

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

VŨ TRUNG HIẾU

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN CHIỀU SÂU  
LÚN VỆT BÁNH XE LỚP BÊ TÔNG NHỰA MẶT ĐƯỜNG Ô TÔ  
TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - NĂM 2023

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

VŨ TRUNG HIẾU

**NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN CHIỀU SÂU  
LÚN VỆT BÁNH XE LỚP BÊ TÔNG NHỰA MẶT ĐƯỜNG Ô TÔ  
TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM**

Chuyên ngành : Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông

Mã số : 9 58 02 05

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- 1. GS. TS. Phạm Cao Thăng**
- 2. PGS.TS. Nguyễn Quang Phúc**

**HÀ NỘI, 2023**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là đề tài nghiên cứu do tôi thực hiện. Các số liệu, kết quả trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

**TẬP THỂ HƯỚNG DẪN**

*Hà Nội, tháng      năm 2023*

**Người hướng dẫn 1**

**Người hướng dẫn 2**

**Nghiên cứu sinh**

**GS.TS. Phạm Cao Thăng**

**PGS.TS. Nguyễn Quang Phúc**

**Vũ Trung Hiếu**

## LỜI CẢM ƠN

Bằng tình cảm chân thành nhất, NCS xin được nói lời tri ân sâu sắc đến GS.TS. Phạm Cao Thăng và PGS.TS. Nguyễn Quang Phúc - những người Thầy đã tận tình hướng dẫn, định hướng khoa học và giúp đỡ tôi trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu để hoàn thành luận án.

NCS xin gửi lời cảm ơn tới Đảng ủy, Ban giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, Phòng Sau đại học, Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Bộ môn Cầu đường Sân bay đã tạo điều kiện thuận lợi nhất cho NCS trong suốt quá trình học tập và hoàn thành luận án.

NCS xin bày tỏ lòng biết ơn tới Đảng ủy, Ban giám hiệu trường Đại học Công nghệ GTVT, Phòng KHCN&HTQT, Khoa Công trình, Trung tâm thí nghiệm Đường bộ cao tốc, Phòng thí nghiệm LAS-XD72, các bạn đồng nghiệp, đặc biệt là TS. Trần Ngọc Hưng và ThS. Vũ Thế Thuận đã tận tình giúp đỡ, cung cấp tài liệu, số liệu, vật liệu và tạo điều kiện trong quá trình thí nghiệm, giúp NCS hoàn thành luận án này.

NCS xin chân thành cảm ơn các chuyên gia trong lĩnh vực đường bộ, vật liệu đã cho NCS những đóng góp quý báu trong quá trình thực hiện luận án này.

Cho phép NCS chân thành cảm tạ và bày tỏ lòng biết ơn tới gia đình, anh em, bạn bè, đồng nghiệp đã luôn đồng hành, dành cho tôi rất nhiều sự giúp đỡ, động viên, khích lệ trong quá trình học tập, nghiên cứu.

NCS sẽ luôn khắc ghi trong lòng những tình cảm và công lao ấy.

**Nghiên cứu sinh**

**Vũ Trung Hiếu**

## MỤC LỤC

<b>LỜI CAM ĐOAN .....</b>	<b>i</b>
<b>LỜI CẢM ƠN .....</b>	<b>ii</b>
<b>DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT .....</b>	<b>vii</b>
<b>DANH MỤC BẢNG SỐ LIỆU .....</b>	<b>viii</b>
<b>DANH MỤC HÌNH VẼ .....</b>	<b>x</b>
<b>PHẦN MỞ ĐẦU .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Sự cần thiết của vấn đề nghiên cứu .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Mục đích và nội dung nghiên cứu.....</b>	<b>2</b>
2.1.Mục đích nghiên cứu: .....	2
2.2. Nội dung nghiên cứu:.....	2
<b>3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu: .....</b>	<b>3</b>
<b>4. Phương pháp nghiên cứu.....</b>	<b>3</b>
<b>5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án.....</b>	<b>3</b>
<b>6. Bố cục luận án.....</b>	<b>3</b>
<b>CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN TÌNH TRẠNG LÚN VẾT BÁNH XE LỚP BTN MẶT ĐƯỜNG VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN DỰ BÁO CHIỀU SÂU LÚN VẾT BÁNH XE .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Sự làm việc của lớp BTN mặt đường chịu tải trọng bánh xe.....</b>	<b>5</b>
1.1.1. Ứng xử của lớp BTN dưới tác dụng của tải trọng bánh xe.....	5
1.1.2. Khái niệm biến dạng không hồi phục lớp BTN mặt đường .....	6
<b>1.2. Tình trạng hư hỏng LVBX lớp BTN trong nước và trên thế giới ... .....</b>	<b>9</b>
1.2.1. Hư hỏng LVBX lớp BTN tại Việt Nam .....	9
1.2.2. Hư hỏng LVBX lớp BTN trên thế giới.....	10
<b>1.3. Tổng quan các phương pháp tính toán biến dạng lún lớp BTN trong nước và trên thế giới.....</b>	<b>12</b>

1.3.1.	<i>Phương pháp tính toán biến dạng cắt trượt, hần lún lớp BTN theo nguyên lý cơ học môi trường rời</i> .....	12
1.3.2.	<i>Phương pháp tính toán lý thuyết biến dạng lún lớp BTN theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục</i> .....	21
1.3.3.	<i>Tính toán biến dạng lún lớp BTN theo phương pháp thực nghiệm</i>	29
1.3.4.	<i>Tính toán biến dạng LVBX lớp BTN theo phương pháp cơ học thực nghiệm</i> .....	34
1.3.5.	<i>Chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán trong lớp BTN</i> .....	36
1.3.6.	<i>Chiều sâu LVBX cho phép</i> .....	37
<b>1.4.</b>	<b>Tình hình nghiên cứu biến dạng LVBX lớp BTN tại Việt Nam .....</b>	<b>38</b>
1.4.1.	<i>Nghiên cứu về hư hỏng LVBX trong lớp BTN</i> .....	38
1.4.2.	<i>Nghiên cứu về kiểm toán, tính toán LVBX trong lớp BTN</i> .....	40
<b>1.5.</b>	<b>Tổng quan các giải pháp khác khắc phục lún lớp BTN trong nước và các nước trên thế giới</b> .....	<b>41</b>
1.5.1.	<i>Các giải pháp khác khắc phục lún lớp BTN trên thế giới</i> .....	41
1.5.2.	<i>Các giải pháp khác khắc phục lún lớp BTN tại Việt Nam</i> .....	43
<b>1.6.</b>	<b>Những vấn đề cần nghiên cứu về biến dạng LVBX trong lớp BTN trong điều kiện Việt Nam.</b> .....	<b>45</b>
<b>1.7.</b>	<b>Lựa chọn nội dung nghiên cứu của luận án</b> .....	<b>45</b>
<b>CHƯƠNG 2. PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH ĐÀN NHÓT ĐỂ CỦA BÊ TÔNG NHỰA TRONG TÍNH TOÁN CHIỀU SÂU LVBX LỚP BÊ TÔNG NHỰA MẶT ĐƯỜNG</b> .....		<b>46</b>
<b>2.1.</b>	<b>Cơ chế hình thành biến dạng LVBX lớp BTN mặt đường</b> .....	<b>46</b>
2.1.1	<i>Mô hình tải trọng tác dụng lên lớp BTN mặt đường</i> .....	46
2.1.2	<i>Cơ chế hình thành LVBX lớp BTN mặt đường</i> .....	48

2.1.3	<i>Phân loại LVBX theo hình dạng và kích thước vết lún</i> .....	51
<b>2.2.</b>	<b>Phân tích đặc tính đàn nhót dẻo vật liệu BTN phục vụ tính toán LVBX của lớp BTN mặt đường</b> .....	<b>53</b>
2.2.1.	<i>Mô hình cơ học vật liệu BTN dưới tác dụng của tải trọng động</i> .	53
2.2.2.	<i>Mô đun đàn hồi động của vật liệu BTN</i> .....	55
<b>2.3.</b>	<b>Thí nghiệm xác định hệ số nhót hỗn hợp BTN</b> .....	<b>64</b>
2.3.1.	<i>Các phương pháp thí nghiệm xác định hệ số nhót của BTN</i> .....	64
2.3.2.	<i>Thí nghiệm xác định hệ số nhót của BTN hiện có tại Việt Nam</i> ..	69
<b>2.4.</b>	<b>Kết luận chương 2</b> .....	<b>78</b>
<b>CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN CHIỀU SÂU LVBX LỚP BTN MẶT ĐƯỜNG TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM</b> .....		
		<b>80</b>
<b>3.1.</b>	<b>Cơ sở lý thuyết tính toán LVBX lớp BTN mặt đường</b> .....	<b>80</b>
<b>3.2.</b>	<b>Đánh giá độ tin cậy của phương pháp tính toán đề xuất</b> .....	<b>89</b>
3.2.1	<i>Tính toán chiều sâu hần lún theo phương pháp đề xuất</i> .....	89
3.2.2	<i>Tính toán so sánh với phương pháp tính theo quy trình của Nga</i>	96
<b>3.3.</b>	<b>Tính toán xác định chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán trong lớp BTN trong điều kiện Việt Nam</b> .....	<b>99</b>
3.3.1	<i>Tính toán chiều sâu vùng biến dạng dẻo phụ thuộc tải trọng, áp lực trục xe tiêu chuẩn và nhiệt độ</i> .....	100
3.3.2	<i>Tính toán chiều sâu vùng biến dạng dẻo theo chiều sâu phụ thuộc nhiệt độ môi trường và lưu lượng trục xe khai thác</i> .....	102
<b>3.4.</b>	<b>Kết luận chương 3</b> .....	<b>113</b>
<b>CHƯƠNG 4. ỨNG DỤNG TÍNH TOÁN LVBX LỚP BTN TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM</b> .....		
		<b>115</b>
<b>4.1.</b>	<b>Ứng dụng tính toán LVBX một số tuyến đường thực tế tại Việt Nam</b> .....	<b>115</b>

4.1.1	<i>Áp dụng tính LVBX cho kết cấu áo đường QL.1 đoạn qua tỉnh Ninh Bình .....</i>	115
4.1.2	<i>Áp dụng tính LVBX cho kết cấu áo đường QL.1 đoạn qua tỉnh Thanh Hóa.....</i>	119
4.1.3	<i>Khảo sát đánh giá ảnh hưởng của cường độ lớp móng và nền đến chiều sâu LVBX lớp BTN mặt đường .....</i>	122
<b>4.2.</b>	<b>Đề xuất áp dụng các giải pháp hạn chế LVBX lớp BTN trong điều kiện Việt Nam .....</b>	<b>127</b>
4.2.1	<i>Giải pháp cấu tạo các lớp kết cấu áo đường .....</i>	128
4.2.2	<i>Lựa chọn loại BTN có cường độ kháng hàn lún đáp ứng yêu cầu khai thác .....</i>	129
4.2.3	<i>Quản lý khai thác liên quan đến điều kiện khí hậu nắng nóng của Việt Nam.....</i>	130
4.2.4	<i>Áp dụng quy định kiểm soát tải trọng trục các phương tiện.....</i>	132
4.2.5	<i>Tăng cường quản lý chất lượng thi công lớp BTN mặt đường ..</i>	135
4.2.6	<i>Kiến nghị áp dụng quy định tính toán chiều sâu LVBX trong tính toán thiết kế kết cấu áo đường có sử dụng lớp BTN.....</i>	136
<b>4.3.</b>	<b>Kết luận chương 4.....</b>	<b>139</b>
	<b>KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ .....</b>	<b>140</b>
1.	<b>Những kết quả chính và đóng góp mới của luận án .....</b>	<b>140</b>
2.	<b>Những tồn tại hạn chế của kết quả nghiên cứu.....</b>	<b>141</b>
3.	<b>Kiến nghị những nghiên cứu tiếp theo .....</b>	<b>141</b>
	<b>DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ....</b>	<b>142</b>
	<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>	<b>143</b>



## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

AC	Asphalt Concrete - Bê tông nhựa
AASHTO	American Association of State Highway Transportation Officials - Hiệp hội Quan chức Giao thông và Xa lộ Tiểu bang Mỹ
ASTM	American Society of Testing Materials - Hiệp hội Thí nghiệm và Vật liệu Hoa Kỳ
ADM	Áo đường mềm
BTNC	Bê tông nhựa chặt
BTNP	Bê tông nhựa polymer
BTNR	Bê tông nhựa rỗng
BTXM	Bê tông xi măng
GTVT	Giao thông vận tải
HMA	Hot Mix Asphalt - Hỗn hợp bê tông nhựa nóng
NCAT	National Center for Asphalt Technology - Trung tâm công nghệ asphalt quốc gia - Mỹ
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program - chương trình nghiên cứu đường bộ quốc gia - Mỹ
QĐ	Quyết định
RD	Rutting depth – Chiều sâu lún vệt bánh xe
SHRP	Strategic Highway Research Plan - Chương trình nghiên cứu chiến lược đường bộ - Mỹ
TCN	Tiêu chuẩn Ngành
TCCS	Tiêu chuẩn cơ sở
TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
LVBX	Lún vệt bánh xe

## DANH MỤC BẢNG SỐ LIỆU

Bảng 1.1: Chiều sâu hần lún cho phép theo quy định của Nga .....	37
Bảng 2.1: Hệ số ma sát lăn khi xe chạy .....	47
Bảng 2.2: Hệ số ma sát của một số nước trên thế giới.....	48
Bảng 2.3. Quan hệ giữa hệ số nhớt dẻo và nhiệt độ của BTN.....	66
Bảng 2.4. Quy định giá trị hệ số nhớt và cường độ nén yêu cầu lớp mặt BTN .....	67
Bảng 2.5. Chỉ tiêu kỹ thuật của một số loại BTNC phổ biến tại Việt Nam....	70
Bảng 2.6. So sánh cấp phối hỗn hợp cốt liệu BTNC 12.5 .....	71
Bảng 2.7. So sánh cấp phối hỗn hợp cốt liệu BTN 12.5 .....	72
Bảng 2.8. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu.....	73
Bảng 2.9. Kết quả thí nghiệm.....	75
Bảng 2.10: Các hàm quan hệ giữa $R_n$ và $T$ ( $^{\circ}C$ ).....	76
Bảng 2.11. Hệ số nhớt BTN phụ thuộc nhiệt độ tính theo (2.25) cho BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011 và theo [79].....	78
Bảng 3.1: Kết quả tính chiều sâu LVBX .....	93
Bảng 3.2: Kết quả tính chiều sâu vệt lún theo quy trình của Nga .....	96
Bảng 3.3: Phân loại mức lưu lượng giao thông .....	100
Bảng 3.4: Phân bố hệ số nhớt ( $\eta$ ) và ứng suất cắt ( $\tau$ ) theo chiều sâu .....	101
Bảng 3.5: Tính chiều sâu LVBX cho các địa phương ở Việt Nam .....	103
Bảng 3.6 - Lưu lượng áp dụng khảo sát thử nghiệm .....	105
Bảng 3.7: Mức RD của các phân lớp khi chiều dày lớp BTN khác nhau (khu vực miền Bắc) .....	106
Bảng 3.8: Tổng hợp chiều sâu LVBX tại phân lớp dưới cùng cho các trường hợp lưu lượng khác nhau.....	108
Bảng 3.9: Mức RD của các phân lớp khi chiều dày lớp BTN khác nhau (khu vực miền Nam).....	110

Bảng 3.10: Tổng hợp chiều sâu LVBX cho các trường hợp lưu lượng khác nhau .....	112
Bảng 4.1: Kết quả tính toán chiều sâu LVBX.....	116
Bảng 4.2: Kết quả tính toán chiều sâu LVBX.....	120
Bảng 4.3: Các giá trị ứng suất cắt theo chiều sâu lớp BTN phụ thuộc nhiệt độ .....	124
Bảng 4.4: Chiều sâu LVBX theo mức nhiệt độ bề mặt của 2 phương án cấu tạo .....	125
Bảng 4.5: Quan hệ giữa hệ số nội ma sát tgφ với hệ số chiết giảm ứng suất cắt $k_{\phi}$ .....	130
Bảng 4.6: Quan hệ giữa hệ số nhớt với nhiệt độ, của BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011 .....	131
Bảng 4.7: Quan hệ ứng suất cắt với trục tải trọng .....	133
Bảng 4.8: Mức tăng tải trọng làm tăng chiều sâu LVBX .....	134

## DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1: Sơ đồ phân bố áp lực bánh xe (P) tác dụng xuống mặt đường.....	5
Hình 1.2: Sơ đồ ứng suất- biến dạng trong các lớp vật liệu kết cấu AĐM dưới tác dụng tải trọng bánh xe .....	6
Hình 1.3: Phân loại LVBX mặt đường mềm .....	7
Hình 1.4: Hiện trạng LVBX mặt đường tại Việt Nam.....	10
Hình 1.5: Hiện tượng LVBX ở các nước trên thế giới .....	11
Hình 1.6: Toán đồ xác định ứng suất cắt hoạt động trong lớp BTN.....	15
Hình 1.7: Mô hình cơ học vật liệu theo Gezensvei.....	25
Hình 1.8: Sơ đồ phân bố nội lực trong kết cấu mặt đường .....	41
Hình 2.1: Mô hình tải trọng tác dụng.....	47
Hình 2.2: Các giai đoạn hình thành biến dạng không hồi phục lớp BTN .....	49
Hình 2.3: Cơ chế hình thành LVBX lớp BTN mặt đường.....	50
Hình 2.4: Mô hình mặt cắt ngang LVBX chỉ xảy ra ở lớp BTN .....	52
Hình 2.5: Phân loại LVBX mặt đường .....	52
Hình 2.6: Mô hình cơ học của BTN khi xét biến dạng đàn nhót dẻo .....	54
Hình 2.7: Biểu đồ biến dạng, ứng suất vật liệu đàn nhót.....	57
Hình 2.8: Quan hệ giữa mô đun đàn hồi, mô đun nhót và mô đun phức.....	57
Hình 2.9: Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của vật liệu đàn hồi, nhót và đàn nhót. ....	58
Hình 2.10: Bán kính chậu vồng do tải trọng gây ra .....	60
Hình 2.11: Đường cong cấp phối hỗn hợp BTCN12.5 sau khi phối trộn .....	73
Hình 2.12: Kiểm tra kích thước mẫu sau khi chế tạo .....	74
Hình 2.13: Chạy thí nghiệm các mẫu.....	75
Hình 2.14: Biểu đồ cường độ nén mẫu .....	76
Hình 2.15: Quan hệ giữa cường độ nén và nhiệt độ .....	77
Hình 3.1: Sơ đồ LVBX lớp BTN mặt đường.....	81

Hình 3.2: Đồ thị quan hệ giữa tần suất xuất hiện mức nhiệt độ $P(T)$ với các mức nhiệt khác nhau trong năm .....	88
Hình 3.3: Phân bố LVBX theo chiều sâu lớp BTN .....	95
Hình 3.4: Cộng dồn tổng chiều sâu LVBX theo các mức nhiệt độ bề mặt từ $T_{\min}$ đến $T_{\max}$ .....	95
Hình 3.5: Cộng dồn tổng chiều sâu LVBX theo mức nhiệt độ.....	98
Hình 3.6: Phân bố độ lớn ứng suất cắt và hệ số nhót theo chiều sâu lớp BTN với nhiệt độ bề mặt khác nhau .....	102
Hình 3.7: Đồ thị phân bố RD theo các phân lớp chiều sâu với lớp BTN 8cm và 9cm (khu vực miền Bắc) .....	107
Hình 3.8: Đồ thị phân bố RD theo các phân lớp chiều sâu với lớp BTN 8cm và 9cm (khu vực miền Nam).....	111
Hình 4.1: Kết cấu áo đường QL1 đoạn đi qua tỉnh Ninh Bình.....	116
Hình 4.2: Cộng dồn chiều sâu LVBX theo mức nhiệt từ thấp đến cao .....	118
Hình 4.3: Đo đạc LVBX quốc lộ 1 (km281+895), 4/2022.....	118
Hình 4.4: Hình ảnh LVBX lớp BTN thực tế trên tuyến QL1 [16] .....	122
Hình 4.5: Biểu đồ tổng LVBX theo mức nhiệt độ bề mặt.....	122
Hình 4.6. Sự làm việc của kết cấu lớp BTN tăng cường trên mặt đường BTXM chịu tải trọng bánh xe .....	123
Hình 4.7: Biểu đồ ứng suất cắt thay đổi theo chiều sâu trong lớp BTN.....	124
Hình 4.8: Chiều sâu LVBX theo nhiệt bề mặt của 2 phương án cấu tạo.....	127
Hình 4.9. Sơ đồ cấu tạo các lớp BTN áo đường .....	128
Hình 4.10: Quan hệ giữa hệ số nhót với nhiệt độ .....	131
Hình 4.11: Biểu đồ quan hệ ứng suất cắt với trục tải trọng, $\tau$ MPa.....	134

## PHẦN MỞ ĐẦU

### 1. Sự cần thiết của vấn đề nghiên cứu

Tại Việt Nam, các công trình đường bộ có tổng giá trị tài sản tới thời điểm hiện tại ước tính hơn 6.500 triệu USD, hiện nay số lượng các công trình đường bộ vẫn đang gia tăng nhanh chóng để phục vụ nhu cầu phát triển đất nước. Do có nhiều ưu điểm trong xây dựng và khai thác, vật liệu BTN được sử dụng rộng rãi trong xây dựng kết cấu áo đường ô tô và sân bay trong nước và trên thế giới. Trong số các công trình đường bộ tại Việt Nam, có khoảng hơn 90% mặt đường là mặt đường bê tông nhựa. Trong quá trình khai thác loại mặt đường này đang xảy ra nhiều loại hư hỏng như nứt mặt đường, cóc găm, bong bật mặt đường, trong đó hư hỏng thường xuất hiện nhất là lún mặt đường (biến dạng vĩnh cửu), theo khảo sát hiện ghi nhận lên đến 8% tổng số km đường bị lún đáng kể, điều này gây ra sự mất an toàn trong quá trình khai thác. Hàng năm, Việt Nam phải sử dụng hàng trăm tỷ đồng để sửa chữa mặt đường BTN bị hấn lún.

Hiện tượng biến dạng hấn lún trong lớp BTN mặt đường xảy ra khi ứng suất cắt do tải trọng bánh xe gây ra có giá trị lớn hơn cường độ kháng cắt trượt của BTN. Quá trình tích tụ các biến dạng dẻo trên mặt đường do trùng phục tải trọng tạo thành các vết hấn lún lớp BTN trên mặt đường. Chất kết dính của hỗn hợp BTN là nhựa bitum – loại vật liệu rất nhạy cảm với tác động của nhiệt độ môi trường, trong điều kiện khí hậu nắng nóng, sức kháng cắt của BTN bị suy giảm mạnh.

Việt Nam nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới, mùa hè hàng năm có nhiệt độ không khí và lượng bức xạ mặt trời cao, nên gây ra mức nhiệt trên lớp BTN mặt đường có giá trị lớn, những ngày nắng nóng nhiệt độ bề mặt lớp BTN mặt đường có thể đạt tới  $65 \div 66$  °C. Ở mức nhiệt cao như vậy, các chỉ tiêu cường độ của lớp BTN, trong đó có chỉ tiêu cường độ kháng cắt đều bị suy giảm, gây ra các hư hỏng biến dạng xô dòn, hấn lún lớp BTN. Trong các quy trình tính toán thiết kế kết cấu ADM ở Việt Nam hiện nay (TCCS 38:2022/TCDBVN) chưa ban hành quy định cần tính toán dự báo LVBX lớp BTN phù hợp với điều kiện khai thác thực tế, làm căn cứ lựa chọn loại vật liệu BTN có cường độ kháng cắt phù hợp với điều kiện khai thác thực tế ngay

từ bước thiết kế. Từ thực tế trên, vấn đề khắc phục biến dạng hằn lún lớp BTN trên làn xe chạy hiện đang được các chuyên gia, các cơ quan quản lý trong ngành giao thông vận tải quan tâm. Vì vậy Luận án lựa chọn hướng nghiên cứu về xây dựng phương pháp tính LVBX lớp BTN trong kết cấu ADM trong điều kiện Việt Nam.

Tên đề tài “Nghiên cứu tính toán chiều sâu lún vệt bánh xe lớp bê tông nhựa mặt đường ô tô trong điều kiện Việt Nam”.

## **2. Mục đích và nội dung nghiên cứu**

### **2.1. Mục đích nghiên cứu:**

Trên cơ sở lý thuyết tính toán biến dạng dẻo lớp BTN dưới tác dụng của tải trọng trên làn xe chạy, theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục, xây dựng phương pháp tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN trên làn xe chạy trong điều kiện Việt Nam. Phương pháp tính cho phép xét được tổng lưu lượng trục xe khai thác, xét được các mức nhiệt độ khác nhau từ thấp nhất đến cao nhất trong suốt thời gian khai thác, xét cho từng loại BTN hiện có của Việt Nam, xét được sự thay đổi ứng suất cắt và hệ số nhớt của lớp BTN theo chiều sâu do thay đổi nhiệt độ trong lớp BTN, tính với các loại kết cấu áo đường khác nhau, phù hợp với điều kiện nắng nóng của Việt Nam.

### **2.2. Nội dung nghiên cứu:**

Tổng quan các phương pháp tính toán chiều sâu LVBX của các nước trên thế giới, từ đó lựa chọn hướng nghiên cứu phù hợp với điều kiện thực tế của Việt Nam.

Phân tích, xây dựng phương pháp tính toán lý thuyết theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục, đề xuất công thức tính toán chiều sâu LVBX. Xác định các tham số tính toán phụ thuộc loại trục xe khai thác, loại BTN và điều kiện khí hậu, phục vụ tính toán chiều sâu LVBX trong điều kiện Việt Nam.

Tiến hành thí nghiệm xác định hệ số nhớt của một loại BTN hiện có của Việt Nam, phục vụ ứng dụng tính toán chiều sâu LVBX trong điều kiện Việt Nam.

Tiến hành tính toán, khảo sát số đánh giá độ tin cậy của phương pháp tính đề xuất với thực tế biến dạng LVBX tại một số tuyến đường thực tế.

### **3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu:**

Đối tượng nghiên cứu: Kết cấu áo đường mềm đường ô tô, gồm có các lớp BTN trên các lớp móng và nền tự nhiên.

Phạm vi nghiên cứu: chỉ xét tính toán LVBX lớp BTN, không xem xét tính toán LVBX các lớp móng và nền tự nhiên.

### **4. Phương pháp nghiên cứu**

Trong luận án ứng dụng phương pháp phân tích lý thuyết kết hợp thí nghiệm mẫu trong phòng. Trên cơ sở phân tích biến dạng đàn hồi, nhớt và dẻo theo phương pháp lý thuyết, xây dựng công thức tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN. Tiến hành thí nghiệm mẫu BTN trong phòng xác định hệ số nhớt của loại BTN chọn nghiên cứu.

### **5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án**

Ý nghĩa khoa học:

- Trên cơ sở lý thuyết tính toán biến dạng dẻo không hồi phục lớp BTN chịu tác dụng của tải trọng trên làn xe chạy theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục, đã xây dựng và đề xuất công thức tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN, phù hợp với điều kiện Việt Nam.

- Đã tiến hành thí nghiệm xác định hệ số nhớt của 1 loại hỗn hợp BTN hiện đang được sử dụng, phục vụ tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN trong điều kiện Việt Nam.

Ý nghĩa thực tiễn:

Đề xuất phương pháp tính chiều sâu LVBX lớp BTN kết cấu áo đường, có thể ứng dụng trong tính toán dự báo chiều sâu LVBX trên các tuyến đường, phù hợp với điều kiện vật liệu và điều kiện khí hậu của Việt Nam.

### **6. Bố cục luận án**

#### **Mở đầu**

**Chương 1.** Tổng quan tình trạng LVBX lớp BTN mặt đường và các phương pháp tính toán dự báo chiều sâu LVBX.



**Chương 2.** Phân tích đặc tính đàn nhót dẻo của bê tông nhựa trong tính toán chiều sâu LVBX lớp bê tông nhựa mặt đường

**Chương 3.** Nghiên cứu đề xuất phương pháp tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN mặt đường trong điều kiện Việt Nam

**Chương 4.** Ứng dụng tính toán LVBX lớp BTN mặt đường trong điều kiện Việt Nam

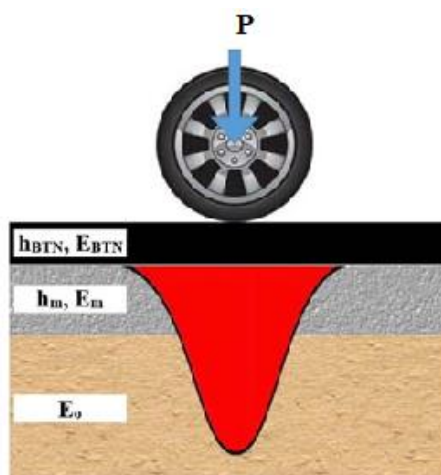
**Kết luận - Kiến nghị**

## CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN TÌNH TRẠNG LÚN VẾT BÁNH XE LỚP BTN MẶT ĐƯỜNG VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN DỰ BÁO CHIỀU SÂU LÚN VẾT BÁNH XE

### 1.1. Sự làm việc của lớp BTN mặt đường chịu tải trọng bánh xe

#### 1.1.1. Ứng xử của lớp BTN dưới tác dụng của tải trọng bánh xe

Sơ đồ tải trọng tác dụng: trên làn xe chạy có tải trọng theo phương đứng (P), tại vị trí đỗ dừng, hãm phanh, ngoài tải trọng theo phương đứng còn có lực hãm phanh theo phương ngang (Q). Hình 1.1 thể hiện sơ đồ áp lực tải trọng tác dụng xuống mặt đường trên làn xe chạy, chỉ có lực tải trọng xe theo phương đứng.



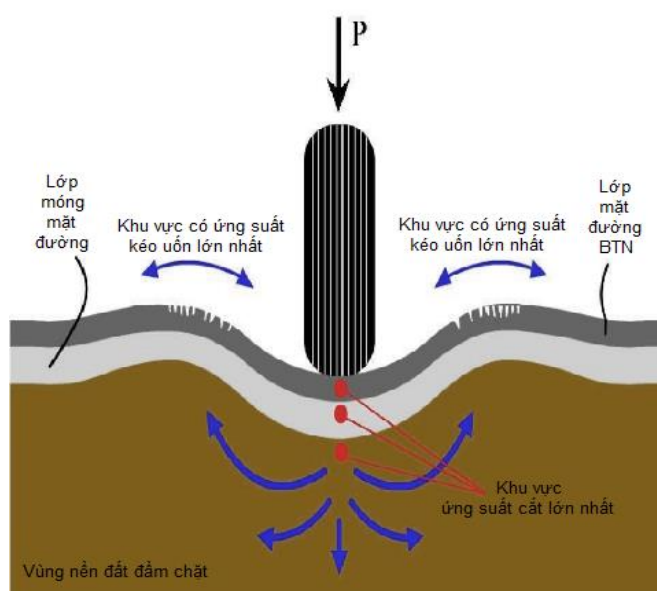
**Hình 1.1: Sơ đồ phân bố áp lực bánh xe (P) tác dụng xuống mặt đường**

Dưới tác dụng của tải trọng bánh xe (xem Hình 1.1), các lớp vật liệu mặt đường bị biến dạng, sơ đồ làm việc của kết cấu ADM được minh họa ở Hình 1.2. Áp lực bánh xe truyền qua lớp mặt, lớp móng, và nền đường, gây ra biến dạng cho các lớp vật liệu. Theo [14,27,73,88] cơ chế biến dạng như sau:

Các lớp mặt đường và nền đất dưới lớp mặt đường trong phạm vi chiều sâu vùng tác động của tải trọng (đối với kết cấu ADM đường ô tô thường trong phạm vi chiều sâu 1÷1,5m), bị nén ép lại dưới tác dụng của áp lực bánh xe, gây võng cho mặt đường. Chiều dày và độ cứng lớp mặt đường càng lớn thì độ võng càng nhỏ và ngược lại. Để đảm bảo an toàn cho phương tiện lưu hành và đảm bảo tuổi thọ khai thác mặt đường, độ võng mặt đường không được vượt quá giá trị cho phép;

Lớp mặt BTN và các lớp móng từ vật liệu liền khối, do có độ cứng kháng uốn lớn hơn, nên dưới tác dụng của tải trọng bánh xe, các lớp sẽ bị uốn trong phạm vi chấu võng. Khi giá trị ứng suất kéo uốn vượt quá cường độ kéo uốn cho phép của vật liệu, sẽ gây ra nứt trong lớp vật liệu;

Ngoài ra, trong các lớp vật liệu của áo đường sẽ xuất hiện ứng suất cắt, khi giá trị ứng suất cắt vượt quá giới hạn cường độ kháng cắt, sẽ gây ra hiện tượng biến dạng dẻo trong các lớp vật liệu: lớp nền đất bị đùn trôi sang 2 bên đường, các lớp mặt và móng bị biến dạng xô dòn, đùn trôi, hằn lún.



