Transport and Communications Science Journal

EVALUATION OF RUTTING AND FATIGUE CRACKING IN FLEXIBLE PAVEMENT STRUCTURES USING HIGH-RAP HOT RECYCLED ASPHALT CONCRETE SURFACE LAYERS

Nguyen Van Hung, Tran Danh Hoi*, Truong Van Quyet

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article
Received: 11/02/2026
Revised: 23/03/2026
Accepted: 10/04/2026
Published online: 15/04/2026
https://doi.org/10.47869/tcsj.77.3.1

* *Corresponding author*
Email: Tdhoi@utc.edu.vn; Tel: +84989539246

Abstract. Rutting and fatigue cracking are the primary distress mechanisms affecting the service life of flexible pavement structures (FPS). This paper focuses on analyzing and predicting the development of these distresses in FPS incorporating a lower surface layer using hot recycled asphalt concrete (HRAC) with high reclaimed asphalt pavement (RAP) contents (30% and 50%) under typical Vietnamese operating conditions. The study adopts a mechanistic–empirical pavement design (MEPD) approach using the AASHTOWare Pavement ME Design software to simulate pavement structural responses under the combined effects of axle loads, operating speed, and region-specific climatic conditions. The results indicate that incorporating a high RAP content in hot-mix asphalt markedly enhances the rutting resistance of the pavement structure compared to conventional asphalt concrete (0% RAP). Although increasing RAP content tends to reduce fatigue cracking resistance for both bottom-up and top-down cracking mechanisms, the impact is negligible within the scope of this study. The study also indicates that increasing the thickness of the lower surface course constructed with hot-mix asphalt containing a high RAP content significantly reduces both rutting damage and the fatigue cracking rate. Furthermore, low traffic speeds together with climatic conditions of high average air temperatures contribute to an increased risk of pavement rutting. Overall, the results demonstrate that HRAC with high RAP content is a feasible and effective solution for flexible pavement structures in Vietnam.

Keywords: recycled asphalt concrete, mechanistic–empirical method, pavement service life, rutting, fatigue cracking.

@ 2026 University of Transport and Communications

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải

ĐÁNH GIÁ HƯ HỎNG LÚN VÀ NỨT MỎI CỦA KẾT CẤU ÁO ĐƯỜNG MỀM CÓ SỬ DỤNG LỚP MẶT BÊ TÔNG NHỰA TÁI CHẾ NÓNG VỚI HÀM LƯỢNG RAP CAO

Nguyễn Văn Hùng, Trần Danh Hợi*, Trương Văn Quyết

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: 11/02/2026
Ngày nhận bài sửa: 23/03/2026
Ngày chấp nhận đăng: 10/04/2026
Ngày xuất bản Online: 15/04/2026
https://doi.org/10.47869/tcsj.77.3.1

* Tác giả liên hệ
Email: Tdhoi@utc.edu.vn; Điện thoại: +84989539246

Tóm tắt. Hằn lún và nứt mỏi là các dạng hư hỏng chủ yếu chi phối tuổi thọ khai thác của kết cấu áo đường mềm (KCAĐM). Bài báo tập trung phân tích, dự báo sự phát triển của các dạng hư hỏng này của KCAĐM sử dụng lớp mặt dưới bằng bê tông nhựa tái chế nóng (BTNTC) với hàm lượng bê tông nhựa mặt đường cũ (RAP) cao (30% và 50%) trong điều kiện khai thác đặc thù tại Việt Nam. Nghiên cứu áp dụng phương pháp cơ học – thực nghiệm (MEPD) thông qua phần mềm AASHTOWare Pavement ME Design nhằm mô phỏng ứng xử kết cấu dưới tác động đồng thời của tải trọng trục xe, vận tốc khai thác và điều kiện khí hậu phân hóa theo vùng. Kết quả cho thấy việc sử dụng BTNTC với hàm lượng RAP cao giúp cải thiện rõ rệt khả năng kháng hằn lún của kết cấu so với bê tông nhựa (BTN) truyền thống (0% RAP). Mặc dù hàm lượng RAP tăng có xu hướng làm suy giảm khả năng kháng nứt mỏi theo cả hai cơ chế nứt từ dưới lên và từ trên xuống, mức độ ảnh hưởng là không đáng kể trong phạm vi nghiên cứu. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng việc tăng chiều dày lớp mặt dưới sử dụng BTNTC với hàm lượng RAP cao giúp giảm đáng kể cả hư hỏng hằn lún và tỷ lệ nứt mỏi. Bên cạnh đó, vận tốc khai thác thấp cùng với điều kiện khí hậu có nhiệt độ không khí trung bình cao làm gia tăng nguy cơ lún mặt đường. Tổng hợp các kết quả cho thấy BTNTC hàm lượng RAP cao là giải pháp khả thi cho KCAĐM tại Việt Nam.

Từ khóa: Bê tông nhựa tái chế, phương pháp cơ học – thực nghiệm, tuổi thọ khai thác, lún, nứt mỏi.

@2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc áp dụng bê tông nhựa tái chế nóng (BTNTC) với tỷ lệ vật liệu mặt đường cũ (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP) lớn hơn 25% đang ngày càng được phổ biến trên thế giới như một giải pháp hướng tới phát triển bền vững và tiết kiệm chi phí vật liệu. Nhật Bản là một trong những quốc gia áp dụng công nghệ này ở quy mô lớn kể từ năm 2013, với tỷ lệ tái chế RAP đạt khoảng 99% vào năm 2015. Tại Hoa Kỳ, đến năm 2022, hầu hết các bang đã tái chế gần như toàn bộ RAP cho hỗn hợp BTN nóng và ấm [1-3]. Tại Liên bang Nga, việc sử dụng RAP được thúc đẩy trong giai đoạn gần đây thông qua các tiêu chuẩn kỹ thuật như PNST 244-2019, cùng với nhiều nghiên cứu và dự án thí điểm. Các kết quả nghiên cứu cho thấy việc đưa RAP vào hỗn hợp BTN với hàm lượng từ 15–40 % là khả thi về mặt kỹ thuật, đặc biệt khi áp dụng cho các lớp mặt dưới, nơi yêu cầu về khả năng chống hằn lún và chống nứt có thể được đảm bảo thông qua thiết kế cấp phối phù hợp và kiểm soát chất lượng RAP [4-6]. Ở Việt Nam, khối lượng RAP phát sinh từ các hoạt động sửa chữa, nâng cấp mặt đường rất lớn (khoảng 12 triệu tấn/năm), việc ứng dụng trước đây chủ yếu dùng công nghệ tái chế nguội làm lớp móng. Tuy nhiên, việc ban hành TCVN 13567-6:2025 cho BTNTC sử dụng RAP từ 25–50 % đã góp phần hình thành nền tảng pháp lý quan trọng để triển khai công nghệ này ở quy mô rộng hơn [1, 7]. Việc gia tăng hàm lượng RAP trong hỗn hợp BTN làm biến đổi đáng kể đặc tính lưu biến của chất kết dính và ứng xử cơ học của lớp mặt đường. Nhựa đường cũ trong RAP đã trải qua quá trình hóa già, dẫn đến gia tăng độ cứng của hỗn hợp BTNTC, qua đó cải thiện khả năng kháng hằn lún nhưng đồng thời làm suy giảm khả năng kháng nứt mỏi [1, 7].

Về vị trí trong kết cấu áo đường mềm (KCAĐM), BTNTC với hàm lượng RAP cao được ưu tiên sử dụng cho các lớp mặt dưới (binder course) và lớp móng (base course), trong khi đối với lớp mặt trên, hàm lượng RAP thường bị khống chế ở mức thấp hơn (thường từ 15 đến 20%) nhằm đảm bảo khả năng kháng nứt và độ bền mỏi, trừ trường hợp có điều chỉnh thiết kế hoặc sử dụng phụ gia tái sinh thích hợp [1-3].

