *Materials*, vol. 15, no. 14, art. 4866, 2022. DOI: 10.3390/ma15144866.

[7]. Y. Yue, M. Abdelsalam, and M. S. Eisa, "Aggregate gradation variation on the properties of asphalt mixtures," *Coatings*, vol. 12, no. 11, art. 1608, 2022. DOI: 10.3390/coatings12111608.

[8]. S. Wang, C. Liu, X. Zhu, X. Peng, Q. Pan, Z. Zhao, and Z. Zhang, "Influence of gradation on volume characteristics and engineering performance of asphalt mixture," *Materials Today Communications*, vol. 38, art. 107615, 2024. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107615.

[9]. *Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng – Thi công và nghiệm thu – Phần 1: Bê tông nhựa chặt sử dụng nhựa đường thông thường*, TCVN 13567-1:2022, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2022.

[10]. *Hỗn hợp bê tông nhựa nóng – Thiết kế theo phương pháp Marshall*, TCVN 8820:2011, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2011.

[11]. *Bê tông nhựa – Phương pháp thử – Phần 9: Xác định độ rỗng dư*, TCVN 8860-9:2011, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2011.

[12]. *Bê tông nhựa – Phương pháp thử – Phần 10: Xác định độ rỗng cốt liệu*, TCVN 8860-10:2011, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2011.

[13]. *Bê tông nhựa – Phương pháp thử – Phần 11: Xác định độ rỗng lấp đầy nhựa*, TCVN 8860-11:2011, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2011.

[14]. T. T. C. Hà, "Nghiên cứu thực nghiệm đặc tính Marshall và khả năng kháng lún vệt bánh của hỗn hợp bê tông nhựa sử dụng chất kết dính bitum-epoxy ở Việt Nam," *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, tập 73, số 2, tr. 189–201, 2022. DOI: 10.47869/tcsj.73.2.8.

[15]. N. Q. Phúc, T. T. C. Hà, và N. V. Tường, "Nghiên cứu các thông số của lớp Carboncor Asphalt khi thiết kế kết cấu áo đường mềm ở Việt Nam," *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, tập 75, số 5, tr. 1750–1762, 2024. DOI: 10.47869/tcsj.75.5.4.

[16]. N. T. M. Trà, P. V. Toàn, và N. Q. Phúc, "Đánh giá mức độ biến động của các chỉ tiêu trong quá trình sản xuất và thi công bê tông nhựa chặt polyme," *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, tập 76, số 5, tr. 793–807, 2025. DOI: 10.47869/tcsj.76.5.12.

[17]. *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*, AASHTO M 323-22, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2022.

[18]. F. Leiva and R. West, *Using the Primary Control Sieve Index to Define Gradation Type and as a Factor Related to Asphalt Mixture Properties*, NCAT Report 21-01. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 2021.

[19]. Trung tâm Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải, LAS-XD 1256, *Cơ sở dữ liệu thiết kế thành phần và thí nghiệm bê tông nhựa các dự án ở Việt Nam giai đoạn 2016–2026*, dữ liệu nghiên cứu nội bộ, Hà Nội, 2026.

[20]. R. M. Anderson, P. A. Turner, and R. L. Peterson, *Relationship of Superpave Gyratory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior*, NCHRP Report 478. Washington, DC: Transportation Research Board, 2002.

[21]. H. U. Bahia, T. P. Friemel, P. A. Peterson, J. S. Russell, and B. Poehnelt, "Optimization of constructibility and resistance to traffic: A new design approach for HMA using the Superpave compactor," *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 67, pp. 189–232, 1998.

[22]. *Bê tông nhựa – Phương pháp thử – Phần 5: Xác định tỷ trọng khối, khối lượng thể tích của bê tông nhựa đã đầm nén*, TCVN 8860-5:2011, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2011.