**Hình 1.2: Sơ đồ ứng suất- biến dạng trong các lớp vật liệu kết cấu ADM dưới tác dụng tải trọng bánh xe**

### **1.1.2. Khái niệm biến dạng không hồi phục lớp BTN mặt đường**

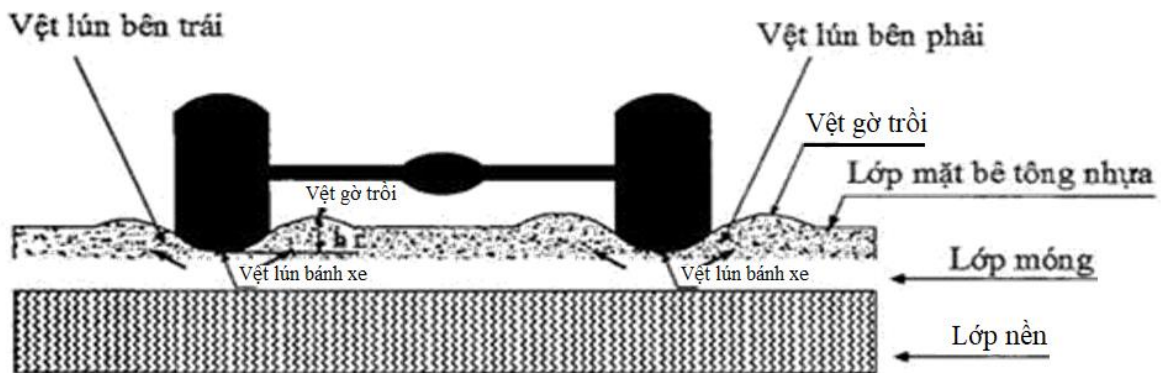
Biến dạng hằn lún, biến dạng xô dòn, đùn trôi là các dạng của biến dạng không hồi phục lớp BTN. Tùy điều kiện tác dụng của tải trọng mà trong lớp vật liệu xuất hiện các dạng biến dạng hằn lún trên, biến dạng xô dòn lớp BTN tại các vị trí giao cắt, đỗ dừng, biến dạng từ biến tại các bãi đỗ xe.

#### **1.1.2.1. Khái niệm biến dạng LVBX lớp BTN trên làn xe chạy**

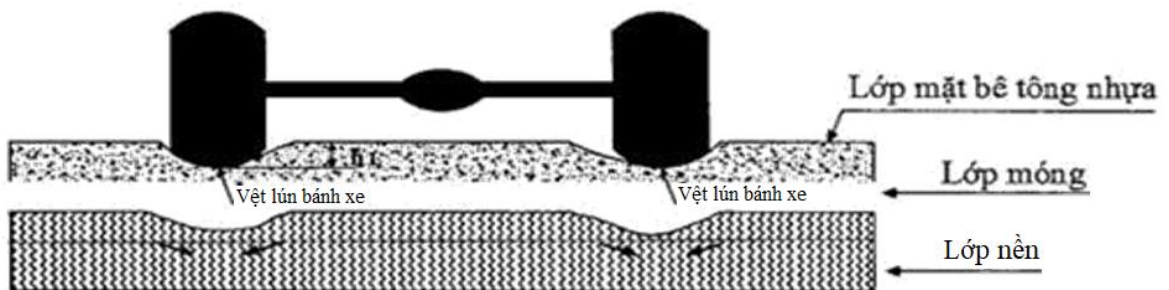
Khi trục bánh xe vận hành bình thường trên làn đường, mặt đường chủ yếu chỉ chịu tác dụng của tải trọng theo phương đứng (trên làn xe chạy), lực theo phương ngang do lực ma sát khi bánh lăn hoặc khi tăng giảm tốc có giá trị nhỏ. Ứng suất cắt do tải trọng trục gây ra khi đạt giá trị đủ lớn, sẽ gây ra

biến dạng trượt ngang lớp BTN, phân bố đều sang 2 bên vết bánh xe chạy. Quá trình tích tụ biến dạng do trùng phục tải trọng sẽ tạo ra LVBX trên làn đường trong suốt quá trình khai thác.

Có nhiều dạng LVBX trên mặt đường mềm, bao gồm các dạng biến dạng hằn lún sau: Dạng biến dạng chỉ xảy ra ở lớp BTN (xem Hình 1.3a) và dạng biến dạng hằn lún xảy ra ở cả lớp mặt, lớp móng và nền (Hình 1.3b). Sự khác biệt của LVBX chỉ xảy ra trong lớp BTN khác với LVBX của cả lớp BTN, lớp móng và nền tự nhiên ở chỗ, khi LVBX chỉ ở lớp BTN thì phần thể tích BTN biến dạng bị đẩy trôi sang 2 bên vết lún, tạo nên vết gờ trôi dọc theo 2 bên LVBX, còn biến dạng lún cả lớp móng và nền tự nhiên, thì khối vật liệu BTN bị biến dạng, phần lớn bị nén ép xuống phía dưới, phân bố trong lớp nền tự nhiên, phần BTN bị đẩy trôi sang 2 bên vết lún hầu như không có hoặc có nhưng không đáng kể [36,72,74,77].



a. Biến dạng vết hằn lún lớp BTN



b. Biến dạng vết hằn lún lớp BTN, lớp móng và nền

### Hình 1.3: Phân loại LVBX mặt đường mềm

Theo Louw Kannemeyer [46], tổng chiều sâu LVBX lớp BTN trên làn xe chạy do các thành phần: LVBX lớp BTN do biến dạng dẻo dưới tác dụng

của ứng suất cắt vượt quá cường độ kháng cắt của BTN; Lún kết cấu do thi công lớp BTN chưa đảm bảo độ chặt, mặt đường bị tái lu lèn bởi trục xe giai đoạn đầu khai thác; Lún do bề mặt lớp BTN bị mài mòn trong quá trình khai thác.

Trong đó, biến dạng lún bởi sự tái lu lèn thứ cấp khi xe chạy trong quá trình khai thác giai đoạn ngay sau thi công gây ra trong các lớp BTN, chiều sâu có thể xác định gần đúng theo công thức [81,82,83]:

$$RD_{tc} = h_i \left( \frac{k_{yc} - k_{tc}}{k_{yc}} \right), \quad (1.1)$$

trong đó:  $RD_{tc}$ - chiều sâu lún lớp thứ  $i$  do lu lèn chưa đáp ứng yêu cầu, cm;  
 $h_i$ - chiều dày lớp thứ  $i$ , cm;  
 $k_{yc}$ - hệ số đầm chặt yêu cầu;  
 $k_{tc}$ - hệ số độ đầm chặt thực tế thi công lớp vật liệu;

Trong thực tế, khi lớp BTN được lu lèn nghiệm thu đảm bảo độ chặt thiết kế thì chiều sâu tái lu lèn có giá trị nhỏ, trong tính toán chiều sâu lún lớp BTN có thể bỏ qua.

Độ mài mòn mặt đường do lốp xe: gây ra chiều sâu mặt đường bị mài mòn do bánh xe tiếp xúc với mặt đường, có thể được tính bằng công thức thực nghiệm sau [81]:

$$RD_{mm} = a + \frac{b}{1000} N, \text{ mm/năm} \quad (1.2)$$

trong đó:  $N$ - lưu lượng xe khai thác / giờ;  
 $a, b$  - hệ số thực nghiệm, lấy  $a = 0,25$  và  $b = 0,25 \div 0,5$  tùy chất lượng lớp mặt BTN.

Trong thực tế, chiều sâu mài mòn mặt đường có giá trị nhỏ, trong tính toán lún lớp BTN có thể bỏ qua.

#### 1.1.2.2. Khái niệm biến dạng xô dồn lớp BTN

Tại các vị trí nút giao cắt, trạm kiểm soát vé, trạm đỗ dừng trên đường, ngoài thành phần tải trọng theo phương đứng  $P$ , khi xe hãm phanh hãm dừng

lại, sẽ xuất hiện thêm lực hãm phanh theo phương ngang  $Q$  trên bề mặt lớp vật liệu. Theo [69,88], khi hãm dừng đột ngột, giá trị lực  $Q$  có thể đạt 70-80% so với tải trọng theo phương đứng, gây xô dồn lớp vật liệu về dồn phía trước vệt bánh. Ứng suất cắt trong trường hợp này có giá trị lớn, và do có thành phần lực hãm phanh ngang, nên ứng suất cắt có giá trị lớn nhất ngay bề mặt của lớp BTN, và giảm dần theo chiều sâu. Khi giá trị ứng suất cắt vượt quá cường độ kháng cắt của vật liệu, sẽ gây ra biến dạng cắt trượt xô dồn lớp vật liệu. Do xe hãm phanh để dừng lại, nên lớp BTN bị đẩy trôi, xô dồn phía trước bánh xe, tạo thành vệt trôi ngang với hướng chuyển động của trục xe.

### *1.1.2.3. Khái niệm lún từ biến tĩnh lớp BTN mặt đường*

Ngoài 2 dạng biến dạng không hồi phục nêu trên, tại khu vực bên xe, bãi đỗ, nơi có các phương tiện dừng đỗ lâu dài tại một vị trí trên mặt đường (tải trọng tĩnh), ngoài biến dạng lún đàn hồi, còn xuất hiện hiện tượng biến dạng từ biến tĩnh trong các lớp vật liệu. Khi dỡ tải, phần biến dạng đàn hồi được hồi phục, còn biến dạng từ biến tĩnh vẫn không hồi phục.

Theo Boguslavsky [65], biến dạng từ biến xuất hiện do thời gian tác dụng của tải trọng lâu dài (tĩnh), kể cả khi ứng suất do tải trọng gây ra nhỏ hơn cường độ giới hạn của vật liệu. Dưới tác động của ứng suất lâu dài, tạo nên sức căng trong các thớ của khối vật liệu, lâu dài theo thời gian sẽ gây ra sự sắp xếp lại cấu trúc, gây biến dạng cho khối vật liệu, khi dỡ tải, một phần biến dạng được hồi phục, phần còn lại là biến dạng không hồi phục.

Trong thực tế với kết cấu mặt đường trên làn xe chạy, do thời gian tác dụng tĩnh của tải trọng là không đủ dài, nên biến dạng từ biến tĩnh có giá trị nhỏ, có thể bỏ qua.

Trong luận án, không xét hần lún lớp móng và nền, chỉ xem xét tính toán vệt hần lún bánh xe trong lớp bê tông nhựa trên làn xe chạy, do tải trọng trục xe theo phương đứng gây ra LVBX.

## **1.2. Tình trạng hư hỏng LVBX lớp BTN trong nước và trên thế giới**

### ***1.2.1. Hư hỏng LVBX lớp BTN tại Việt Nam***

Tình trạng LVBX trên mặt đường BTN các công trình giao thông trong thời gian gần đây đã trở nên rất phổ biến với mức hư hỏng hết sức nghiêm

trọng. Theo báo cáo của bộ GTVT tại Hội thảo “Tiến độ và chất lượng công trình giao thông” do Báo Giao thông tổ chức ngày 15/11/2013, hiện tượng LVBX gần như xảy ra trên tất cả các trục đường chính, những tuyến cao tốc hiện đại mới xây dựng có lượng giao thông lớn như QL1, QL5, xa lộ Đông - Tây, đường vành đai 2 của Hà Nội, QL3 Hà Nội- Thái Nguyên, cao tốc Nội Bài- Lào Cai. Hiện tượng hư hỏng này cũng liên tục xảy ra đối với cả mặt đường trên cầu như cầu Bến Thủy, cầu Thanh Trì...

Theo [16], tuyến quốc lộ 5 nối TP. Hà Nội và TP. Hải Phòng, là tuyến có nhiều xe trục tải trọng nặng, xe rơmooc, xe conterner lưu hành, đoạn tuyến qua khu vực TP. Hải Dương được nâng cấp năm 1998 với 4 làn xe, mặt đường cấp cao A1. Vào đầu những năm 2000, đã xuất hiện tình trạng hằn LVBX lớp BTN (xem Hình 1.4a, ảnh chụp 2012). Theo [15] trên tuyến quốc lộ 1, đoạn đường từ Thanh Hóa đến Huế có 70 km trên tổng số 620 km gặp phải tình trạng LVBX, đoạn từ Đà Nẵng đến Khánh Hoà có 90km trên tổng số 953km (xem Hình 1.4b, ảnh chụp 2018).



a. LVBX trên QL.5 đoạn qua đoạn TP. Hải Dương (2012) [16]

b. LVBX trên QL.1 đoạn qua tỉnh Khánh Hòa (2018) [15]

### Hình 1.4: Hiện trạng LVBX mặt đường tại Việt Nam

#### 1.2.2. Hư hỏng LVBX lớp BTN trên thế giới

LVBX lớp BTN mặt đường là hư hỏng phổ biến ở các nước trên thế giới, kể cả những quốc gia có công nghệ xây dựng phát triển như Mỹ, Trung Quốc,.... Tại Mỹ, theo Middleton, D.R, Kim,O, Hudson và các cộng sự, mặt đường BTN trước đây chỉ được thiết kế để chịu áp suất bánh xe thấp. Tuy nhiên, sự gia tăng áp suất bánh xe (từ 70 psi (0,48 MPa) đến 80 psi (0,55



MPa) thậm chí lên tới 140 psi (0,97 MPa) đã làm mặt đường nhanh chóng xuất hiện hằn lún. Tại Hội nghị chuyên đề quốc gia tổ chức năm 1987, các nhà khoa học đã chỉ ra áp suất bánh xe cao và gia tăng tải trọng, lưu lượng trục xe đã dẫn đến sự gia tăng của LVBX trên các tuyến đường ở Mỹ. Những chuyên gia tham dự hội thảo cũng thống nhất LVBX có thể được giảm thiểu bằng cách nghiên cứu đến việc lựa chọn vật liệu, thiết kế hỗn hợp và thi công [61].



a. LVBX mặt đường tại Nam Kinh - Trung Quốc



b. LVBX trên tuyến đường đi qua hoang mạc ở Mỹ



c. LVBX mặt đường tại Silesian Voivodeship, Ba Lan



d. LVBX mặt đường tại cao tốc Coquihalla, Canada

**Hình 1.5: Hiện tượng LVBX ở các nước trên thế giới**



Năm 1987, Nghiên cứu hần lún của NCAT được thực hiện để đánh giá các tuyến đường BTN tại tất cả các khu vực của Mỹ bao gồm các vùng khí hậu khác nhau, cốt liệu có nguồn gốc và tính chất khác nhau... của 42 tuyến đường BTN đã được lấy mẫu và đo chiều sâu LVBX từ 14 bang. Kết quả đánh giá cho thấy một số tuyến đường có chiều sâu hần lún lên đến 1,65 inches (tương đương 41,91 mm) [62].

LVBX cũng xảy ra nghiêm trọng trên mặt đường cao tốc ở Trung Quốc do sự gia tăng nhanh chóng của lưu lượng và tải trọng xe. Dưới điều kiện thời tiết khắc nghiệt và xe tải trọng lớn, LVBX đã xuất hiện chỉ trong một thời gian ngắn sau khi các tuyến cao tốc được thông xe. Hình 1.5 mô tả một số hình ảnh LVBX thực tế hiện trường của các nước theo [61,62].