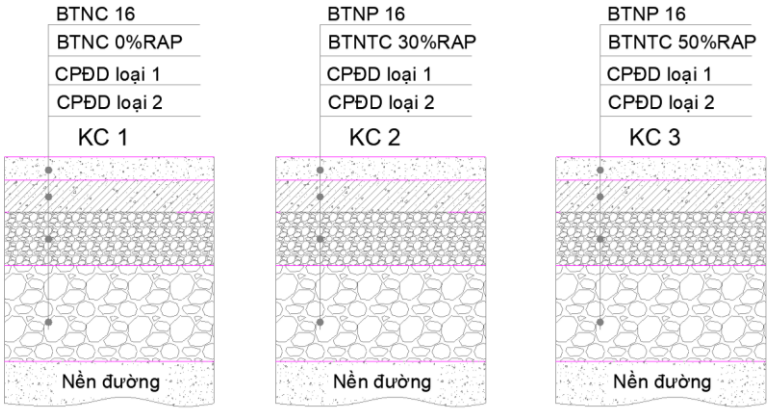
Trong giai đoạn gần đây, xu hướng thiết kế và đánh giá kết cấu mặt đường đang chuyển dịch từ các phương pháp kinh nghiệm truyền thống sang cách tiếp cận cơ học – thực nghiệm (Mechanistic–Empirical Pavement Design – MEPD), cho phép xem xét một cách toàn diện ứng xử của kết cấu dưới tác động đồng thời của tải trọng trục xe và yếu tố môi trường [9]. Tại Việt Nam, các nghiên cứu chuyên sâu về phân tích ứng xử KCAĐM sử dụng lớp mặt BTNTC có xét đến đặc điểm khí hậu, tải trọng của Việt Nam hiện vẫn còn hạn chế. Xuất phát từ những yêu cầu nêu trên, nghiên cứu này tiến hành phân tích và dự báo hư hỏng lún và nứt mỏi của KCAĐM có lớp mặt dưới BTNTC với hàm lượng RAP cao dưới tác động của tải trọng xe chạy và điều kiện khí hậu điển hình của Việt Nam.

2. ĐỀ XUẤT KẾT CẤU ÁO ĐƯỜNG MỀM NGHIÊN CỨU

Trong nghiên cứu này, BTNTC với hàm lượng RAP cao (30% và 50%), lần lượt ký hiệu là BTNTC 30%RAP và BTNTC 50%RAP, được đề xuất sử dụng cho lớp mặt dưới của kết cấu áo đường mềm (KCAĐM). Trong đó, BTNTC được bố trí tại vị trí này nhằm thay thế lớp BTN chặt truyền thống sử dụng nhựa đường 60/70 (ký hiệu BTNC 0% RAP). Trên cơ sở đó, nghiên cứu phân tích tuổi thọ khai thác của KCAĐM có lớp mặt dưới sử dụng vật liệu có đặc tính cơ học khác nhau.

Ba phương án kết cấu áo đường mềm (KCAĐM) mang tính đại diện đã được lựa chọn để phân tích và so sánh (xem Hình 1). Sự khác biệt giữa các phương án chỉ nằm ở loại vật liệu sử dụng cho lớp mặt dưới, trong khi các lớp còn lại của kết cấu đều giống nhau về loại vật liệu và chiều dày. Các phương án kết cấu được xây dựng trên cơ sở các loại vật liệu đã và đang được

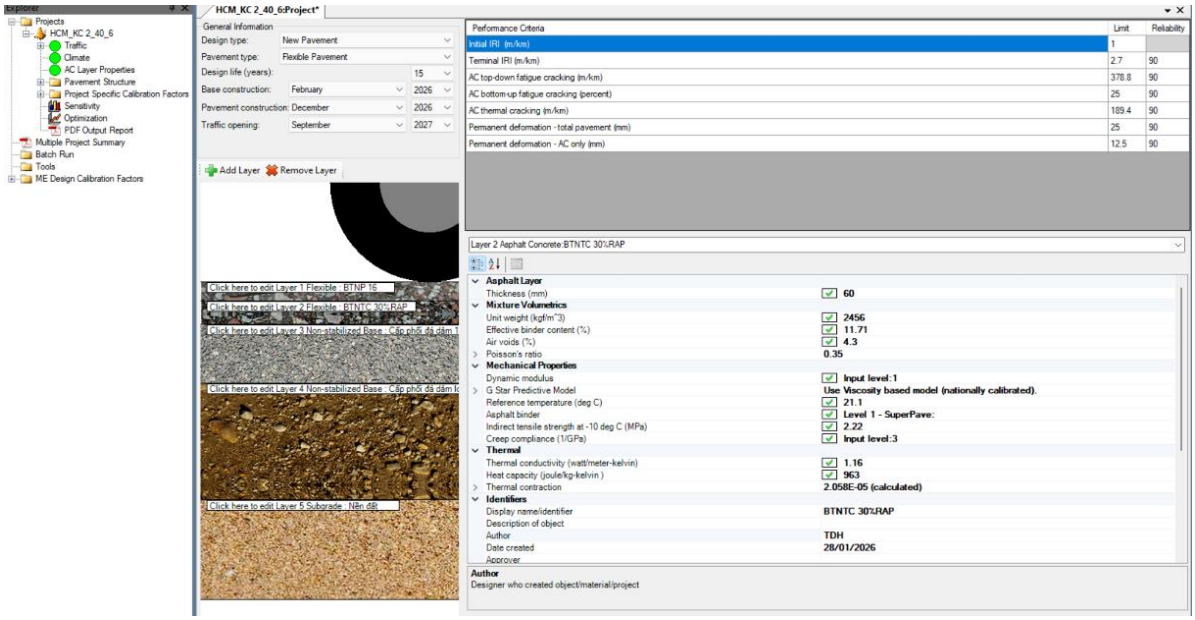
sử dụng phổ biến trong các dự án xây dựng và nâng cấp đường bộ tại Việt Nam thời gian gần đây, qua đó bảo đảm tính thực tiễn và khả năng áp dụng của nghiên cứu.



Hình 1. Các KCAĐM sử dụng trong nghiên cứu.

3. LỰA CHỌN PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO HƯ HỎNG LÚN VÀ NỨT MỎI

Phương pháp MEPD được lựa chọn để dự báo hiện tượng lún vệt bánh xe và nứt mỏi của KCAĐM nhờ khả năng mô phỏng sát cơ chế làm việc thực tế của kết cấu dưới tác động đồng thời của tải trọng giao thông và điều kiện môi trường. Cách tiếp cận này tích hợp phân tích cơ học với các mô hình thực nghiệm, cho phép xác định trạng thái ứng suất – biến dạng trong từng lớp vật liệu của áo đường. Trên cơ sở các đặc trưng cơ học của vật liệu và điều kiện khai thác, sự phát triển hư hỏng được dự báo một cách định lượng theo thời gian khai thác [9]. Nghiên cứu này sử dụng phần mềm AASHTOWare Pavement ME Design để phân tích ứng xử cơ học và dự báo hư hỏng lún, nứt mỏi của KCAĐM theo phương pháp MEPD. Đây là phần mềm đã được sử dụng rộng rãi trong thiết kế mặt đường theo MEPD [10] (xem Hình 2).



Hình 2. Giao diện của phần mềm AASHTOWare Pavement ME Design.

Để so sánh ảnh hưởng của loại cấu tạo lớp mặt dưới, yếu tố khí hậu và vận tốc xe chạy đến hư hỏng lún và nứt mỏi của KCAĐM, đề xuất một số các phương án kết cấu để phân tích như ở Bảng 1.

Bảng 1. Kết cấu áo đường mềm và điều kiện phân tích theo MEPD.

Loại kết cấu	Vật liệu BTNTC làm lớp mặt dưới	Chiều dày lớp BTNTC (cm)	Vận tốc xe chạy (km/h)	Tỉnh/thành phố
KC 1	BTNC 0%RAP	6, 10, 14	40, 80	Hà Giang, Hà Nội, Nghệ An, Tp HCM
KC 2	BTNTC 30%RAP			
KC 3	BTNTC 50%RAP			

4. ĐẶC TRƯNG CỦA VẬT LIỆU

4.1.Đặc trưng cơ lý các lớp BTN

Trong phương pháp phân tích MEPD, các lớp vật liệu trong KCAĐM được đặc trưng thông qua một hệ thống thông số đầu vào nhằm phản ánh đầy đủ trạng thái cấu trúc và đặc tính làm việc của vật liệu dưới tác động đồng thời của tải trọng và điều kiện khí hậu. Các thông số này bao gồm nhóm chỉ tiêu thể tích, như khối lượng thể tích, hàm lượng nhựa có hiệu và độ rỗng dư của hỗn hợp BTN, bên cạnh các đặc trưng cơ học phụ thuộc vào điều kiện làm việc thực tế. Cụ thể, mô đun cắt động của nhựa đường được sử dụng để đặc trưng cho khả năng kháng cắt và chống biến dạng của chất dính kết, trong khi mô đun động của BTN phản ánh ứng xử đàn hồi – nhớt của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng động [9, 10].

Các đặc trưng vật lý của hỗn hợp BTNC 0%RAP, BTNTC 30%RAP và BTNTC 50%RAP, được chế tạo bằng công nghệ trộn nóng trong phòng thí nghiệm, tham khảo công bố [1, 8]. Các thông số thể tích của các hỗn hợp BTN được tổng hợp ở Bảng 2.

Bảng 2. Các đặc trưng thể tích của hỗn hợp BTN.

Hỗn hợp BTN	Khối lượng thể tích (kg/m^3)	Hàm lượng nhựa (theo %KL hỗn hợp)	Hàm lượng nhựa có hiệu, % thể tích	Độ rỗng dư (Va), %	Độ rỗng cốt liệu (VMA), %	Độ rỗng lấp đầy nhựa VFA, %
BTNP 16	2534	5,2	12,74	4,25	15,94	72,55
BTNCTC 30%RAP	2456	5,0	11,71	4,3	14,44	70,19
BTNTC 50%RAP	2424	5,0	11,81	4,64	14,89	68,83
BTNTC 0%RAP	2456	5,0	11,89	4,3	14,06	69,42

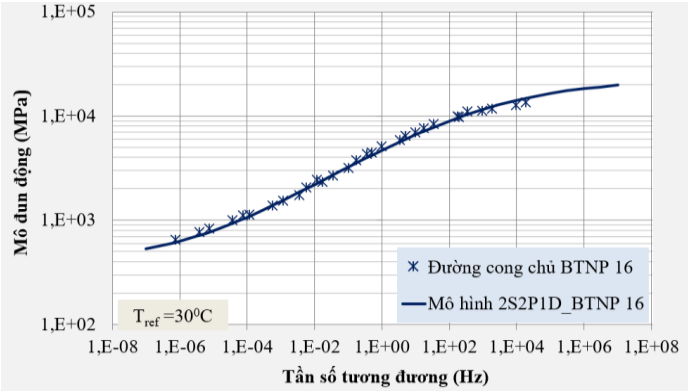
Bảng 3 tổng hợp kết quả thí nghiệm mô đun cắt động và góc lệch pha của các loại nhựa đường tương ứng với các hỗn hợp BTN, bao gồm: BTNP 16; BTNC 0%RAP, BTNTC 30%RAP và BTNTC 50%RAP. Trong đó, nhựa đường 60/70 được sử dụng cho hỗn hợp BTNC 0%RAP và đồng thời được bổ sung vào các hỗn hợp BTNTC.

Bảng 3. Đặc trưng mô đun cắt động và góc lệch pha của nhựa đường.

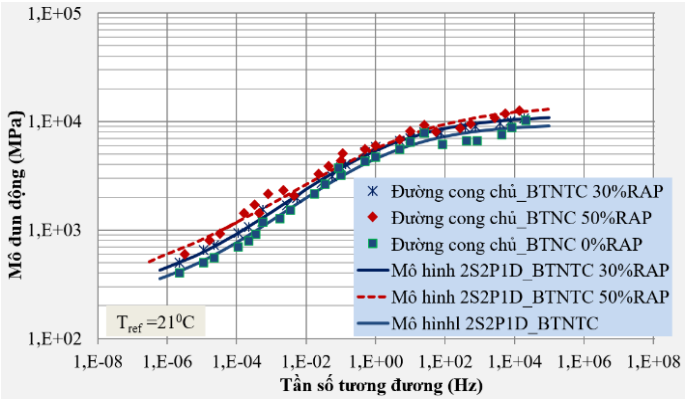
Nhiệt độ thí nghiệm (°C)	Nhựa đường PMB III		Nhựa đường 60/70		Nhựa đường hỗn hợp tương ứng với 30%RAP		Nhựa đường hỗn hợp tương ứng với 50%RAP	
	$\lvert G^*\rvert$ (Pa)	Góc lệch pha (°)	$\lvert G^*\rvert$ (Pa)	Góc lệch pha (°)	$\lvert G^*\rvert$ (Pa)	Góc lệch pha (°)	$\lvert G^*\rvert$ (Pa)	Góc lệch pha (°)
46	19674	48	13743	78	41443	70	47033	68
52	10473	51	6085	79	18454	72	21570	72
58	5991	53	2840	80	6835	75	9564	76
64	3575	57	1357	83	2849	79	4016	80
70	2327	59	669	85	1290	81	1803	83
76	1565	61	346	88	586	85	1043	85
82	1157	63	-	-	288	88	423	88

Giá trị mô đun động của hỗn hợp BTNP 16 sử dụng nhựa đường PMB III được kế thừa từ nghiên cứu [12], trong khi dữ liệu mô đun động của các hỗn hợp BTNTC và BTNC được tổng

hợp từ nghiên cứu [1]. Các giá trị mô đun động được xác định trong một khoảng nhiệt độ và tần số thí nghiệm rộng. Trên cơ sở đó, đường cong chủ của mô đun động được thiết lập, đồng thời dữ liệu thực nghiệm được mô phỏng thông qua mô hình 2S2P1D [13, 14]. Kết quả tương ứng được trình bày trong Hình 3.



a) Bê tông nhựa polymer (BTNP 16)



b) Bê tông nhựa tái chế nóng với hàm lượng RAP cao và BTN đối chứng

Hình 3. Đường cong chủ mô đun động ($|E^*|$) của các hỗn hợp BTN trong nghiên cứu.

Đường cong chủ $|E^*|$ của các hỗn hợp BTN cho phép xác định $|E^*|$ tại các tổ hợp nhiệt độ và tần số tải trọng khác nhau trong phạm vi khảo sát (xem Hình 3a và 3b). Kết quả cho thấy $|E^*|$ của BTNTC tăng theo tần số tải, phản ánh rõ đặc tính đàn hồi – nhớt của vật liệu. So với BTNC 0% RAP, các hỗn hợp BTNTC chứa 30% và 50% RAP đều có $|E^*|$ cao hơn trên toàn bộ dải tần số và nhiệt độ (xem Hình 3b), chủ yếu do ảnh hưởng của nhựa đường lão hóa trong RAP.

Hệ số dịch chuyển a_T để xây dựng đường cong chủ có tương quan chặt chẽ vào nhiệt độ và được xác định theo phương trình Williams–Landel–Ferry (WLF) [13, 14]:

$$\log(a_T) = \frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (1)$$

Trong đó, C_1 và C_2 là các hệ số đặc trưng của vật liệu. Các giá trị của hai hệ số này đối với các loại hỗn hợp BTN sử dụng trong nghiên cứu được tổng hợp trong Bảng 4 [1, 12].

Bảng 4. Các hệ số của phương trình WLF đối với các hỗn hợp BTN.

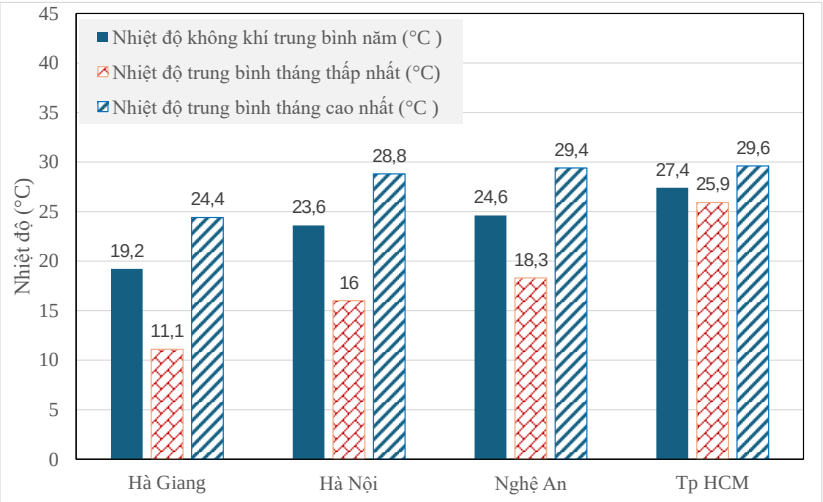
Loại BTN	C_1	C_2
BTNP 16	92,92	611,81
BTNC 0% RAP	38,65	240,57
BTNTC 30% RAP	41,63	265,62
BTNTC 50% RAP	43,53	286,15

4.2.Các thông số đặc trưng của cấp phối đá dăm và nền đường

Để so sánh giữa các phương án kết cấu, các thông số cơ học của CPĐD loại 1, CPĐD loại 2 và nền đất được giả định không thay đổi giữa ba kết cấu được xem xét. Cụ thể, mô đun động của CPĐD loại 1 được lấy bằng 275 MPa, của CPĐD loại 2 bằng 225 MPa, trong khi mô đun động của nền đất được giả định bằng 50 MPa và được sử dụng làm các thông số đầu vào trong phân tích kết cấu theo phương pháp MEPD.