### **1.3. Tổng quan các phương pháp tính toán biến dạng lún lớp BTN trong nước và trên thế giới.**

#### ***1.3.1. Phương pháp tính toán biến dạng cắt trượt, hần lún lớp BTN theo nguyên lý cơ học môi trường rời***

Nguyên lý cơ học môi trường rời nghiên cứu chuyển động vĩ mô và cân bằng của các môi trường ở thể vật rắn biến dạng. Giả thiết cơ bản môi trường gồm các hạt rời rạc, tiếp xúc trực tiếp với nhau, dưới tác dụng của ngoại lực, các hạt rời chuyển dịch tương đối với nhau, vị trí các hạt của môi trường thay đổi trong quá trình chuyển dịch [65,76]. Khi dịch chuyển, giữa các hạt tồn tại lực dính kết và lực nội ma sát cản trở dịch chuyển của khối vật liệu. Thành phần lực nội ma sát là thành phần lực đàn hồi, độ lớn phụ thuộc hệ số nội ma sát của cốt liệu, đặc trưng cho lực ma sát giữa bề mặt các hạt khi chúng chuyển dịch trượt lên nhau, thành phần lực dính là sự dính kết giữa các hạt, đặc trưng cho tính lưu biến của hỗn hợp, độ lớn của lực dính phụ thuộc nhiệt độ và tốc độ biến dạng. Khi bị tác động của ngoại lực, các hạt bị dịch chuyển, song lực dính kết và lực nội ma sát tại bề mặt các hạt cản trở chuyển dịch của các hạt, làm giảm biến dạng của lớp vật liệu.

Ứng dụng nguyên lý cơ học môi trường rời trong tính toán biến dạng của vật liệu BTN khi chịu tác dụng của tải trọng là tải trọng tĩnh hoặc tải trọng động, phù hợp với bài toán tính toán biến dạng của lớp BTN mặt đường khu vực bến xe, trạm dừng hoặc trên làn xe chạy. Cường độ kháng trượt của

hỗn hợp BTN theo nguyên lý cơ học môi trường rời bao gồm các thành phần lực dính và lực nội ma sát, theo điều kiện bền Morh-Coulomb:  $\tau_{cp} = \sigma tg\varphi + C$  ( $\sigma$  là ứng suất pháp,  $tg\varphi$  là hệ số nội ma sát và  $C$  là lực dính của hỗn hợp) [65,76].

Lực dính của hỗn hợp BTN bao gồm 2 thành phần:

- Lực dính kết (cohesive strength), liên kết nội tại giữa các phân tử nhựa đường. Nhân tố ảnh hưởng chủ yếu đến lực dính kết là tính năng của nhựa đường, thể hiện qua mác nhựa đường. Nhựa đường có độ nhớt (độ quán tính) càng lớn thì khả năng dính kết của nhựa đường càng lớn. Nhựa đường biến tính polime thường có độ nhớt cao hơn so với nhựa đường gốc được sử dụng để chế tạo nhựa đường polime, do nhựa đường polime có khả năng ổn định tính năng khi nhiệt độ cao nên có khả năng tạo ra lực dính kết lớn hơn so với nhựa đường thường. Lực dính kết là cơ sở để tạo nên lực dính bám.

- Lực dính bám (adhesive strength) là lực liên kết giữa nhựa đường với bề mặt cốt liệu, hay còn được gọi là lực dính bám đá - nhựa. Nhân tố ảnh hưởng đến khả năng dính bám đá - nhựa có thể kể đến là tính năng của nhựa đường, thuộc tính của cốt liệu (thuộc tính khoáng vật, hóa học, vật lý, hình dạng hạt, độ nhám, độ sạch, độ ẩm...) và tác động của nước.

Lực nội ma sát ( $\sigma tg\varphi$ ) là lực ma sát giữa bề mặt hạt cốt liệu và lực tương tác giữa các hạt cốt liệu, cản trở dịch chuyển cốt liệu khi chúng chuyển dịch tương đối dưới tác dụng của tải trọng. Độ lớn lực nội ma sát phụ thuộc độ lớn áp lực pháp tuyến ( $\sigma$ ) tại bề mặt tiếp xúc và hình dạng, kích thước, hàm lượng, độ nhám bề mặt của cốt liệu.

Hiện nay, trong tính toán biến dạng cắt trượt của lớp BTN, trên thế giới sử dụng các phương pháp tính toán khác nhau, theo các chỉ tiêu:

- Tính toán theo chỉ tiêu độ ổn định cắt trượt lớp BTN. Theo chỉ tiêu này, tính toán đáp ứng chỉ tiêu để không xảy ra biến dạng xô dồn, đùn trôi lớp BTN, xét ở nhiệt độ khai thác cao bất lợi nhất [69,87,90].

- Tính toán theo chỉ tiêu tích tụ các biến dạng lớp BTN do trùng phục tải trọng trong suốt quá trình khai thác, tạo nên LVBX trên làn xe chạy [20,51,65,68,80].

### 1.3.1.1. Tính ổn định cắt trượt theo quy trình BCH 46-83 của Liên Xô (cũ)

Điều kiện ổn định để không xảy ra cắt trượt do tải trọng bánh xe gây ra trên làn xe chạy, biến dạng dẻo lớp BTN theo mô hình đàn dẻo lý tưởng theo lý thuyết đàn hồi trong bán không gian hệ nhiều lớp [64]:

$$\tau_{\max} \leq \tau_{cp} = k.C, \quad (1.3)$$

trong đó:  $\tau_{\max}$  - ứng suất cắt lớn nhất do tải trọng tĩnh theo phương đứng gây ra, MPa;

$\tau_{cp}$  - cường độ kháng cắt cho phép của vật liệu, chưa xét trùng phục của tải trọng làm suy giảm cường độ kháng cắt;

k- hệ số thực nghiệm, phụ thuộc thành phần hạt của cốt liệu và điều kiện làm việc của lớp BTN;

C- lực dính đơn vị của BTN, MPa.

Khi xem xét vật liệu BTN là vật liệu có đặc tính đàn hồi, giá trị ứng suất cắt do tải trọng gây ra. Đối với vật liệu có cấu trúc hạt, có xét ảnh hưởng của lực nội ma sát thông qua góc nội ma sát của hỗn hợp làm giảm ứng suất cắt, có thể được xác định:

$$\tau_{\max} = \frac{[(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \varphi]}{2 \cos \varphi}, \quad (1.4)$$

trong đó:  $\sigma_1, \sigma_3$  - tương ứng là ứng suất chính lớn nhất và ứng suất chính nhỏ nhất tại tọa độ quy đổi trong bán không gian đồng nhất, do tải trọng đứng bánh xe gây ra, MPa.

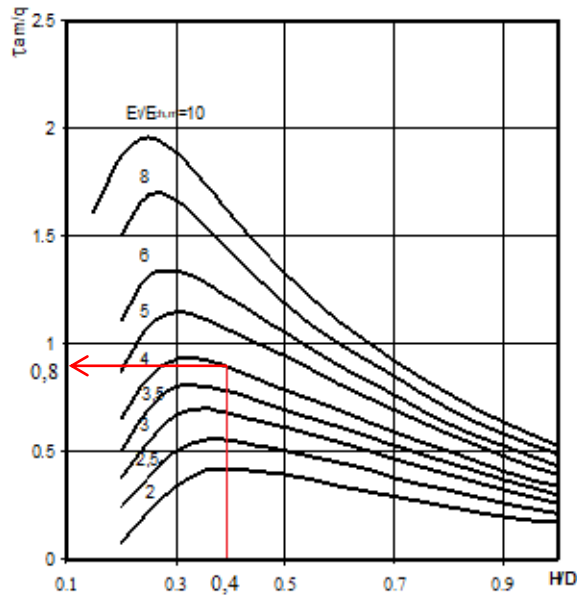
$\varphi$  – góc nội ma sát.

Khi vật liệu có góc nội ma sát ( $\varphi$ ) bằng 0, từ (1.4) nhận được:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (1.5)$$

Để tiện trong tính toán áp dụng, trong quy trình thiết kế trình bày tính toán chỉ tiêu ứng suất cắt trong lớp BTN bằng phương pháp toán đồ [64,69], thể hiện trên **Hình 1.6** trên làn xe chạy, khi chỉ có lực theo phương đứng tác

dụng. Trên trục hoành thể hiện tỉ số tổng chiều dày (H) các lớp BTN trên đường kính vết bánh quy đổi (D). Trên đường cong thể hiện tỉ số mô đun đàn hồi lớp BTN trên mô đun đàn hồi chung lớp móng và nền. Ứng suất cắt hoạt động nhận được bằng cách, từ giá trị tương ứng trên trục tung, nhân với áp lực (q) tác dụng xuống mặt đường.



**Hình 1.6: Toán đồ xác định ứng suất cắt hoạt động trong lớp BTN**

Từ Hình 1.6 cho thấy, giá trị ứng suất cắt lớn nhất nằm trong khoảng chiều sâu H/D bằng 0,2 đến 0,4 tùy theo loại kết cấu.

Hạn chế của phương pháp tính trên là tính điều kiện bắt đầu xảy ra biến dạng lớp BTN mà không tính được độ lớn biến dạng xô dòn của lớp BTN do lực tác dụng theo phương đứng (P) gây ra trên làn xe chạy, và chỉ tính tải trọng tác dụng 1 lần, chưa xét trùng phức tải trọng, khi chấp nhận biến dạng trong lớp BTN là biến dạng đàn hồi. Tính cho trường hợp nhiệt độ tính toán lấy trung bình ở 50°C cho mọi loại kết cấu áo đường, trong thực tế, nhiệt độ tính toán từng vị trí tuyến đường đi qua có thể lớn hơn 50°C.

### 1.3.1.2. Tính ổn định cắt trượt có xét ảnh hưởng của trùng phức tải trọng và nhiệt độ thay đổi trong lớp BTN

Để khắc phục các hạn chế tính ổn định cắt trượt trong BCH 46-83 nêu trên, theo hướng dẫn tính toán ổn định cắt trượt gây xô dòn lớp BTN của Bộ GTVT Nga [69], khi xét ứng suất cắt do tải trọng theo phương đứng và lực

hãm phanh theo phương ngang, đã đưa ra phương pháp xác định ổn định cắt trượt lớp BTN theo công thức (1.3), trong đó ứng suất cắt lớn nhất do cả lực theo phương đứng và lực hãm phanh theo phương ngang gây ra không vượt quá cường độ kháng cắt của BTN theo điều kiện bền Morh Coulomb, với điều kiện để không xảy ra biến dạng cắt trượt xô dồn, xét cho trường hợp bất lợi nhất là trong ngày nắng nóng nhất trong năm, có xét đến lưu lượng trục xe khai thác:

$$\tau_{\max} \leq \tau_{cp} = \sigma tg\varphi + C_{(T)}, \quad (1.6)$$

trong đó:  $\sigma$ - ứng suất pháp tại mặt trượt tính toán, MPa;

$\tau_{\max}$ - ứng suất cắt lớn nhất do tải trọng theo phương đứng và lực hãm phanh theo phương ngang gây ra, MPa;

$\varphi$ - góc nội ma sát;

$C_{(T)}$ - lực dính đơn vị của BTN, độ lớn phụ thuộc nhiệt độ lớn nhất tính toán và lưu lượng trục xe khai thác, MPa.

Độ lớn lực dính của BTN, phụ thuộc nhiệt độ môi trường. Trong khi đó nhiệt độ môi trường là khác nhau phụ thuộc khí hậu khu vực, sẽ ảnh hưởng đến độ lớn lực dính đơn vị. Để tiện cho tính toán khi xét đến ảnh hưởng của nhiệt độ tính toán đến độ lớn lực dính của BTN, trong [69,70] quy định, lấy độ lớn lực dính  $C$  được xác định bằng thí nghiệm mẫu ở 50<sup>0</sup>C, để quy đổi độ lớn lực dính từ 50<sup>0</sup>C về các mức nhiệt độ khác, trong [69,70] đã sử dụng các tham số  $m$  (hệ số dẻo) và  $U$  (năng lượng kích hoạt biến dạng nhớt dẻo) của từng loại BTN, theo công thức:

$$C(T) = C \left( \frac{t_m}{t_p \cdot t_N \cdot N} \right)^m \exp \left[ \frac{m \cdot U}{R} \left( \frac{1}{273,15 + T_t} - \frac{1}{273,15 + T_{TN}} \right) \right], \quad (1.7)$$

trong đó:  $C$  - lực dính đơn vị BTN, thí nghiệm mẫu ở 50<sup>0</sup>C, MPa;

$t_m$  - thời gian mẫu bị phá hoại khi nén mẫu, s;

$t_p$  - thời gian tác dụng 1 lần của tải trọng, s;

$t_N$  - thời gian mặt đường có nhiệt độ trên 50<sup>0</sup>C trong ngày, giờ;

$T_t$  - nhiệt độ tính toán lớn nhất trong năm, cách bề mặt 2cm, <sup>0</sup>C;

$T_{TN}$  - nhiệt độ khi thí nghiệm mẫu,  $^{\circ}C$ ;

$N$  - lưu lượng trục xe tính toán, lượt / làn / giờ.

$m$  - hệ số dẻo của BTN, xác định bằng thí nghiệm mẫu:

$$m = \frac{\ln R_{50}^{50} - \ln R_{50}^3}{\ln t_3 - \ln t_{50}}, \quad (1.8)$$

$\ln R_{50}^{50}, \ln R_{50}^3$  - cường độ nén mẫu ở  $50^{\circ}C$  với tốc độ gia tải 50 và 3 mm/phút;

$t_3, t_{50}$  - thời gian phá hủy mẫu, tương ứng với tốc độ gia tải 3 và 50mm/phút;

$R$  - hằng số,  $R = 0,008314$  kJ/mol;

$U$  - năng lượng kích hoạt biến dạng nhớt dẻo, kJ/phân tử gram:

$$U = \frac{26,254(\ln R_{20} - \ln R_{50})}{m}, \quad (1.9)$$

$R_{20}, R_{50}$  - cường độ nén của mẫu ở 20 và  $50^{\circ}C$ .

Các tham số lưu biến  $m, U$  của từng loại BTN tính toán đặc trưng cho ứng xử của BTN dưới tác động của tải trọng động và nhiệt độ. Hệ số dẻo ( $m$ ) đặc trưng cho ứng xử của BTN dưới tác dụng của tải trọng động, khi  $m = 0$ , vật liệu hoàn toàn ở trạng thái đàn hồi, khi  $m = 1$ , vật liệu hoàn toàn ở trạng thái nhớt, khi giá trị  $m$  nằm trong khoảng  $0 < m < 1$  vật liệu thể hiện đặc tính đàn nhớt. Tham số  $U$  đặc trưng cho độ nhạy cảm với nhiệt độ của BTN.

Theo [69, 70], khi ở miền nhiệt độ thấp, vật liệu BTN có thể xem là vật liệu đàn hồi, dưới tác dụng của tải trọng tĩnh, nếu hai loại BTN có cùng giá trị  $C, \varphi$  thì mức biến dạng cắt trượt là bằng nhau khi cùng chịu tải trọng tác dụng, nhưng khi ở miền nhiệt độ cao và dưới tác động của tải trọng động, thì mức độ biến dạng của chúng có thể khác nhau nếu các giá trị  $m, U$  của chúng khác nhau. Điều đó cho thấy, khi chỉ dựa vào 2 tham số lực dính và hệ số nội ma sát của hỗn hợp BTN theo nguyên lý cơ học môi trường rời, thì chỉ có thể tính toán được biến dạng của hỗn hợp trong miền biến dạng có hồi phục, mà chưa đủ điều kiện để tính toán biến dạng trong miền biến dạng không hồi phục. Để tính toán miền biến dạng không hồi phục theo nguyên lý cơ học môi

trường rời, cần xét thêm tham số hệ số dẻo (m) và năng lượng kích hoạt biến dạng nhót dẻo (U) của hỗn hợp BTN.

Ưu điểm của công thức (1.6) là cho phép xét được thời điểm bắt đầu xảy ra biến dạng dẻo lớp BTN ở nhiệt độ bất kỳ, có xét trùng phục tải trọng, xét cho trường hợp tải trọng theo phương đứng và phương ngang gây ra. Hạn chế là chỉ xét thời điểm xảy ra biến dạng dẻo mà chưa xét được chiều sâu lún lớp BTN do tải trọng gây ra.