5. ĐẶC ĐIỂM KHÍ HẬU

Trong nghiên cứu này, dữ liệu khí hậu trong giai đoạn 35 năm (từ tháng 01/1985 đến tháng 12/2020) được trích xuất từ bộ dữ liệu MERRA-2 cho các vùng khí hậu khác nhau ở Việt Nam. Trong đó, Hà Giang đại diện cho khu vực có điều kiện nhiệt độ thấp, với nhiệt độ trung bình năm đạt 19,2 °C và nhiệt độ trung bình tháng thấp nhất là 13,3 °C. Hà Nội đặc trưng cho vùng có nhiệt độ trung bình năm ở mức trung bình (23,6 °C), với nhiệt độ trung bình tháng dao động trong khoảng từ 16,0 °C đến 28,8 °C. Nghệ An có nhiệt độ trung bình năm cao (24,6 °C) và biên độ nhiệt năm lớn, thể hiện qua khoảng biến thiên nhiệt độ trung bình tháng từ 18,3 °C đến 29,4 °C. Trong khi đó, Thành phố Hồ Chí Minh (Tp HCM) đại diện cho điều kiện khí hậu nóng và tương đối ổn định quanh năm, với nhiệt độ trung bình năm đạt 27,4 °C và biên độ nhiệt năm nhỏ, khoảng 3,7 °C (xem Hình 4).



Hình 4. Đặc trưng nhiệt độ không khí ở một số địa phương ở Việt Nam (theo dữ liệu nhiệt độ trích xuất từ MERRA-2).

6. QUY MÔ GIAO THÔNG

Số liệu giao thông đầu vào cho phân tích được giả định như trong Bảng 5. Đây là mức quy mô giao thông đại diện trên các tuyến quốc lộ có 2 làn xe ở Việt Nam. Lưu lượng trung bình ngày đêm được tổng hợp cho từng nhóm xe, phân loại theo số trục và tải trọng điển hình, bao gồm các nhóm từ N5 đến N10. Hệ số tăng trưởng giao thông được giả thiết ở mức 5%/năm cho tất cả các nhóm xe.

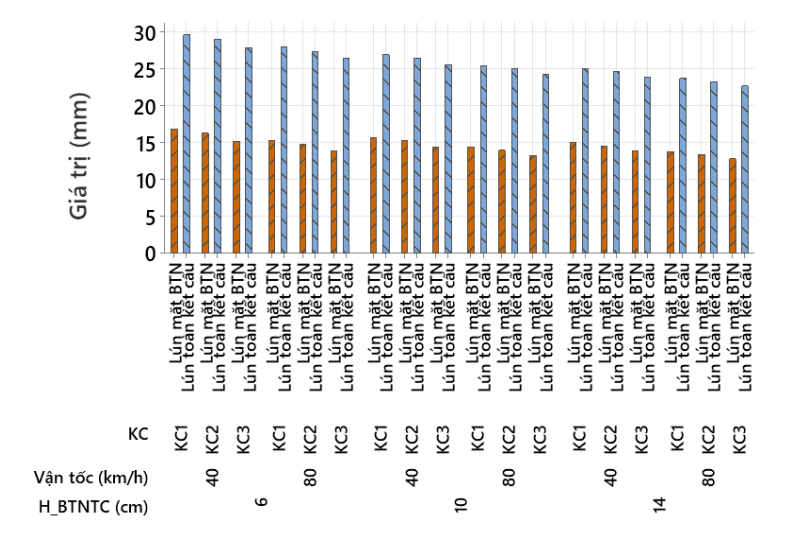
Bảng 5. Quy mô giao thông phân tích.

Loại xe	Nhóm xe	Lưu lượng xe năm đầu (xe/ngđ)	Tỷ lệ các nhóm xe (%)
Xe khách nhỏ	N5	380	66
Xe khách lớn		300	

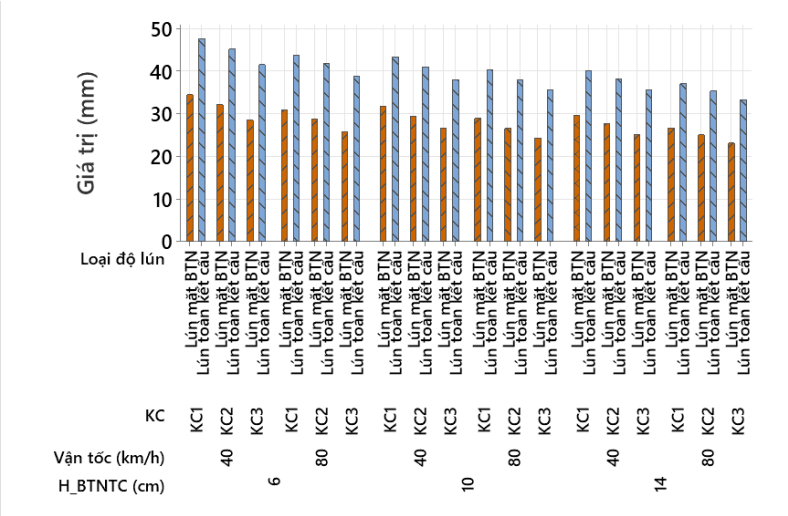
Xe tải nhẹ 2 trục		320	
Xe tải trung 2 trục		320	
Xe tải nặng 3 trục	N6	240	12
Xe tải nặng 4 trục	N8	180	9
Xe container 5 trục	N9	160	8
Xe container 6 trục	N10	100	5
Tổng:	**–**	**2000**	**100**

7. DỰ BÁO VÀ ĐÁNH GIÁ HƯ HỎNG LÚN VÀ NỨT MỎI CỦA KẾT CẤU ÁO ĐƯỜNG MỀM VỚI LỚP MẶT DƯỚI BẰNG BÊ TÔNG NHỰA TÁI CHẾ NÓNG

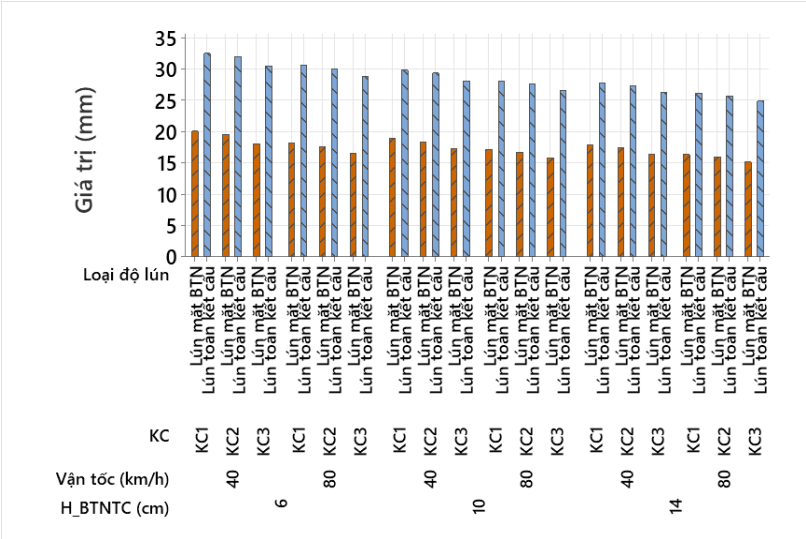
Kết quả dự báo hư hỏng lún của ba phương án KCAĐM khác nhau (KC 1, KC 2 và KC3) theo phương pháp MEPD, là cơ sở quan trọng để đánh giá ảnh hưởng của lớp mặt dưới BTNTC 30%RAP và BTNTC 50%RAP trong điều kiện khai thác cụ thể (xem Hình 5). Hư hỏng lún của KCAĐM được xem xét thông qua các chỉ tiêu lún các lớp BTN và lún toàn KCAĐ, nhằm chỉ ra vai trò của chiều dày lớp mặt dưới, vận tốc xe chạy và sự thay đổi nhiệt độ đối với khả năng kháng lún của áo đường.



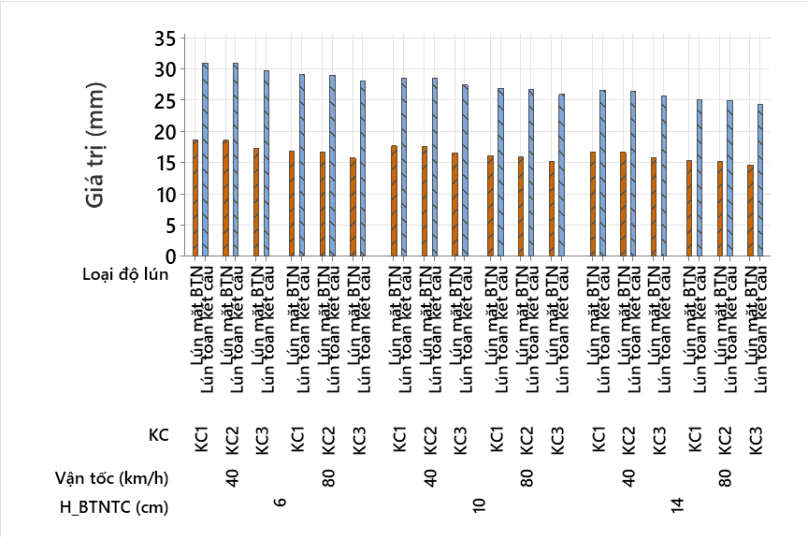
a) Hà Giang



b) Nghệ An



c) Hà Nội



d) Tp HCM

Hình 5. Kết quả dự báo lún đối với các KCAĐM.

Kết quả dự báo cho thấy cả hư hỏng lún lớp BTN và lún toàn KCAĐM có sự khác biệt rõ rệt cả về giá trị lẫn xu hướng biến thiên khi xét đến loại kết cấu, chiều dày lớp mặt và điều kiện khai thác. Từ các các kết quả dự báo lún trên, rút ra một số nhận xét sau:

- Xét trong cùng điều kiện vận tốc và địa điểm xây dựng, độ lún toàn kết cấu luôn lớn hơn lún các lớp BTN, với độ biến thiên trong khoảng 8–15 mm, tùy thuộc vào loại kết cấu và chiều dày lớp mặt dưới. Điều này cho thấy biến dạng vĩnh cửu không chỉ tập trung ở lớp BTN mà còn phát sinh đáng kể trong các lớp móng và nền đường. Ví dụ, đối với kết cấu KC1 tại Hà Giang, khi chiều dày lớp mặt là 6 cm và vận tốc xe 40 km/h, lún các lớp BTN đạt khoảng 16,9 mm, trong khi lún toàn kết cấu lên tới 29,6 mm, tức lớn hơn khoảng 75%. Tỷ lệ này có xu hướng giảm khi chiều dày lớp mặt dưới tăng, phản ánh vai trò của lớp mặt dày hơn trong việc hạn chế truyền ứng suất xuống các lớp bên dưới.

- Tác động của chiều dày lớp BTN thể hiện rõ rệt hơn đối với lún lớp mặt BTN so với lún

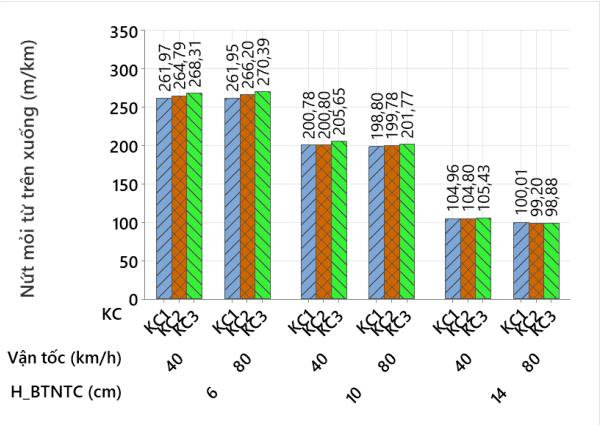
toàn kết cấu. Khi tăng chiều dày lớp mặt dưới từ 6 cm lên 14 cm, giá trị lún lớp BTN giảm trung bình khoảng 10 – 20%, trong khi lún toàn kết cấu chỉ giảm khoảng 5 – 15%, tùy từng phương án kết cấu. Điều này cho thấy việc tăng chiều dày lớp mặt dưới chủ yếu cải thiện khả năng chống biến dạng của các lớp BTN, trong khi hiệu quả giảm lún tổng thể còn phụ thuộc vào đặc tính và chiều dày của các lớp móng.

- So sánh giữa các phương án kết cấu cho thấy, với cùng chiều dày lớp mặt, KC3 luôn cho giá trị lún lớp BTN và lún toàn kết cấu nhỏ hơn KC1 và KC2. Xét với điều kiện khí hậu Hà Nội, chiều dày lớp mặt dưới 10 cm và vận tốc 40 km/h, lún lớp mặt BTN của KC3 nhỏ hơn khoảng 1,2 – 1,7 mm so với KC1 và KC2, đồng thời lún toàn kết cấu cũng giảm khoảng 1,2 – 1,8 mm.

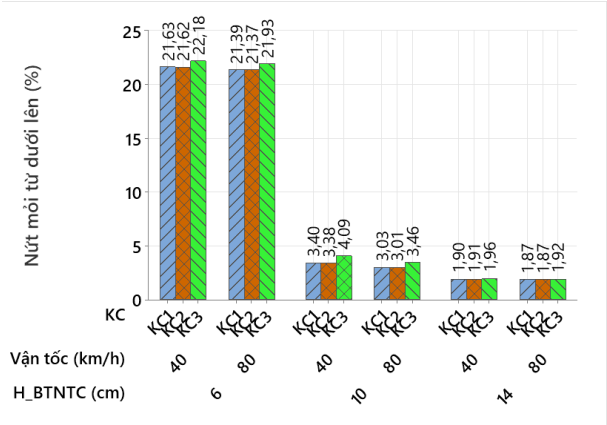
- Ảnh hưởng của vận tốc xe chạy đến độ lún của các lớp BTN và các lớp móng cấp phối đá dăm có sự khác nhau rõ rệt. Khi vận tốc tăng từ 40 km/h lên 80 km/h, độ lún trong các lớp BTN giảm nhẹ, khoảng 10 – 12%, trong khi độ lún của các lớp móng và nền đường gần như không thay đổi. Kết quả này cho thấy việc rút ngắn thời gian tác dụng tải trọng xe chủ yếu làm giảm biến dạng không phục hồi trong các lớp BTN, trong khi ảnh hưởng đến biến dạng tích lũy của các lớp bên dưới là không đáng kể.

Kết quả tổng hợp từ các phân tích cho thấy các kết cấu sử dụng lớp mặt dưới BTNTC với hàm lượng RAP 30% và 50% đều làm giảm rõ rệt độ lún trong các lớp BTN so với kết cấu đối chứng sử dụng BTNC 0% RAP, qua đó khẳng định hiệu quả của việc gia tăng độ cứng và khả năng chịu biến dạng của lớp mặt dưới. Tuy nhiên, phần biến dạng tích lũy phát sinh từ các lớp móng và nền đất trong tổng độ lún kết cấu vẫn dao động trong khoảng 10 – 13 mm và gần như không có sự khác biệt giữa các phương án KC1, KC2 và KC3. Như vậy, giải pháp sử dụng lớp mặt dưới BTNTC với hàm lượng RAP cao chủ yếu phát huy tác dụng trong việc hạn chế lún cục bộ xảy ra tại các lớp mặt, nhưng chưa đủ để kiểm soát lún toàn kết cấu.

Kết quả dự báo nứt mỏi của KCAĐM bao gồm nứt từ trên xuống và từ dưới lên đối với các phương án kết cấu khác nhau về loại vật liệu và chiều dày lớp mặt dưới, vận tốc khai thác và điều kiện khí hậu được thể hiện trong Hình 6, Hình 7, Hình 8 và Hình 9.