#### 1.3.1.3. Tính ổn định cắt trượt theo quy trình thiết kế của Cộng hòa Belarus

Tính toán ổn định cắt trượt được tính với tải trọng tĩnh, có xét trùng phục của tải trọng, trục xe tính toán / ngày đêm, xét cho trường hợp tải trọng tác dụng là tải trọng tĩnh, gồm tải trọng tác dụng theo phương đứng và theo phương ngang khi hãm phanh, theo công thức sau [90]:

$$\tau_{\max} \leq \frac{C.k}{k_N.k_{cd}} + \sigma.tg\varphi, \quad (1.10)$$

trong đó:  $\tau_{\max}$  - ứng suất cắt trượt do tải trọng tĩnh gây ra, MPa;

C - lực dính của BTN ở 50<sup>0</sup>C, MPa;

$\sigma$  - ứng suất pháp tuyến tại mặt cắt xem xét, MPa;

k - hệ số chuyển đổi, k=0,8;

$k_N$  - hệ số xét mật độ tải trọng / ngày đêm (theo toán đồ lập sẵn);

$k_{cd}$  - hệ số dự trữ cường độ;

tg $\varphi$  - hệ số nội ma sát của BTN.

#### 1.3.1.4. Tính toán chiều sâu biến dạng LVBX lớp BTN

Trên cơ sở phân tích lý thuyết đã xây dựng công thức tính toán tổng biến dạng dẻo của lớp BTN trong suốt thời kỳ khai thác với lưu lượng trục xe thực tế và nhiệt độ thực tế, có xét tần suất trùng phục nhiệt độ trong suốt thời kỳ khai thác. Trên cơ sở phân tích biến dạng đàn dẻo của lớp BTN theo nguyên lý cơ học môi trường rời, chấp nhận giả thiết lớp BTN là lớp vật liệu đồng nhất, có cùng các đặc tính cơ lý theo chiều dày lớp BTN, trong

[69,70,81] đã đề xuất công thức tính biên dạng trượt ngang gây ra vết hằn lún lớp BTN theo các tham số lực dính và hệ số nội ma sát:

$$\gamma_{tt} = N \cdot t_p \cdot \dot{\gamma}_{TN} \cdot \left( \frac{\tau_{\max} - q \cdot t \cdot g \cdot \varphi}{C_{TN}} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} P(T) \cdot e^{\frac{U}{R} \left( \frac{1}{273,15+T} - \frac{1}{273,15+T_{TN}} \right)} \cdot dT, \quad (1.11)$$

trong đó:  $t_p$  - thời gian tác dụng 1 lần của tải trọng, s;

$N$  - tổng trục xe tính toán, có xét đến xác suất trùng phục của trục xe qua tiết diện tính toán;

$\dot{\gamma}_{TN}$  - tốc độ biến dạng mẫu thí nghiệm, 1/s;

$\tau_{\max}$  - ứng suất cắt lớn nhất do tải trọng đứng và lực hãm phanh ngang gây ra, MPa;

$q$  - áp lực bánh xe, MPa;

$C_{TN}$ ,  $\varphi$  - lực dính ở 50°C và góc nội ma sát của BTN;

$P(T)$  - tần suất xuất hiện mức nhiệt độ  $T$  trong thời kỳ khai thác;

$T$  - biến nhiệt độ tính toán có giá trị từ  $T_{\min}$  đến  $T_{\max}$ .

Các kí hiệu khác như trên.

Trên cơ sở số liệu quan trắc hiện trường, theo [69,70,81], chiều cao vết gờ trời 2 bên LVBX phát triển phụ thuộc chiều sâu vết lún lớp BTN, song luôn tuân theo quy luật tương đối ổn định có độ lớn xấp xỉ 1/3 chiều sâu vết hằn lún của lớp BTN tại tâm vết lún. Sử dụng khái niệm biến dạng trượt ngang quy ước, gây ra biến dạng không hồi phục tại LVBX. Mặt trượt ngang quy ước có diện tích bằng với diện tích LVBX của bản thân lớp BTN, khi đó, từ biến dạng  $\gamma_{tt}$  nhận được theo (1.11), tính được tổng chiều sâu LVBX theo công thức sau:

$$RD = \frac{9 \cdot \gamma_{tt} \cdot h^2}{2 \cdot L}, \quad (1.12)$$

trong đó:  $RD$  - chiều sâu hằn lún (Rutting Depth), cm;

$\gamma_{tt}$  - biến dạng trượt ngang, tính theo công thức (1.11);



$h$  - chiều dày tính toán lớp BTN, cm. Trong trường hợp lớp BTN có chiều dày lớn,  $h$  là chiều sâu vùng biến dạng dẻo trong lớp BTN, theo [69,70,81,89] chiều sâu  $h$  trong phạm vi  $7,5 \div 10$ cm, tùy điều kiện khai thác thực tế;

$L$  - chiều rộng vệt hằn lún khi chỉ xét ở lớp BTN, tính từ 2 đỉnh vệt gờ trời 2 bên vệt lún lớp BTN, theo [69,70,81] trong điều kiện của nước Nga lấy  $L=100$ cm.

Phương pháp tính trên hiện đã được ban hành thành quy trình tính toán biến dạng hằn lún lớp BTN, thể hiện trong [69,70,81], hiện đang được sử dụng tại Nga, để làm cơ sở lựa chọn loại BTN phù hợp với yêu cầu khai thác thực tế khai thác của các tuyến đường.

Ưu điểm của phương pháp tính LVBX lớp BTN mặt đường theo (1.11) và (1.12): Đã xét tổng lưu lượng trục xe trong suốt thời kỳ khai thác, ở các mức nhiệt độ khác nhau trong ngày và các mùa, từ nhiệt độ thấp nhất đến nhiệt độ cao nhất trong năm, có xét trùng phục nhiệt độ trong suốt thời kỳ khai thác.

Hạn chế:

- Đã chấp nhận giả thiết lớp BTN trong suốt chiều sâu trong phạm vi xảy ra biến dạng không hồi phục, là lớp vật liệu đồng nhất, có cùng cường độ (ở cùng mức nhiệt độ, lấy bằng nhiệt độ tại vị trí cách bề mặt 2cm), nên trong tính toán lấy chung các đặc trưng cơ lý như nhau trong suốt chiều sâu vùng biến dạng dẻo. Song thực tế nhiệt độ trong lớp BTN thay đổi giảm dần theo chiều sâu, nên cường độ lớp BTN phía dưới sẽ cao hơn lớp BTN phía trên mặt. Tính toán với giả thiết như vậy sẽ cho giá trị chiều sâu hằn lún lớn hơn thực tế. Chấp nhận giả thiết như vậy chỉ phù hợp với điều kiện các nước có nhiệt độ bề mặt mùa nóng không quá lớn như nước Nga, biến động nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN là không quá lớn, nên cường độ kháng cắt ít thay đổi theo chiều sâu lớp BTN. Còn đối với các nước ở vùng khí hậu nắng nóng có nhiệt độ bề mặt BTN tới  $65^{\circ}\text{C}$  và lớn hơn như ở Việt Nam, sự chênh lệch nhiệt độ theo chiều sâu lớp bề mặt là đáng kể, sẽ ảnh hưởng nhiều đến các tham số cường độ kháng cắt của BTN, làm gia tăng chiều sâu vệt hằn lún trong lớp BTN.

- Trong tính toán chiều sâu LVBX đã không xét ảnh hưởng của cường độ các lớp móng và nền đến chiều sâu LVBX.

- Trong tính toán, yêu cầu cần tới 4 tham số về cường độ kháng cắt của vật liệu BTN ( $C, \phi, m, U$ ). Với số lượng 4 tham số cường độ, cần tiến hành nhiều mẫu thí nghiệm mới đảm bảo độ chính xác của số liệu, gây khó khăn cho áp dụng trong thực tế.

Ngoài ra, một số nhà khoa học cũng sử dụng các tham số vật liệu theo nguyên lý cơ học môi trường rời để tính toán RD bằng phương pháp thực nghiệm, nội dung này được trình bày trong mục 1.3.3.

### ***1.3.2. Phương pháp tính toán lý thuyết biến dạng lún lớp BTN theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục***

Nguyên lý cơ học môi trường liên tục nghiên cứu chuyển động vĩ mô và cân bằng của các môi trường vật rắn biến dạng [9]. Giả thiết cơ bản của cơ học môi trường liên tục là có thể xem vật chất như một môi trường đậm đặc liên tục. Dưới tác động của ngoại lực, môi trường chuyển động là liên tục, đồng thời có thể xem các đại lượng đặc trưng của nó (mật độ, ứng suất, vận tốc phân tử...) là phân bố liên tục.

Đặc tính nhớt của môi trường liên tục được đặc trưng bằng lực tương tác giữa các phân tử, khi có sự chuyển dịch tương đối giữa chúng, có tác dụng cản trở chuyển dịch của các phân tử trong khối vật liệu.

Độ lớn đặc tính nhớt phụ thuộc từng loại vật liệu. BTN là vật liệu có thành phần hạt, được liên kết với nhau bằng chất kết dính là nhựa bitum, nên đây là vật liệu có tính đàn nhớt. Theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục [65], biến dạng của vật liệu BTN có tính lưu biến thể hiện bằng đặc tính nhớt, thông qua tham số hệ số nhớt ( $\eta$ ), dưới tác dụng của ngoại lực, trong lớp vật liệu có tính đàn nhớt xuất hiện lực cản nhớt hạn chế biến dạng của lớp BTN dưới tác dụng của ngoại lực. Độ lớn của hệ số nhớt phụ thuộc độ nhớt của nhựa bitum, thành phần cấp phối và loại cốt liệu sử dụng, vào nhiệt độ môi trường và tốc độ biến dạng (vận tốc phương tiện).

Ứng dụng nguyên lý cơ học môi trường liên tục cho tính toán biến dạng của vật liệu có tính đàn nhớt, do đặc tính nhớt chỉ thể hiện khi vật liệu chịu tác dụng của tải trọng động, nên phù hợp với bài toán tính toán biến dạng

lớp BTN trên làn xe chạy mặt đường. Dưới đây giới thiệu một số phương pháp tính toán biến dạng hần LVBX của các học giả trên thế giới:

**Theo Ladurghin [90]:** Trong tính toán biến dạng dẻo có dạng LVBX trên làn xe chạy trong lớp BTN, chủ yếu do tải trọng theo phương đứng gây ra. Ứng suất cắt do tải trọng bánh xe theo phương đứng ( $\tau_{\max}$ ) trong lớp BTN kết cấu mặt đường gây ra biến dạng không hồi phục lớp BTN, được xác định từ điều kiện biến dạng LVBX theo sơ đồ bài toán phẳng. Trong miền biến dạng dẻo, vết lún lớp BTN do ứng suất cắt gây ra theo điều kiện dẻo Tresca-Saint Venant là biến dạng hình học, khi đó thể tích phân tử là không đổi:

$$\operatorname{div}\vec{V} = 0 \quad \text{hay} \quad \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (1.13)$$

Trên cơ sở lời giải bài toán theo điều kiện (1.13), theo [7,90], độ lớn ứng suất cắt gây ra biến dạng dẻo được xác định theo công thức:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_z}{2}, \quad (1.14)$$

trong đó:  $\tau_{\max}$  - ứng suất cắt lớn nhất gây ra biến dạng dẻo không hồi phục trong lớp BTN tại tiết diện tính toán do áp lực bánh xe gây ra, MPa;

$\sigma_z$  - ứng suất pháp do áp lực bánh xe gây ra, MPa.

Đối với hệ 2 lớp, theo Iacunhin, ứng suất pháp theo phương đứng ( $\sigma_z$ ) thay đổi theo chiều sâu lớp BTN, dưới tác dụng của vết bánh xe áp lực q, diện tích vết bánh hình tròn đường kính D, có thể được xác định theo công thức:

$$\sigma_z = \frac{q}{1 + \sqrt{2\pi} \left( \frac{z}{D} \sqrt[3]{\frac{E_{BTN}}{E_{ch,m}}} \right)^2}, \quad (1.15)$$

trong đó: q - áp lực bánh xe, Mpa;

z - chiều sâu tính toán trong lớp BTN, cm;

D - đường kính vết bánh xe, cm;

$E_{BTN}$  - mô đun đàn hồi lớp BTN, phụ thuộc thời gian tác dụng của tải trọng và nhiệt độ tính toán, Mpa;

$E_{ch,m}$  - mô đun đàn hồi lớp móng và nền dưới lớp BTN, Mpa;

Ứng suất cắt lớn nhất gây ra biến dạng không hồi phục lớp BTN tính theo công thức (1.14) là xét cho trường hợp không xét ảnh hưởng của góc nội ma sát của hỗn hợp BTN gây cản trở chuyển dịch của các hạt cốt liệu. Khi xét ảnh hưởng của góc nội ma sát trong lớp BTN, do hỗn hợp BTN có thành phần hạt cốt liệu nên dưới tác dụng của tải trọng, khi có sự dịch chuyển tương đối giữa các hạt cốt liệu, gây ra lực nội ma sát có tác dụng cản trở dịch chuyển của các hạt. Độ lớn lực nội ma sát phụ thuộc mức độ tương tác giữa các hạt cốt liệu (hình dạng, hàm lượng cốt liệu thô thông qua số điểm tiếp xúc, hướng tiếp xúc, diện tích tiếp xúc của các hạt cốt liệu). Thành phần lực cản trên còn gọi là giới hạn chảy dẻo của hỗn hợp BTN (ký hiệu  $\tau_k$ ). Phân tích quá trình biến dạng của lớp BTN cho thấy, khi xét ảnh hưởng của lực nội ma sát, có tác dụng làm suy giảm độ lớn ứng suất cắt gây ra biến dạng không hồi phục lớp BTN. Để giai đoạn biến dạng từ đàn nhót chuyển sang nhót dẻo chỉ xảy ra khi ứng suất cắt do tải trọng gây ra vượt quá giới hạn chảy dẻo của BTN.

Điều kiện để xảy ra từ biến dạng đàn nhót có hồi phục sang biến dạng nhót dẻo không hồi phục:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_x}{2} \geq \tau_k, \quad (1.16)$$

trong đó:  $\tau_k$  - giới hạn chảy dẻo của BTN, xét ảnh hưởng của hệ số nội ma sát cản trở biến dạng của vật liệu, MPa.

Như vậy, ứng suất cắt gây ra biến dạng dẻo lớp BTN được xác định:

$$\tau = \tau_{\max} - \tau_k, \quad (1.17)$$

trong đó:  $\tau$  - ứng suất cắt gây ra biến dạng dẻo lớp BTN, MPa.

Theo Ladughin [90], khi giá trị ứng suất cắt nhỏ hơn giới hạn chảy dẻo ( $\tau \leq \tau_k$ ), chiều sâu vùng biến dạng đàn nhót có hồi phục:

$$\Delta h = \frac{q \cdot H \cdot T_1}{\eta_0 + q \cdot T_1}, \quad (1.18)$$

Khi ứng suất cắt lớn hơn giới hạn chảy dẻo của vật liệu BTN ( $\tau > \tau_k$ ) chiều sâu biến dạng không hồi phục (kí hiệu RD) được xác định như sau:

$$RD = \frac{\tau.H.T}{\eta + \tau.T}, \quad (1.19)$$

trong đó: H- chiều dày lớp BTN,cm;

q- áp lực bánh xe, MPa;

T<sub>1</sub>- tổng thời gian tác dụng của tải trọng trong miền biến dạng đàn nhót, s;

T- tổng thời gian tác dụng của tải trọng trong miền biến dạng nhót dẻo, s;

η<sub>0</sub>- hệ số nhót, MPa.S;

η- hệ số nhót dẻo, MPa.S.

τ- ứng suất cắt gây ra biến dạng dẻo lớp BTN theo (1.17), MPa.

Dưới tác dụng một lần của tải trọng, chỉ gây ra biến dạng dẻo trong lớp BTN có giá trị nhỏ, không đáng kể. Tuy nhiên do đặc điểm làm việc của lớp BTN mặt đường chịu tác dụng trùng phục của trục xe trong suốt quá trình khai thác nên đã tích tụ biến dạng, tạo nên LVBX thực tế trên mặt đường.