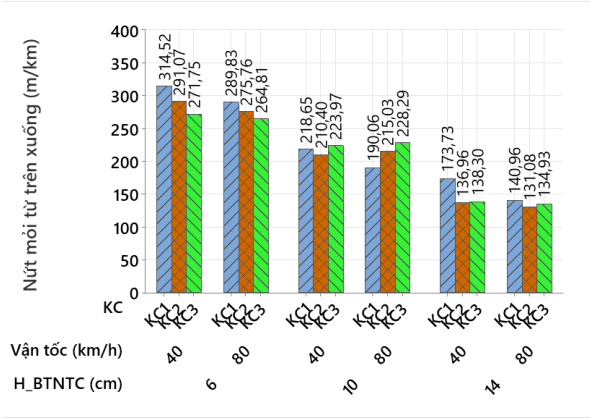


a) Nứt mỏi từ trên xuống

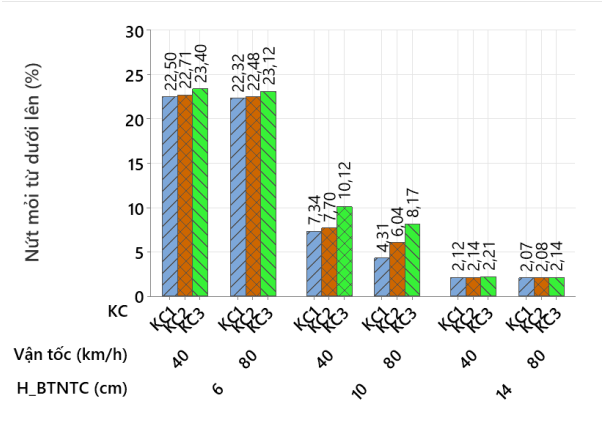


b) Nứt mỏi từ dưới lên

Hình 6. Kết quả dự báo nứt của KCAĐ với điều kiện khí hậu ở Hà Giang.

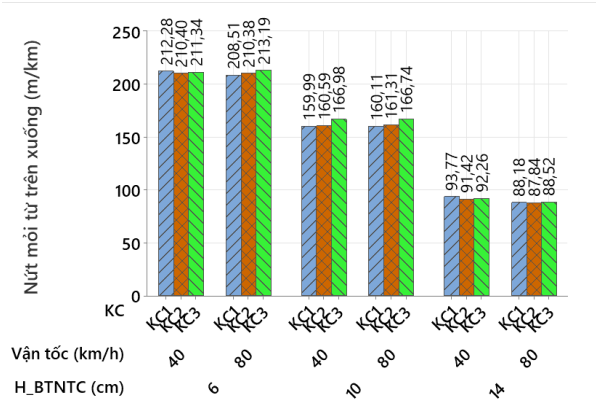


a) Nứt mỏi từ trên xuống

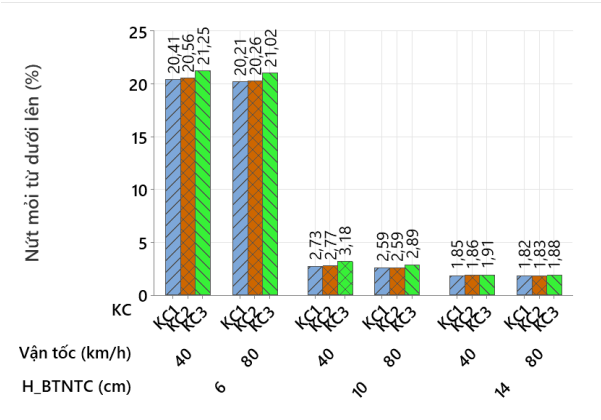


b) Nứt mỏi từ dưới lên

Hình 7. Kết quả dự báo nứt đối của KCAĐ với điều kiện khí hậu ở Nghệ An.

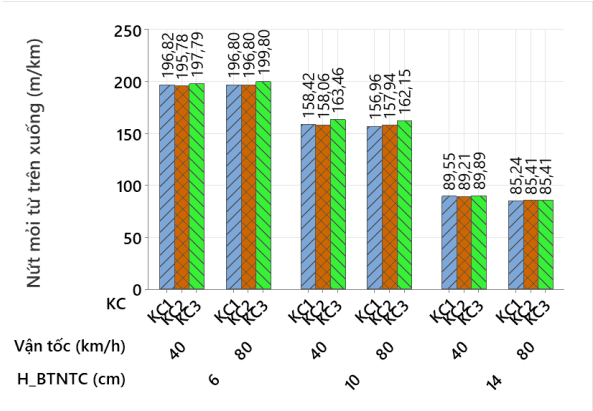


a) Nứt mỏi từ trên xuống

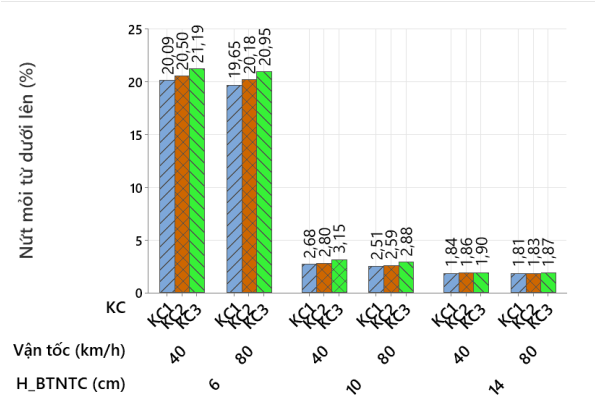


b) Nứt mỏi từ dưới lên

Hình 8. Kết quả dự báo nứt của KCAĐ với điều kiện khí hậu ở Hà Nội.



a) Nứt mỏi từ trên xuống



b) Nứt mỏi từ dưới lên

Hình 9. Kết quả dự báo nứt của KCAĐ trong điều kiện khí hậu ở Tp HCM.

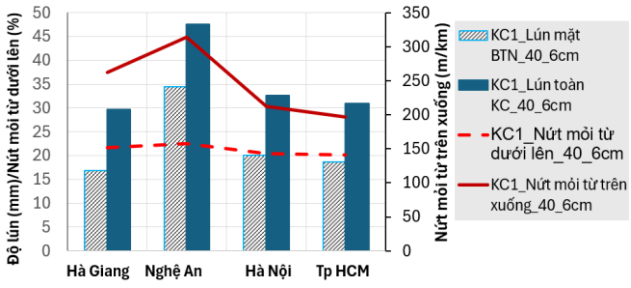
Kết quả dự báo cho thấy hư hỏng nứt mỏi của KCAĐM có xu hướng biến thiên tương đồng khi xét đến loại kết cấu, chiều dày lớp mặt dưới và điều kiện khai thác. Dựa trên các kết quả dự báo về hư hỏng nứt mỏi, có thể đưa ra một số nhận xét sau:

- Xét theo yếu tố chiều dày lớp BTN, cả hai chỉ tiêu nứt đều giảm rõ rệt khi chiều dày lớp mặt dưới tăng. Với chiều dày 6 cm, hư hỏng nứt mỏi đạt mức cao nhất đối với tất cả các phương án kết cấu, trong khi chiều dày tăng lên 10 cm và 14 cm, mức độ nứt giảm mạnh. Xét trong điều kiện khí hậu Hà Giang, tỷ lệ nứt mỏi từ dưới lên giảm từ khoảng 21 – 22% xuống dưới 2% khi chiều dày lớp mặt tăng từ 6 cm lên 14 cm, tương ứng mức giảm xấp xỉ 90%. Trong đó, phần lớn mức suy giảm tập trung ở giai đoạn tăng chiều dày từ 6 cm lên 10 cm (khoảng 80%), trong khi giai đoạn từ 10 cm lên 14 cm chỉ đóng góp thêm khoảng 20%. Đồng thời, chiều dài nứt mỏi từ trên xuống cũng giảm từ khoảng 260 – 270 m/km xuống dưới 105 m/km, tương ứng mức giảm trên 55 – 60%. Tuy nhiên, mức suy giảm trong giai đoạn tăng chiều dày từ 6 cm lên 10 cm chỉ đạt khoảng 23 – 25%, phản ánh mức độ nhạy thấp hơn của cơ chế nứt mỏi từ trên xuống so với nứt mỏi từ dưới lên trong cùng khoảng chiều dày. Xu hướng này có tính đồng nhất tại các khu vực khí hậu khác, cho thấy chiều dày lớp mặt là yếu tố chi phối chủ đạo đối với hư hỏng nứt của KCAĐM.