Để tính ứng suất cắt (τ) gây biến dạng dẻo do tải trọng theo phương đứng gây ra trong (1.17) theo chiều sâu lớp BTN, từ (1.14), (1.15) theo [66,72,76], độ lớn ứng suất cắt gây biến dạng dẻo không hồi phục lớp vật liệu BTN (τ) tại độ sâu z do tải trọng bánh xe có áp lực q, đường kính D gây ra, có xét ảnh hưởng của hệ số nội ma sát của BTN có tác dụng làm giảm độ lớn ứng suất cắt gây biến dạng không hồi phục, được xác định theo công thức sau:

$$\tau_z = \frac{q}{2 \left[ 1 + \sqrt{2\pi} \left( \frac{z}{D} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{BTN}}{E_{ch,m}}} \right)^2 \cdot k_\varphi \right]}, \quad (1.20)$$

trong đó: τ<sub>z</sub> - ứng suất cắt gây biến dạng dẻo lớp vật liệu tại độ sâu z, MPa;

q - áp lực bánh xe trên bề mặt lớp BTN, MPa;

k<sub>φ</sub> - hệ số xét ảnh hưởng của hệ số nội ma sát làm suy giảm độ lớn ứng suất cắt:

$$k_{\varphi} = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right),$$

$z$  - chiều sâu tính toán trong lớp BTN, cm;

$D$  - đường kính vệt bánh xe, cm;

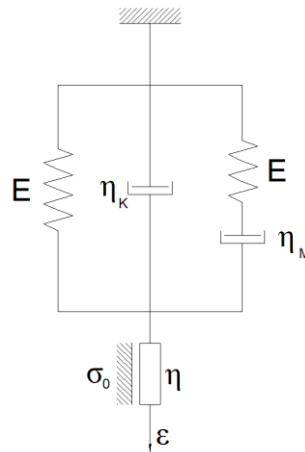
$E_{\text{BTN}}$  - mô đun đàn hồi lớp BTN, phụ thuộc thời gian tác dụng của tải trọng và nhiệt độ tính toán theo chiều sâu lớp BTN, MPa;

$E_{\text{ch,m}}$  - mô đun đàn hồi chung lớp móng và nền, và phần lớp BTN kể từ dưới chiều sâu  $z$ , MPa;

$\varphi$  - góc nội ma sát hỗn hợp BTN, khi vật liệu có góc nội ma sát  $\varphi$  lớn thì hệ số  $k_{\varphi}$  lớn, khi góc nội ma sát  $\varphi = 0$  thì hệ số  $k_{\varphi}=1$ .

Trong công thức (1.20), tham số mô đun đàn hồi chung móng và nền ( $E_{\text{ch,m}}$ ) là tham số đặc trưng cho sức kháng biến dạng của lớp móng và nền, cho phép xét được ảnh hưởng của cường độ và chiều dày các lớp móng và nền đến độ lớn ứng suất cắt gây biến dạng không hồi phục trong lớp BTN.

**Theo Gezensvei [68]:** Khi xét môi trường làm việc đàn nhớt dẻo của BTN, Gezensvei đã sử dụng mô hình cơ học vật liệu, đặc trưng cho tính đàn – nhớt – dẻo của vật liệu gồm mô hình Kelvin song song với mô hình Maxwell, nối với mô hình Saint Venant như trên Hình 1.7.



**Hình 1.7: Mô hình cơ học vật liệu theo Gezensvei**

Trên cơ sở mô hình cơ học vật liệu lựa chọn, xây dựng phương trình vi phân quan hệ ứng suất- biến dạng được thể hiện sau:

$$\theta \cdot \tau \cdot E \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + (\eta + \tau \cdot E + \theta \cdot E) \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + E \cdot \varepsilon = \frac{\theta \cdot d\sigma}{dt} + \sigma, \quad (1.21)$$

trong đó:  $\theta$ - thời gian chùng ứng suất, s;  
 $\tau$ - thời gian biến dạng trễ, s;  
 $\varepsilon$ - biến dạng tương đối của lớp vật liệu;  
 $E$ - mô đun đàn hồi vật liệu, MPa;  
 $t$ - thời gian tác dụng của tải trọng, s;  
 $\eta$ - hệ số nhớt dẻo BTN, MPa.s;  
 $\sigma$ - ứng suất pháp (áp lực bánh xe), MPa.

Giải phương trình (1.21) nhận được tổng biến dạng gồm biến dạng đàn nhớt và biến dạng nhớt dẻo của lớp BTN, theo phương trình sau:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \frac{k_n \cdot \sigma}{E} N \cdot t_p \left( 0,5 - 0,5 \cdot e^{-\frac{2 \cdot t_p}{\tau}} \right) \sum_1^N \left( 0,5 \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{0,5}{\theta}} \right) + \frac{k_n \cdot \sigma}{\eta} \cdot T, \quad (1.22)$$

trong đó:  $k_n$  - hệ số quy đổi từ ứng suất pháp theo phương đứng sang ứng suất cắt;

$\sigma$ - ứng suất pháp tại bề mặt theo phương đứng (do áp lực bánh xe), MPa;

$T$ - tổng thời gian tác dụng của tải trọng gây biến dạng dẻo, được

xác định theo [65]:

$$T = N \cdot t_p \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\sqrt{N \cdot t_p}}{N \cdot t_p}} \right),$$

$N$ - tổng trục xe tiêu chuẩn khai thác, chỉ tính số trục xe khai thác khi nhiệt độ bề mặt lớp BTN bằng và lớn hơn 50°C;

$t_p$  - thời gian tác dụng 1 lần của tải trọng, s;

$\lambda$  - thời gian dẫn cách giữa các lần tác dụng của tải trọng, s.

Trong phương trình (1.22), số hạng đầu là biến dạng đàn nhớt có hồi phục ( $\varepsilon_1$ ), còn số hạng thứ 2 là biến dạng nhớt dẻo không hồi phục ( $\varepsilon_2$ ). Từ ( $\varepsilon_2$ ) có thể tính được chiều sâu LVBX:

$$RD = \varepsilon_2 \cdot h \quad (1.23)$$

trong đó:  $h$  - chiều dày lớp BTN;

$\varepsilon_2$  – biến dạng dẻo của vật liệu, ứng số hạng thứ 2 ( $\varepsilon_2$  - biến dạng nhót dẻo không hồi phục) trong (1.22).

Hạn chế của phương pháp tính RD theo (1.22) là đã chấp nhận giả thiết lớp BTN trong suốt chiều sâu trong phạm vi xảy ra biến dạng không hồi phục là lớp vật liệu đồng nhất, có cùng các đặc trưng cơ lý (lấy chung ở mức nhiệt độ cố định là 50 °C). Điều này là chưa chính xác do nhiệt độ bề mặt có thể lớn hơn 50 °C và nhiệt độ trong lớp BTN thay đổi giảm dần theo chiều sâu, nên cường độ lớp BTN phía dưới sẽ cao hơn lớp BTN phía trên mặt. Mặt khác, công thức này chỉ xét tổng số trục xe khi nhiệt độ bề mặt  $\geq 50$  °C.

Trong công thức tính RD theo (1.22) mới chỉ xét chiều sâu biến dạng của bản thân lớp BTN, chưa xét vết gờ trôi 2 bên làm tăng đáng kể tổng chiều sâu LVBX lớp BTN.

Trong [66,67] cũng giới thiệu công thức tính chiều sâu LVBX theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục, trên cơ sở lý thuyết đàn hồi- nhót- dẻo, đã đề xuất công thức:

$$RD = k.T \cdot \sum_1^n \frac{\tau_z \cdot \Delta h}{\eta \cdot k_\eta}, \quad (1.24)$$

trong đó:  $k$  - hệ số, xét mức độ vết gờ trôi 2 bên LVBX;

$T$  - tổng thời gian tác dụng của tải trọng gây biến dạng dẻo, được xác định theo [65] tương tự trong công thức (1.22);

$n$  - số phân lớp trong lớp BTN;

$\Delta h$  - chiều dày phân lớp, cm;

$\eta$  - hệ số nhót của BTN ở 50°C, MPa.s;

$k_\eta$  - hệ số xét tăng hệ số nhót của BTN theo chiều sâu do nhiệt độ giảm dần theo chiều sâu lớp BTN, lấy bằng 1 cho phân lớp trên cùng, bằng 3,5 cho phân lớp giữa và bằng 5 cho phân lớp đáy lớp BTN.



$\tau_z$  - ứng suất cắt gây biến dạng dẻo lớp BTN, MPa, được xác định:

$$\tau_z = q \cdot k_q,$$

với:  $q$  - áp lực bánh xe, MPa;

$k_q$  - hệ số, xét chiết giảm áp lực bánh xe theo chiều sâu, có giá trị từ 0,5 đến 0,1, giá trị lớn tính cho phân lớp bề mặt, giá trị nhỏ tính cho phân lớp đáy lớp BTN;

Trong công thức trên, có xét sự suy giảm nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN, làm tăng dần độ lớn hệ số nhớt và làm giảm ứng suất cắt theo chiều sâu nên sát với điều kiện thực tế hơn so với công thức (1.22), tuy nhiên việc tăng hệ số nhớt hoặc giảm ứng suất cắt theo chiều sâu do nhiệt độ, được quy định lấy gần đúng theo các hệ số, dùng chung cho các lớp BTN có chiều dày khác nhau, thực tế thì chiều dày lớp BTN càng lớn, hệ số tăng hệ số nhớt và giảm ứng suất cắt theo chiều sâu sẽ rất khác so với lớp BTN có chiều dày nhỏ. Ngoài ra, trong tính toán, chỉ xét tổng số trục xe khi nhiệt độ bề mặt bằng và lớn hơn 50<sup>0</sup>C, trong tính toán chấp nhận các đặc trưng cơ lý của BTN lấy ở nhiệt độ bằng 50<sup>0</sup>C, chung cho các trường hợp nhiệt độ bề mặt có thể bằng và lớn hơn 50<sup>0</sup>C, trong công thức tính, không xét ảnh hưởng của cường độ lớp móng và nền ảnh hưởng đến chiều sâu LVBX lớp BTN mặt đường.

Tính toán LVBX theo công thức (1.22) và (1.24) trong có ưu điểm chỉ cần 1 tham số hệ số nhớt của BTN, thay vì cần tới 4 tham số (lực dính C, góc nội ma sát  $\varphi$ , hệ số động m, năng lượng kích hoạt biến dạng nhớt dẻo U) như trong tính toán LVBX theo nguyên lý cơ học môi trường rời theo (1.11). Tuy nhiên hạn chế của phương pháp là không xét ảnh hưởng của lớp móng và nền, chấp nhận giả thiết gần đúng chỉ tính LVBX với tổng số trục xe khi nhiệt độ bề mặt bằng 50<sup>0</sup>C hoặc lớn hơn, còn các tham số mô đun đàn hồi và hệ số nhớt của lớp BTN chỉ lấy ở mức nhiệt bằng 50<sup>0</sup>C. Quy định như vậy chỉ phù hợp với điều kiện các nước có nhiệt độ bề mặt mùa nóng không quá cao như nước Nga, biến động nhiệt độ bề mặt theo mùa trong năm và biến động nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN là không quá lớn, còn đối với các nước ở vùng khí hậu nắng nóng có nhiệt độ bề mặt BTN tới 65<sup>0</sup>C và lớn hơn như ở Việt Nam, sự chênh lệch nhiệt độ bề mặt và theo chiều sâu lớp bề mặt là đáng kể, sẽ ảnh

hường nhiều đến các tham số cường độ kháng cắt của BTN, làm gia tăng chiều sâu vệt hằn lún BTN.

Khi cần tính đến xác suất độ tin cậy của kết quả tính, theo [67,69], công thức tính chiều sâu LVBX tính toán:

$$RD_{tt} = RD(1 + t.C_v), \quad (1.25)$$

trong đó: RD - chiều sâu LVBX tính toán, cm;

t- hệ số độ tin cậy, phụ thuộc độ tin cậy yêu cầu, với độ tin cậy 95%, có thể lấy  $t = 1,64$ ;

$C_v$ - hệ số biến sai chiều sâu vệt lún, có thể lấy từ  $0,25 \div 0,35$ , giá trị lớn áp dụng cho tuyến đường cấp thấp.

### ***1.3.3. Tính toán biến dạng lún lớp BTN theo phương pháp thực nghiệm***

Trên cơ sở thực hiện thử nghiệm hiện trường với điều kiện vật liệu, điều kiện công nghệ thi công và khai thác của từng nước, từng khu vực, các nhà khoa học đã xác định các công thức tính RD lớp BTN mặt đường, dưới đây trình bày một số công thức điển hình hiện đang thường được áp dụng trong tính toán tại một số nước trên thế giới.

#### ***1.3.3.1. Công thức thực nghiệm sử dụng các tham số khác nhau.***

Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm được sử dụng rộng rãi ở Mỹ và các nước phương Tây do có đủ điều kiện về trang thiết bị, điều kiện cơ sở vật chất để thực hiện thử nghiệm với số lượng lớn. Hiện đã có nhiều kết quả thực nghiệm tính toán RD trong lớp BTN như:

- Finn F. I inni đã đề xuất công thức tính toán chiều sâu LVBX từ năm 1977, công thức hiện đang được áp dụng tại bang California (Mỹ) như sau[55]:

$$\log(RD) = -2,271 + 4,8251 \log(0,025d) + 0,131 \log(N) - 1,118 \log(0,007\sigma), \quad (1.26)$$

trong đó: d - độ võng tại bề mặt dưới tác dụng của tải trọng, mm;

$\sigma$  – áp lực bánh xe tại bề mặt, MPa;

N- tổng lưu lượng tải trọng trục 18 kip, chỉ xét thời gian khai thác mùa xuân, mùa hè và mùa thu trong năm.

- Tại Hà Lan, Gachwendt cũng đề xuất công thức tính biến dạng không hồi phục lớp BTN như sau [54]:

$$RD = W \cdot b_0 \cdot N^b, \quad (1.27)$$

trong đó: W - biến dạng hồi phục bề mặt lớp BTN;

$b_0, b$  - hệ số thực nghiệm;

N - lưu lượng trục xe tiêu chuẩn.

- Ngoài lưu lượng trục xe tính toán và áp lực bánh xe, RD cũng được xác định phụ thuộc các tham số mô đun phức và góc trượt pha của vữa asphalt theo công thức [48]:

$$RD = a \cdot N^3 + b \cdot N^2 + c \cdot N, \quad (1.28)$$

trong đó: N - lưu lượng trục xe tiêu chuẩn;

a, b, c - các hệ số thực nghiệm, phụ thuộc mô đun phức và góc trượt pha của vữa asphalt:

$$a, b, c = k \left( \frac{G^*}{\sin \varphi} \right)^m, \quad (1.29)$$

với:  $G^*, \varphi$  - tương ứng là mô đun phức và góc trượt pha của vữa asphalt;

k, m - hệ số, phụ thuộc loại nhựa bitum và nhiệt độ.

- Từ kết quả nghiên cứu thí nghiệm mẫu theo thiết bị wheel tracking, đã đưa ra mô hình tính toán dự báo chiều sâu hằn lún mẫu BTN phụ thuộc tham số lực dính và góc nội ma sát của BTN và thời gian 1 lần tác dụng của tải trọng. Trên cơ sở số liệu thí nghiệm mẫu lực dính và góc nội ma sát của 3 loại BTN, Fwa và các cộng sự đã đề xuất công thức tính chiều sâu RD [19]:

$$\text{Log}(RD) = a \cdot \text{Log}(N) + b \cdot \text{Log}(L) + c \cdot \text{Log}(T) + d \cdot \text{Log}(t), \quad (1.30)$$

trong đó: N - lưu lượng trục xe tính toán;

L - tỉ lệ tải trọng,  $L = P/B$  với P- tải trọng tính toán, B- tải trọng lớn nhất cho phép;

T- nhiệt độ tính toán,  $^{\circ}\text{C}$ ;

t- thời gian 1 lần tác dụng của tải trọng, s;

a,b,c,d- các hệ số thực nghiệm phụ thuộc độ lớn lực dính và góc nội ma sát của từng loại BTN.

Ngoài các công thức thực nghiệm tính trực tiếp RD, có một số phương pháp xác định RD thông qua biến dạng dẻo tương đối của vật liệu BTN. Có thể kể đến một số kết quả nghiên cứu như:

- Majidzadeh và cộng sự đã đề xuất công thức xác định biến dạng dẻo và hiện đang được áp dụng tại Bang Ohio-Mỹ [63]:

$$\varepsilon_p = aN^{1-m}, \quad (1.31)$$

trong đó:  $\varepsilon_p$  – biến dạng dẻo tương đối của kết cấu;

m - tham số biến dạng, biểu thị hằng số tỷ lệ giữa biến dạng vĩnh cửu và biến dạng đàn hồi;

a – hệ số đặc trưng của mô hình;

N- số trục xe tiêu chuẩn.

- Mô hình Superpave do Lytton và cộng sự đề xuất năm 2014 để mô tả biến dạng dẻo tương đối của vật liệu BTN [63]:

$$\log \varepsilon_p = \log \varepsilon_p(1) + S \log N \quad (1.32)$$

trong đó:  $\varepsilon_p$  – biến dạng không hồi phục do tải trọng gây ra;

S - hệ số hồi quy của mô hình;

N - số lượt tác dụng tải trọng tiêu chuẩn;

$\varepsilon_p(1)$  – biến dạng vĩnh cửu do tải trọng đầu tiên gây ra.

Từ giá trị biến dạng dẻo ( $\varepsilon$ ) xác định theo (1.31) hoặc (1.32), có thể xác định RD theo công thức (1.22).

Ngoài các công thức kể trên còn nhiều công thức thực nghiệm khác [15,20,52,53] để tính toán RD, không chỉ sử dụng tham số về tổng lưu lượng trục xe, về nhiệt độ mà còn sử dụng nhiều tham số khác như ảnh hưởng của tham số vận tốc của phương tiện...

Cần lưu ý là trong các công thức tính RD bằng phương pháp thực nghiệm có sử dụng các hệ số được xác định từ hàng loạt các nghiên cứu thực nghiệm hiện trường với số lượng thực nghiệm đủ lớn để đảm bảo độ tin cậy: loại trục xe tính toán khai thác, điều kiện vật liệu địa phương, trình độ kỹ thuật thi công, chỉ tiêu nghiệm thu, điều kiện khí hậu khu vực và các yếu tố địa phương khác. Để áp dụng được vào trong điều kiện Việt Nam, cần có các nghiên cứu thực nghiệm hiệu chỉnh các hệ số cho phù hợp.

### 1.3.3.2. Công thức thực nghiệm sử dụng tham số nhớt của vữa asphalt.

Một số công thức thực nghiệm sử dụng tham số hệ số nhớt của vữa asphalt và độ rỗng dư của cốt liệu như [20,35,37]:

$$\log\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r}\right) = -6,631 + 0,453 \cdot \log N + 2,767 \cdot \log T + 0,110 \cdot \log \tau + 0,118 \cdot \log \eta + 0,930 \cdot \log V_{beff} + 0,501 \cdot \log V_a \quad (1.33)$$

trong đó:  $\varepsilon_p$  - biến dạng không hồi phục;

$\varepsilon_r$  - biến dạng hồi phục;

$N$  - lưu lượng trục xe tiêu chuẩn;

$T$  - nhiệt độ tính toán,  $^{\circ}\text{F}$ ;

$\tau$  - ứng suất cắt do tải trọng gây ra, Psi;

$V_{beff}$  - hàm lượng lực dính có hiệu;

$V_a$  - độ rỗng dư;

$\eta$  - hệ số nhớt vữa asphalt ở  $70^{\circ}\text{F}$ . Có thể tính như sau[30,56]:

$$\eta = \frac{G^*}{10} \left(\frac{1}{\sin \delta}\right)^{4,8628} \quad (1.34)$$

với:  $G^*$  - mô đun phức, Pa;

$\delta$  - góc trượt pha của vữa asphalt.

Năm 2011, Hilal đã giới thiệu công thức thực nghiệm xác định biến dạng không hồi phục lớp BTN phụ thuộc độ nhớt và hàm lượng vữa asphalt trong hỗn hợp BTN như sau [18]:

$$\varepsilon_p = 3,365 \cdot 10^{-10} \cdot N^{0,532} \cdot T^{1,798} \cdot \tau^{0,838} \cdot \eta^{-0,672} \cdot A_r^{0,448}, \quad (1.35)$$

trong đó:  $\varepsilon_p$  – biến dạng không hồi phục;

T - nhiệt độ tính toán,  $^{\circ}\text{C}$ ;

N - lưu lượng trục xe tiêu chuẩn;

T - ứng suất cắt, Psi;

$\varepsilon_r$  - biến dạng có hồi phục;

$A_r$  - hàm lượng vữa asphalt (%);

$\eta$  - hệ số nhớt vữa asphalt ở  $135^{\circ}\text{C}$ ; Pa.s.

Ngoài ra, trong [18] cũng giới thiệu một số phương pháp thí nghiệm xác định hệ số nhớt của nhựa bitum bằng các thiết bị chuyên dụng, hoặc bằng tính toán hệ số nhớt của nhựa bitum, phụ thuộc chỉ số chịu nhiệt độ cao nhất (X), thấp nhất (Y) của nhựa bitum theo mác PG (PG X-Y).

Trong [21] đã giới thiệu kết quả nghiên cứu độ lớn hệ số nhớt động lực của vữa asphalt phụ thuộc nhiệt độ, với mức nhiệt độ tăng từ 80 lên  $100^{\circ}\text{C}$ , hệ số nhớt giảm đến gần 6 lần, từ 14.000 xuống 2500 centiP (với  $1\text{cP} = 0,01\text{P} = 0,001\text{Pa.s}$ ). Trong [47] đã giới thiệu công thức thực nghiệm tính toán dự báo hằn lún lớp BTN cho kết cấu ADM, trong đó có xét ảnh hưởng của vận tốc xe chạy đến chiều sâu hằn lún. Trong [17,18] đã trình bày công thức thực nghiệm tính toán dự báo chiều sâu hằn lún mặt đường sân bay cho các loại tàu bay với các áp lực bánh khác nhau, với các vận tốc tàu bay khác nhau.

Trong [20] đã giới thiệu công thức tính chiều sâu hằn lún của Baladi (1989), ngoài tham số liên quan trực tiếp như hệ số nhớt của vữa asphalt, lưu lượng trục xe khai thác, nhiệt độ trung bình trong lớp BTN, trong công thức tính còn sử dụng các tham số mô đun đàn hồi của lớp nền, lớp móng, biến dạng ngang của đáy lớp BTN, độ võng bề mặt áo đường. Ngoài ra, trong [20] còn giới thiệu các công thức thực nghiệm tính chiều sâu hằn lún phụ thuộc các tham số lưu lượng trục xe, nhiệt độ trong lớp BTN, độ nhớt của vữa asphalt với các hệ số thực nghiệm khác (của Thompson năm 1992, của May và Witczak năm 1992, của Allen và Deen năm 1986, của Leahy năm 1989).

Trong [42,44,59] đã giới thiệu kết quả nghiên cứu thực nghiệm tính toán chiều sâu vệt lún bánh tàu bay lớp BTN trên sân bay cho 2 loại tàu bay B777, B747. Sự khác biệt giữa vệt lún do trục xe ô tô và trục càng chính tàu bay gây ra là ở chỗ, khoảng cách giữa các bánh của trục chính trục xe ô tô là tương đối ổn định, nên các ứng suất trùng phục của vệt bánh là rất cao, trong khi khoảng cách giữa các trục càng chính của tàu bay là rất khác nhau, phụ thuộc loại tàu bay (từ 4,5m đến 14m), nên mặc dù các tàu bay cùng vận hành theo tim làn đường cất hạ cánh, song sự trùng phục của các vệt bánh thấp, do vậy trong tính toán chiều sâu vệt lún, trong công thức tính đã sử dụng hệ số thực nghiệm xét sự trùng phục của vệt bánh phụ thuộc loại tàu bay, công thức tính có dạng:

$$\log RD = C_0 + C_1 \cdot (\log N) + C_2 \cdot (\log N)^2 + C_3 \cdot (\log N)^3, \quad (1.36)$$

trong đó: RD - chiều sâu LVBX, inch;

N - số lượt vận hành tàu bay tính toán;

$C_0, C_1, C_2, C_3$  - các hệ số thực nghiệm, phụ thuộc loại tàu bay khai thác và điều kiện khí hậu.

Ngoài ra còn các công thức thực nghiệm khác của các học giả nêu trong [15,20,46,47]. Ưu điểm của phương pháp thực nghiệm là do các hệ số thực nghiệm được xác định từ số liệu quan trắc thực tế nên đảm bảo độ chính xác, tuy nhiên để áp dụng vào tính toán RD trong điều kiện Việt Nam là thiếu chính xác vì điều kiện khí hậu và quản lý khai thác của Việt Nam khác xa so với các nước trên thế giới.

#### ***1.3.4. Tính toán biến dạng LVBX lớp BTN theo phương pháp cơ học thực nghiệm***

Phương pháp cơ học thực nghiệm dựa trên các nguyên lý cơ học kết hợp với các hệ số thực nghiệm để phân tích ứng suất phân bố trong kết cấu áo đường và sử dụng mô hình giải tích để dự tính độ sâu LVBX. Các mô hình giải tích này được gọi là các hàm chuyển, giúp kết nối giữa kết quả phân tích ứng suất và biến dạng với những hư hỏng của mặt đường. Các thông số của mô hình được xác định và hiệu chuẩn thông qua các số liệu đo đạc thực tế trên các đường thử tiêu chuẩn vốn phụ thuộc rất nhiều vào điều kiện giao thông, điều kiện thời tiết tại đường thử của nước sở tại. Trong mô hình xác

định chiều sâu hần lún tại một điểm trong các lớp BTN có sử dụng các hệ số từ nghiên cứu thử nghiệm hiện trường theo công thức[28,41,53]:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_1 * 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244} \quad (1.37)$$

trong đó:  $\varepsilon_p$  - biến dạng dẻo tích lũy dưới tác dụng của N lần tác dụng của tải trọng đơn tiêu chuẩn;

$\varepsilon_r$  - biến dạng đàn hồi của lớp BTN, là hàm số của thuộc tính đàn hồi (E và  $\mu$ ) phụ thuộc vào nhiệt độ và thời gian gia tải;

N - số lần tác dụng của tải trọng;

T - nhiệt độ,  $^{\circ}\text{F}$ ;

$k_1$  - hệ số điều chỉnh, phụ thuộc vào tổng chiều dày của các lớp BTN ( $h_{ac}$  tính bằng inch) và chiều sâu của điểm tính toán (*depth*, tính bằng inch), dùng để hiệu chỉnh áp lực giới hạn ở các độ sâu khác nhau.

$$k_1 = (C_1 + C_2 \cdot \text{depth}) * 0.328196^{\text{depth}}$$

$$C_1 = -0.1039 \cdot h_{ac}^2 + 2.4868 \cdot h_{ac} + 17.342$$

$$C_2 = 0.0172 \cdot h_{ac}^2 - 1.7331 \cdot h_{ac} + 27.428$$

Độ lún tổng cộng của các lớp là tổng lún của các phân lớp, được biểu diễn như sau:

$$RD = \sum_{i=1}^{n_{\text{sublayers}}} \varepsilon_p^i h^i \quad (1.38)$$

Trong đó: RD - độ lún tổng cộng (tại một vị trí nhất định) (inch);

$n_{\text{sublayer}}$  - số lớp được phân lớp;

$\varepsilon_p^i$  - biến dạng dẻo của lớp i;

$h^i$  - bề dày của lớp thứ i (inch).

**Ưu điểm:** đã xét các yếu tố địa phương về khí hậu, loại vật liệu, loại trục xe và lưu lượng trục xe dự báo khai thác.

**Hạn chế:** Công thức tính RD vẫn là các công thức có sử dụng các hệ số thực nghiệm, là kết quả nghiên cứu thực nghiệm hiện trường, trên các tuyến



đường của Mỹ về điều kiện khí hậu, điều kiện vật liệu, tải trọng trục xe tiêu chuẩn của Mỹ, được thi công với công nghệ hiện đại, chỉ tiêu nghiệm thu chặt chẽ. Để áp dụng vào điều kiện thực tế của Việt Nam, có các yếu tố khác với điều kiện của Mỹ (về vật liệu, công nghệ thi công, nghiệm thu, điều kiện thời tiết,...) thì cần có các nghiên cứu hiệu chỉnh các hệ số thực nghiệm áp dụng cho phù hợp.

### ***1.3.5. Chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán trong lớp BTN***

Chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán được hiểu là chiều sâu trong lớp BTN, từ bề mặt đến độ sâu này biến dạng dẻo có giá trị lớn, từ độ sâu này trở xuống áp lực bánh xe gây ra biến dạng dẻo không hồi phục có giá trị nhỏ, nên chiều sâu hần lún tại độ sâu này trở xuống chiếm tỉ lệ nhỏ so với tổng chiều sâu hần lún lớp BTN, trong tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN phần chiều sâu hần lún dưới độ sâu này có thể bỏ qua.

Khi ứng suất cắt do tải trọng gây ra vượt quá giới hạn chảy dẻo quy ước của BTN, quá trình biến dạng dẻo không hồi phục lớp BTN sẽ xảy ra. LVBX là quá trình tích lũy các biến dạng không hồi phục do trùng phục tải trọng trong suốt quá trình khai thác của mặt đường. Theo lý thuyết dẻo, khi ứng suất cắt lớn nhất chỉ do tải trọng bánh xe theo phương đứng gây ra biến dạng dẻo lớp BTN, sẽ có giá trị lớn nhất tại bề mặt và giảm dần theo chiều sâu.

Để tính toán lý thuyết chiều sâu vệt hần lún, cần biết chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán trong lớp BTN. Chiều sâu vùng biến dạng dẻo được xác định phụ thuộc độ lớn áp lực bánh xe, phụ thuộc loại BTN, phụ thuộc nhiệt độ môi trường. Ngoài ra chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán còn phụ thuộc tổng lưu lượng trục xe tích lũy trong quá trình khai thác, gây ra tổng biến dạng không hồi phục tại các phân lớp, tích lũy trong quá trình khai thác.

Theo kết quả nghiên cứu thực nghiệm hiện trường của F. Schafer [50] với khí hậu của liên bang Đức, khi nhiệt độ cao vào mùa hè, chiều sâu vùng biến dạng dẻo trong lớp BTN có thể đạt tới  $8 \div 9$ cm.

Theo R.Brown, A. Cross [40], chiều sâu vùng biến dạng dẻo tích lũy trong quá trình khai thác có thể đạt tới  $3 \div 4$  inch ( $7,5 \div 10$ cm).

Theo kết quả nghiên cứu lý thuyết trong [67,69,70,84], theo điều kiện khí hậu của Nga, đã xác định chiều sâu vùng biến dạng dẻo nằm trong giới hạn  $7 \div 9\text{cm}$ , tùy loại BTN, vùng khí hậu của các tuyến đường.

### 1.3.6. Chiều sâu LVBX cho phép

Tùy yêu cầu an toàn giao thông cụ thể, các nước trên thế giới đã quy định chiều sâu vết hằn lún bề mặt lớp BTN mặt đường.

Tại Việt Nam, theo TCCS 38:2022/TCĐBVN, chiều sâu trung bình LVBX mức nhẹ từ  $6 \div 13\text{mm}$ , vừa từ  $13 \div 25\text{mm}$  và mức cao  $>25\text{mm}$ .

Tại Nước Nga [69]: Theo quy định của Nga, chiều sâu vết hằn lún cho phép được quy định đảm bảo an toàn phương tiện lưu thông trên đường, phụ thuộc vận tốc xe chạy. Quy định đo chiều sâu vết hằn lún dưới thước thẳng có chiều dài 1,0m:

**Bảng 1.1: Chiều sâu hằn lún cho phép theo quy định của Nga**

Vận tốc xe chạy, km/h	>120	120	100	80	$\leq 60$
Chiều sâu RD cho phép, mm	4	7	12	25	30

Tại Hoa Kỳ: Theo tiêu chuẩn ASTM D6433-07 của Hoa Kỳ [22], việc đo hằn lún thực hiện như sau: Dùng thước có chiều dài 1,20m đặt ngang làn đường để đo độ sâu hằn lún, cứ 15 m chiều dài tiến hành đo 1 lần và lấy giá trị trung bình cho từng đoạn hằn lún.