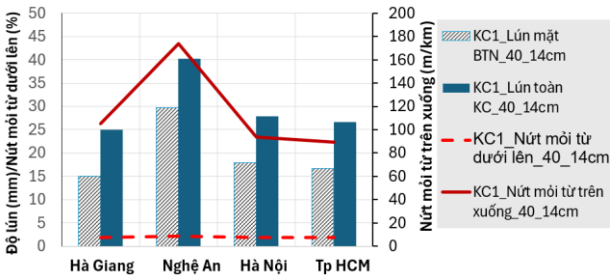
- So sánh giữa các phương án kết cấu, trong cùng điều kiện chiều dày lớp mặt và vận tốc khai thác, các kết cấu sử dụng lớp mặt dưới bằng BTNTC 50%RAP (KC3) nhìn chung mức độ hư hỏng nứt mỏi cao hơn so với KC1 và KC2. Đối với nứt mỏi từ dưới lên, chênh lệch giữa KC3 và các phương án còn lại thường dao động trong khoảng 1 – 3%, trong khi nứt mỏi từ trên xuống của KC3 lớn hơn khoảng 5 – 20 m/km, tùy thuộc vào chiều dày lớp mặt và điều kiện khí hậu. Tuy nhiên, trong điều kiện khí hậu Nghệ An, nứt mỏi từ trên xuống lại có xu hướng khác biệt. Cụ thể, KC1 thường cho giá trị chiều dài vết nứt lớn hơn so với KC2 và KC3 trong đa số trường hợp, với mức chênh lệch dao động khoảng 10 – 40 m/km. Về cơ chế, xu hướng trên có thể được giải thích dựa trên cơ học vật liệu. Việc sử dụng BTNTC 50%RAP làm gia tăng độ cứng của hỗn hợp, qua đó làm giảm biến dạng kéo tại đáy các lớp BTN. Tuy nhiên, loại vật liệu này lại có khả năng chịu kéo uốn và kháng nứt mỏi thấp hơn so với BTNTC 30%RAP và BTNC 0%RAP. Do đó, mặc dù trạng thái biến dạng kéo được cải thiện, sự suy giảm khả năng kháng nứt chiếm ưu thế, dẫn đến tốc độ tích lũy hư hỏng nứt mỏi tăng lên, đặc biệt đối với hư hỏng nứt mỏi từ dưới lên. Như vậy, xét tổng thể, mức độ nứt mỏi của KC3 vẫn cao hơn so với KC1 và KC2, mặc dù có những sai khác cục bộ đối với nứt mỏi từ trên xuống trong điều kiện khí hậu tại Nghệ An.

- Ảnh hưởng của vận tốc xe chạy thể hiện theo cùng xu hướng đối với cả hai dạng nứt mỏi. Khi vận tốc tăng từ 40 km/h lên 80 km/h, mức độ hư hỏng có xu hướng giảm nhẹ, phản ánh tác động của thời gian tác dụng tải đến quá trình tích lũy hư hỏng mỏi trong lớp BTN. Đối với nứt mỏi từ dưới lên, mức giảm thường dao động trong khoảng 2 – 5%, trong khi đối với nứt mỏi từ trên xuống, chiều dài vết nứt giảm khoảng 3 – 10 m/km, tùy thuộc vào chiều dày lớp mặt dưới và điều kiện khí hậu.

Nhằm đánh giá tổng hợp tác động của điều kiện khí hậu đến hư hỏng lún và nứt mỏi của KCAĐM, các kết quả được trình bày chung trên một biểu đồ, tạo điều kiện thuận lợi cho việc so sánh và phân tích (xem Hình 10–12).

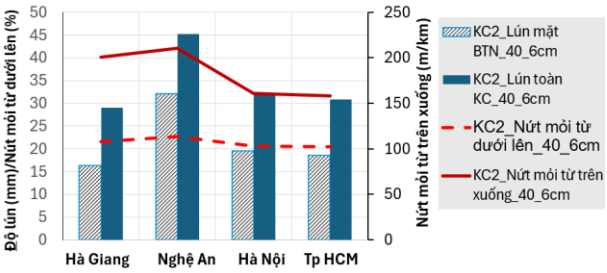


a) BTNC 0%RAP dày 6 cm

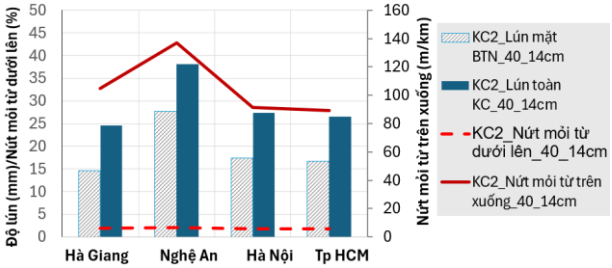


b) BTNC 0%RAP dày 14 cm

Hình 10. Kết quả dự báo hư hỏng lún và nứt của KC1.

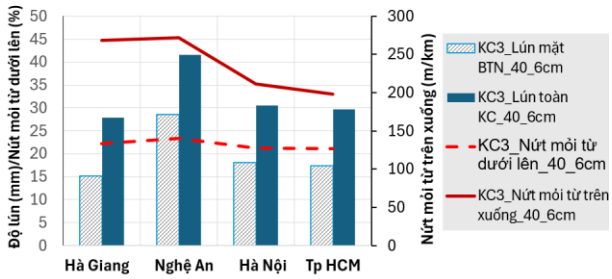


a) BTNTC 30%RAP dày 6 cm

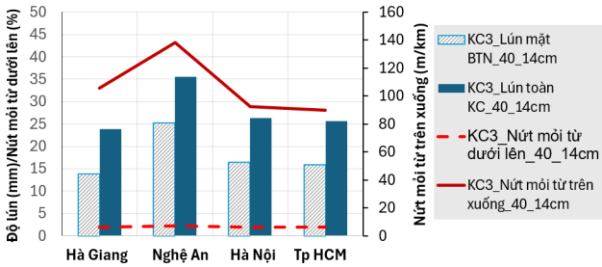


b) BTNTC 30%RAP dày 14 cm

Hình 11. Kết quả dự báo hư hỏng lún và nứt của KC2.



a) BTNTC 50%RAP dày 6 cm



b) BTNTC 50%RAP dày 14 cm

Hình 12. Kết quả dự báo lún và nứt mỏi của KC3.

Từ các kết quả dự báo hư hỏng lún và nứt mỏi được thể hiện đồng thời trên các biểu đồ (Hình 10–12), có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Độ lún (bao gồm lún lớp mặt BTN và lún toàn kết cấu) chịu ảnh hưởng rõ rệt của điều kiện khí hậu, đặc biệt là nhiệt độ không khí. Trong cả ba phương án KC1, KC2 và KC3, khu vực Nghệ An luôn có giá trị lún dự báo lớn nhất, với độ lún toàn kết cấu cao hơn khoảng 45 – 60% so với Hà Giang và 35 – 50% so với Hà Nội và Tp HCM. Điều này phản ánh tác động bất lợi của nhiệt độ cao đến khả năng kháng lún của BTN. Ngược lại, Hà Giang có mức độ lún thấp hơn do đặc trưng nhiệt độ trung bình thấp. Đáng chú ý, xu hướng này vẫn được duy trì ngay cả khi tăng chiều dày lớp mặt dưới hoặc sử dụng RAP với hàm lượng từ 30% đến 50%.

- Mức độ phát triển của hai cơ chế nứt mỏi (từ trên xuống và từ dưới lên) thể hiện sự khác

biệt rõ rệt giữa các vùng khí hậu. Kết quả dự báo cho thấy Nghệ An có mức độ nứt mỏi lớn nhất, trong khi Hà Nội và Tp HCM ghi nhận mức nứt mỏi thấp và xấp xỉ nhau; Hà Giang nằm ở mức trung gian, thấp hơn so với Nghệ An nhưng mức độ không đáng kể khi chiều dày lớp mặt BTNTC bằng 6 cm. Hiện tượng này có thể được lý giải dưới góc độ cơ học, theo đó sự phát triển của nứt mỏi phụ thuộc đồng thời vào biến dạng kéo và khả năng kháng mỏi của các lớp BTN, trong đó cả hai đều biến thiên theo nhiệt độ. Khi nhiệt độ tăng, mô đun động của BTN giảm, làm giảm độ cứng của vật liệu và dẫn đến gia tăng biến dạng kéo dưới tác dụng của tải trọng. Ngược lại, ở nhiệt độ thấp, mô đun tăng nhưng BTN trở nên giòn hơn, khả năng chịu biến dạng kéo giảm, do đó dễ phát sinh nứt mỏi. Ngoài ra, biên độ dao động nhiệt theo mùa còn thúc đẩy quá trình lão hóa của nhựa đường, làm thay đổi liên tục trạng thái lưu biến của BTN theo thời gian, từ đó ảnh hưởng đến tuổi thọ mỏi của kết cấu. Tại Nghệ An, sự kết hợp giữa nền nhiệt cao kéo dài và biên độ nhiệt theo mùa lớn làm suy giảm đáng kể mô đun động của các lớp BTN, dẫn đến gia tăng biến dạng kéo dưới tác dụng tải trọng; hệ quả là cả hai cơ chế nứt mỏi từ dưới lên và từ trên xuống đều phát triển mạnh. Ngược lại, tại Tp HCM, mặc dù có nhiệt độ trung bình cao, điều kiện nhiệt tương đối ổn định quanh năm giúp BTN duy trì trạng thái cơ học ổn định hơn và khả năng chịu biến dạng kéo tốt hơn, do đó mức độ nứt mỏi thậm chí còn tương đương hoặc thấp hơn so với các khu vực khí hậu khác. Đối với Hà Nội, kết cấu áo đường thường làm việc trong các dải nhiệt độ trung bình với sự dao động theo mùa rõ rệt; trong điều kiện này, biến dạng kéo không lớn như tại Nghệ An, nhưng khả năng kháng mỏi của BTN cũng không cao như trong điều kiện nhiệt ổn định của Tp HCM, dẫn đến mức độ nứt mỏi tổng hợp tương đương với khu vực này. Trong khi đó, tại Hà Giang, thời gian làm việc của kết cấu ở nhiệt độ trung bình và thấp chiếm ưu thế làm giảm biến dạng kéo nhưng đồng thời làm tăng tính giòn của vật liệu BTN, khiến mức nứt mỏi cao hơn so với Hà Nội và Tp HCM, song vẫn thấp hơn so với Nghệ An.

8. KẾT LUẬN

Từ các kết quả phân tích cơ học – thực nghiệm cho các KCAĐM sử dụng hàm lượng RAP cao với các điều kiện khai thác và khí hậu khác nhau, có thể rút ra một số kết luận sau:

- Việc gia tăng hàm lượng RAP trong BTNTC làm tăng mô đun động của hỗn hợp do ảnh hưởng của nhựa đường cũ bị già hóa. Kết quả phân tích kết cấu theo phương pháp cơ học – thực nghiệm cho thấy các kết cấu sử dụng lớp mặt dưới BTNTC với hàm lượng RAP từ 30% đến 50% có khả năng kháng hằn lún vượt trội so với kết cấu truyền thống không sử dụng RAP, đặc biệt đối với biến dạng lún trong các lớp BTN, với mức giảm trung bình kh10 –20%.

- Các kết cấu áo đường mềm sử dụng lớp mặt dưới bằng BTNTC với hàm lượng RAP cao có xu hướng làm gia tăng mức độ hư hỏng nứt mỏi đối với cả hai cơ chế nứt từ trên xuống và từ dưới lên. Tuy nhiên, mức suy giảm khả năng kháng nứt mỏi khi sử dụng BTNTC với hàm lượng RAP đến 50% là tương đối nhỏ, với mức gia tăng nứt mỏi từ dưới lên chỉ khoảng 1 – 3% và chiều dài nứt mỏi từ trên xuống tăng khoảng 5 – 20 m/km. Kết quả này cho thấy giải pháp sử dụng BTNTC hàm lượng RAP cao vẫn đáp ứng yêu cầu về độ bền mỏi trong các điều kiện khí hậu nghiên cứu (Hà Giang, Hà Nội, Nghệ An và Tp HCM).

- Chiều dày lớp BTNTC có ảnh hưởng đáng kể đến tuổi thọ của kết cấu. Việc gia tăng chiều dày này không chỉ làm giảm rõ rệt hư hỏng hằn lún mà còn góp phần hạn chế mạnh sự phát triển của cả hai dạng nứt mỏi. Bên cạnh đó, vận tốc khai thác thấp (40 km/h) làm tăng biến dạng hằn lún trong các lớp BTN so với trường hợp tốc độ khai thác cao (80 km/h) từ 10 – 12%, nhưng không làm thay đổi độ lún của các lớp móng cấp phối đá dăm và nền đường.

- Điều kiện khí hậu có ảnh hưởng rõ rệt đến sự phát triển các dạng hư hỏng của kết cấu áo

đường mềm. Kết quả phân tích cho thấy Nghệ An được dự báo có mức độ hư hỏng lớn nhất ở cả hai dạng hư hỏng lún và nứt mỏi; trong khi đó, Hà Giang có độ lún nhỏ hơn nhưng lại tiềm ẩn nguy cơ nứt mỏi cao hơn. Xu hướng này cho thấy các khu vực có nhiệt độ cao làm gia tăng biến dạng lún và nứt mỏi do suy giảm mô đun động của BTN, trong khi các khu vực có nhiệt độ thấp làm tăng nguy cơ nứt mỏi do suy giảm khả năng kháng nứt của vật liệu. Do đó, việc lựa chọn hàm lượng RAP và chiều dày lớp mặt BTN, bên cạnh yêu cầu phù hợp với điều kiện khai thác, cần được xem xét trong mối quan hệ với đặc trưng khí hậu của từng khu vực nhằm đảm bảo tuổi thọ của KCAĐM.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Trương Văn Quyết, Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng RAP và phụ gia tái sinh đến tính năng của bê tông asphalt tái chế nóng dùng trong xây dựng đường ô tô ở Việt Nam, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội, Việt Nam, 2025.

[2]. R. Izaks, V. Haritonovs, I. Klasa, M. J. P. E. Zaumanis, Hot mix asphalt with high RAP content. Procedia Engineering, 114 (2015) 676-684. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.009

[3]. A. K. Arshad, H. Awang, E. Shaffie, W. Hashim & Z. Abd Rahman, Performance evaluation of hot mix asphalt with different proportions of RAP content, In E3S Web of Conferences, 34 (2018). https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183401026

[4]. Т. В. Скрыпник, and А. В. Хоролец, Опыт применения регенерированной асфальтобетонной смеси для ремонта покрытия автомобильных дорог (Experience with the use of reclaimed asphalt concrete mixture for repairing road surfaces), Вести Автомобильно-дорожного института, 2 (2020) 48-54.

[5]. П. Н. Полудницына, А. В. Бердник, К. А. Лукина, Использование Регенерированного Асфальтогранулята В Новых Асфальтобетонных Смесях (Use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in New Asphalt Mixtures), Неделя науки ИСИ, 2021.

[6]. Федеральное Агентство По Техническому Регулированию И Метрологии, Переработанный асфальтобетон (RAP) (Reclaimed Asphalt Concrete (RAP): Technical Specifications), Технические условия - ПНСТ 244, 2019.

[7]. Bộ Khoa học Công nghệ, TCVN 13567-6 : 2025 - Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng-Thi công và nghiệm thu - Phần 6: Bê tông nhựa chặt tái chế nóng tại trạm sử dụng hàm lượng vật liệu cũ từ trên 25% đến 50%, 2025.

[8]. Trương Văn Quyết, Nguyễn Ngọc Lân, Đào Văn Đông, Nghiên cứu thực nghiệm mô đun động của bê tông asphalt tái chế nóng có hàm lượng RAP cao và phụ gia tái sinh, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 75 (2024) 2371-2384. https://doi.org/10.47869/tcsj.75.9.11

[9] R. L. Baus, N. R. Stires, Mechanistic-empirical pavement design guide implementation (No. FHWA-SC-10-01), University of South Carolina, Dept. of Civil & Environmental Engineering, 2010

[10] O. Kaya, Investigation of AASHTOWare Pavement ME design/Darwin-ME TM performance prediction models for Iowa pavement analysis and design, Master's thesis, Iowa State University, 2015.

[11] Trần Danh Hợi, Nguyễn Quang Phúc, Phân tích một số kết cấu mặt đường mềm cấp cao ở Việt Nam theo phương pháp cơ học - thực nghiệm, Tạp chí Giao thông vận tải, số tháng 1+2 (2019) 65-68.

[12]. Trần Danh Hợi, Nghiên cứu hỗn hợp đá – nhựa nóng cường độ cao dùng trong kết cấu mặt đường ô tô cấp cao ở Việt Nam, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Giao thông vận tải, 2019.

[13]. F. Olard, H. D. Benedetto, General 2S2P1D model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes, Road Materials and Pavement Design, 4 (2003) 185-224. https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946

[14]. H.D. Benedetto, F. Olard, C. Sauzéat, B. Delaporte, Linear viscoelastic behavior of bituminous materials: from binders to mixes, Road Materials and Pavement Design, 5 (2004) 163-202. https://doi.org/10.1080/14680629.2004.9689992