Mức độ hằn lún được đánh giá như sau:

- Hằn lún mức độ nguy hại thấp:  $< 6 \text{ mm}$
- Hằn lún mức độ nguy hại trung bình:  $6 - 25,4 \text{ mm}$
- Hằn lún mức độ nguy hiểm cao:  $> 25,4 \text{ mm}$

Tại một số quốc gia khác [78]: Một số quốc gia khác cũng đưa ra các quy định về chiều sâu hằn lún cho phép, đảm bảo an toàn cho phương tiện lưu hành trên đường. Các nước Đức, Thụy Sĩ quy định mức hằn lún cho phép như bảng sau:

**Bảng 1.2: Chiều sâu hằn lún cho phép của CHLB Đức và Thụy Sĩ**

Quốc gia	Vận tốc (km/h)	Chiều sâu hằn lún cho phép theo vận tốc xe chạy (mm)		
		Tốt	Trung bình	kém
CHLB Đức	> 100	4	10	20
	70 ÷ 100	4	15	25
	< 70	4	20	30
Thụy Sĩ	> 80	4	16	25
	< 80	6	25	40

Tại Anh, quy định chiều sâu LVBX cho phép là 15 mm, còn chiều sâu LVBX trên 20 mm được khuyến cáo cần sửa chữa, khắc phục ngay. Tại Na Uy, chiều sâu LVBX tối đa cho phép trong khoảng 20 ÷ 35 mm.

Việc phân loại hằn LVBX theo chiều sâu giúp đánh giá mức độ hằn lún hiện trạng của tuyến đường, từ đó đánh giá mức độ ảnh hưởng của hư hỏng hằn lún đến khả năng khai thác của tuyến và làm căn cứ để xác định mức độ cần phải xử lý khắc phục chứ không giúp đánh giá, xác định được nguyên nhân của hằn lún. Để có căn cứ xác định nguyên nhân của hư hỏng hằn lún, có thể phân loại theo cơ chế hình thành hư hỏng.

#### **1.4. Tình hình nghiên cứu biến dạng LVBX lớp BTN tại Việt Nam**

##### ***1.4.1. Nghiên cứu về hư hỏng LVBX trong lớp BTN***

Hư hỏng LVBX mặt đường đã xuất hiện trên mặt đường mềm từ lâu, từ năm 2010 loại hư hỏng này xuất hiện nhiều và phổ biến trên hệ thống đường bộ Việt Nam, cũng từ đây nhiều công trình nghiên cứu về loại hư hỏng này với mục đích tìm ra nguyên nhân và cách khắc phục, trong đó có các nghiên cứu về biến dạng LVBX xảy ra trong lớp BTN.

Năm 2014, Trường Đại học GTVT tổ chức hội thảo [15] “Một số giải pháp tăng cường khả năng chống vết hằn lún bánh xe cho bê tông nhựa”. Tại đây các tác giả đã phân tích, trình bày một số nguyên nhân cũng như giải pháp hạn chế LVBX trên các tuyến đường ở Việt Nam nói chung và biến dạng LVBX trong lớp BTN nói riêng.

Năm 2015, Trường Đại học GTVT phối hợp với Trường Đại học SEJONG (Hàn Quốc) tổ chức Hội thảo khoa học “Giải pháp khắc phục LVBX mặt đường bê tông nhựa”. Tại hội thảo này các nhà khoa học đưa ra một số giải pháp hạn chế biến dạng dẻo trong lớp BTN, như sử dụng nhựa 40/50, nhựa polyme thay thế nhựa 60/70; sử dụng phụ gia SBS.

Ngoài các hội thảo chuyên đề về LVBX, các nhà khoa học trong nước cũng thường xuyên công bố những kết quả nghiên cứu của mình về đến vấn đề này trên các tạp chí chuyên ngành trong và ngoài nước, một số hướng nghiên cứu chính như:

- Nghiên cứu về việc các giải pháp giúp tăng khả năng kháng cắt trượt của kết cấu mặt đường nói chung cũng như của vật liệu làm mặt đường nói riêng như: điều chỉnh thành phần cấp phối, sử dụng phụ gia.

- Nghiên cứu về các tham số vật liệu BTN như lực dính và góc nội ma sát, đặc trưng cho cường độ kháng cắt của một số loại BTN của Việt Nam [10, 11].

- Nghiên cứu đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến biến dạng LVBX trong lớp BTN như: nhiệt độ môi trường, tải trọng tác động, nền và móng dưới lớp BTN của kết cấu AĐM, sự liên kết giữa các lớp BTN,...

Ngoài các hội thảo, bài báo công bố các kết quả nghiên cứu về hư hỏng LVBX tại Việt Nam, một số nghiên cứu sinh cũng đã đi sâu nghiên cứu về nội dung này, có thể kể đến một số luận án như:

- NCS. Ngô Ngọc Quý giới thiệu kết quả nghiên cứu trong PTN về quan hệ giữa biến dạng không hồi phục một số loại BTN với độ lớn ứng suất và số lần tải trọng tác dụng ở mức nhiệt độ nhất định [13].

- NCS. Lê Thanh Hải giới thiệu ứng dụng loại hỗn hợp Stone Mastic Asphalt có hàm lượng cốt liệu thô lớn (70 ÷ 80 %) nên có sức kháng cắt cao, có tác dụng khắc phục được hiện tượng hằn lún trong điều kiện nắng nóng của Việt Nam, bên cạnh đó trình bày kết quả nghiên cứu thí nghiệm mẫu xác định lực dính và hệ số nội ma sát đặc trưng cho cường độ kháng cắt của BTN, phụ thuộc hàm lượng cốt liệu thô của các loại BTN12,5 theo TCVN 8819:2011, BTN theo QĐ 858/2014 và BTN theo TCVN 11193:2021 hiện có của Việt Nam [9].

#### ***1.4.2. Nghiên cứu về kiểm toán, tính toán LVBX trong lớp BTN***

Khi hư hỏng LVBX xuất hiện phổ biến trên các tuyến đường bộ ở Việt Nam, một số nhà khoa học trong nước đã bước đầu nghiên cứu theo hướng tính toán dự báo chiều sâu LVBX trong kết cấu ADM nói chung và trong lớp BTN nói riêng.

Tại hội thảo: “Một số giải pháp tăng cường khả năng chống vệt hằn lún bánh xe cho bê tông nhựa” do Trường ĐH Giao thông vận tải tổ chức năm 2014, PGS.TS. Nguyễn Văn Hùng đã công bố bài báo: “Đề xuất bổ sung chỉ tiêu kiểm toán ổn định LVBX mặt đường BTN vào tiêu chuẩn thiết kế áo đường mềm 22TCN 211-06”, trong đó tác giả đã kiểm toán điều kiện ổn định LVBX theo các tiêu chuẩn của Trung Quốc, Belarus, Nga và 22TCN 211-93, sử dụng các giá trị phổ biến về các chỉ tiêu cơ lý của BTN chặt, nhựa 60/70 với nhiệt độ mẫu BTN ở 50<sup>0</sup>C để kiểm toán thử nghiệm đối với TL.25B đi qua Quận 2 / TP.Hồ Chí Minh theo Tiêu chuẩn thiết kế ADM của Nga. Cũng theo hướng nghiên cứu này, năm 2018, TS. Lê Anh Thắng và ThS. Nguyễn Trọng Tín thực hiện tính toán chiều sâu LVBX của toàn bộ kết cấu áo đường trên TL.25 theo tiêu chuẩn của nước Nga, hạn chế của tính toán này là sử dụng toán đồ, bảng tra của nước Nga, chỉ tính toán với chỉ tiêu vật liệu ở mức nhiệt 50<sup>0</sup>C – chưa phù hợp với điều kiện thực tế ở Việt Nam.

Trong thời gian gần đây, một số nhà khoa học trong nước đã sử dụng phương pháp mô phỏng số để tính toán, dự báo chiều sâu LVBX của mặt đường BTN. Tác giả Nguyễn Huỳnh Tấn Tài sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trên cơ sở ứng dụng các kết quả của thí nghiệm Wheel Tracking để dự tính độ sâu LVBX, ứng tính toán với mặt đường của Đại lộ Đông Tây / TP.Hồ Chí Minh. TS. Lê Nguyên Khương đã mô phỏng ứng xử của vật liệu mặt đường bằng phương pháp phần tử hữu hạn và các phương pháp gia tải để tính toán chiều sâu LVBX theo mức nhiệt độ làm việc ở 30<sup>0</sup>C và 60<sup>0</sup>C. Bài báo chưa tính toán chiều sâu LVBX trong toàn bộ thời gian làm việc của mặt đường ở các mức nhiệt độ khác nhau.

Việc nghiên cứu theo hướng tính toán, dự báo chiều sâu LVBX để làm căn cứ lựa chọn loại vật liệu BTN phù hợp ngay từ khâu thiết kế là hướng nghiên cứu khả thi, khi được áp dụng vào trong thực tế sản xuất, thi công sẽ

đóng góp đáng kể vào việc hạn chế phát sinh hư hỏng LVBX trong quá trình khai thác, giảm thiểu kinh phí duy tu, sửa chữa. Trong quy trình thiết kế áo đường mềm hiện nay (TCCS 38:2022/TCĐBVN) chưa có yêu cầu tính toán chỉ tiêu LVBX cho kết cấu ADM, do vậy tư vấn thiết kế chưa có quy định tính toán lựa chọn loại BTN có cường độ kháng cắt phù hợp với yêu cầu khai thác mặt đường của dự án thiết kế.

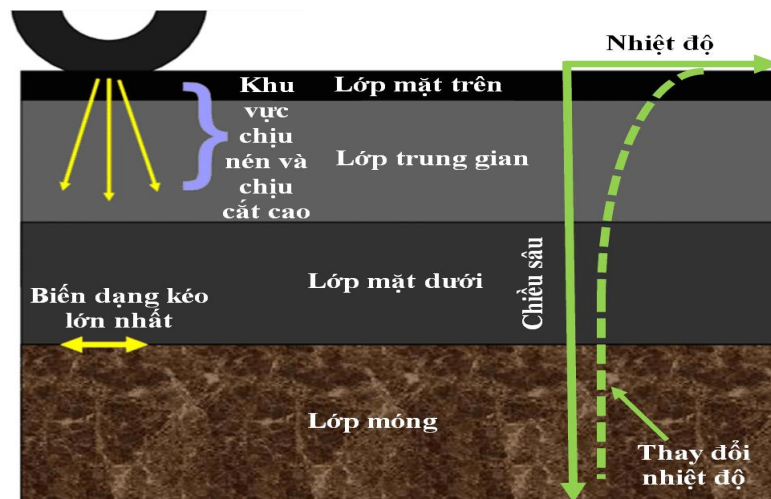
## 1.5. Tổng quan các giải pháp khắc phục lún lớp BTN trong nước và các nước trên thế giới

### 1.5.1. Các giải pháp khắc phục lún lớp BTN trên thế giới

#### 1.5.1.1. Giải pháp cấu tạo và tính toán dự báo chiều sâu LVBX

Các nhà khoa học Mỹ [27,28,41], Nga [69,81,89] và một số nước trên thế giới đã đưa ra quy trình tính toán RD lớp BTN theo yêu cầu khai thác cụ thể của từng tuyến đường khai thác, làm căn cứ lựa chọn loại BTN có cường độ kháng cắt phù hợp yêu cầu khai thác từng tuyến đường, tránh xảy ra LVBX vượt quá ngưỡng cho phép.

Từ sơ đồ phân bố ứng suất trong các lớp vật liệu áo đường, các nhà khoa học khuyến cáo bố trí lại các lớp vật liệu [36,41,70,72]: cần chọn lớp mặt với chiều dày 8 ÷ 10 cm từ BTN có cường độ kháng nén và cường độ kháng cắt trượt cao, giảm tối đa hiện tượng LVBX. Lớp mặt dưới cùng có cường độ kéo uốn cao, để tăng khả năng chịu uốn, cường độ kháng nứt mỏi của lớp BTN, xem Hình 1.8.



Hình 1.8: Sơ đồ phân bố nội lực trong kết cấu mặt đường

### 1.5.1.2. Giải pháp vật liệu

Nghiên cứu các loại vật liệu mới có sức kháng cắt cao: Từ các nghiên cứu trong nước và trên thế giới, cho thấy sức kháng cắt trượt của BTN phụ thuộc lực nội ma sát (hệ số nội ma sát), lực dính của BTN và hệ số nhớt của BTN. Nếu có biện pháp tăng được giá trị các tham số trên thì đều có tác dụng tăng được sức kháng cắt trượt cho BTN. Để tăng lực nội ma sát, cần tăng hàm lượng cốt liệu thô (đá dăm) trong BTN từ 45% như BTN thông thường hiện nay, lên 70-80% (Stone Mastic Asphalt). Tăng lực dính bằng cách sử dụng loại nhựa bi tum có độ nhớt cao (độ kim lún 40/50 hoặc 50/60) hoặc sử dụng phụ gia. Tăng lực nội ma sát rất có hiệu quả với các nước có khí hậu nắng nóng như Việt Nam do độ lớn hệ số nội ma sát không phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường. Sử dụng phụ gia tăng lực dính cho nhựa bi tum, tuy nhiên khi ở nhiệt độ cao, lực dính dễ bị suy giảm, nên hiệu quả tăng sức kháng cắt không cao.

Ngoài việc thay thế các loại vật liệu để làm BTN, các nước cũng đang nghiên cứu áp dụng thiết kế thành phần BTN theo phương pháp Superpave thay thế phương pháp Marshall. Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement - Mặt đường BTN làm việc hoàn hảo) là một trong những sản phẩm nổi bật của Chương trình nghiên cứu chiến lược đường ô tô (SHRP) được tiến hành nhằm mục đích xây dựng một tiêu chuẩn thí nghiệm và phân loại mới cho nhựa đường, đề xuất một phương pháp thiết kế hỗn hợp BTN mới có xét tới quan hệ chặt chẽ giữa các thí nghiệm trong phòng và điều kiện làm việc của kết cấu BTN ở hiện trường.

### 1.5.1.3. Các giải pháp quản lý khai thác

Ở một số nước châu Âu (Đức, Pháp, Ý, Áo, Hungari, Balan), để đối phó với LVBX đã đưa ra quy định hạn chế các phương tiện vận tải nặng lưu thông vào các giờ nắng nóng, khi nhiệt độ không khí trên 32°C, tương ứng nhiệt độ bề mặt lớp BTN  $\geq 50^\circ\text{C}$ , là mức nhiệt dễ xảy ra biến dạng không hồi phục lớp BTN [78].

Một số quốc gia còn đưa ra quy định không chế tải trọng trục xe lưu hành vào những giờ nắng nóng:

**Bảng 1.3: Tải trọng giới hạn trong những giờ nắng nóng tại một số nước**

TT	Quốc gia	Tải trọng trục đơn lớn nhất cho phép, T
1	Belarus	6,0
2	Kazastan	8,0
3	Ucraina	7,0
4	Nga	8,0

Những giải pháp này đã được triển khai và kết quả cho thấy việc kiểm soát LVBX đạt hiệu quả rõ rệt.

Các địa phương thuộc vùng khí hậu IV của Nga đã hạn chế các phương tiện có tải trọng trục 11,5T và 13T lưu hành trên các tuyến đường từ 12h00 đến 15h00, vì trong thời gian này lớp BTN có nhiệt độ cao làm suy giảm cường độ kháng cắt của BTN [78,81].

### ***1.5.2. Các giải pháp khắc phục lún lóp BTN tại Việt Nam***

Để hạn chế, khắc phục lún lóp BTN trên các tuyến đường tại Việt Nam, Bộ GTVT đã ban hành một số giải pháp như:

#### ***1.5.2.1. Giải pháp về vật liệu mặt đường***

Bộ Giao thông vận tải đã ban hành Quyết định số 858/QĐ-BGTVT ngày 26/3/2014 [1] để hướng dẫn áp dụng hệ thống các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành nhằm tăng cường quản lý chất lượng thiết kế và thi công mặt đường bê tông nhựa nóng đối với các tuyến đường ô tô có quy mô giao thông lớn. Theo đó, quy định sử dụng cốt liệu đối với vật liệu mặt đường theo hướng thô hóa cốt liệu, có tác dụng làm tăng hệ số nội ma sát của hỗn hợp, góp phần làm tăng cường độ kháng cắt của hỗn hợp BTN.

Bộ Giao thông vận tải cũng ban hành Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT ngày 29/4/2014 [2] ban hành Quy định kỹ thuật về phương pháp thử độ sâu vết hằn bánh xe của bê tông nhựa xác định bằng thiết bị wheel tracking để đánh giá khả năng kháng hằn lún của vật liệu BTN trước khi đưa vào sử dụng.



Theo đó, đưa ra 03 phương pháp để đánh giá: Phương pháp A - mẫu ngâm trong nước 50 °C; Phương pháp B và C - mẫu trong môi trường không khí 60 °C.

Hạn chế của quy định chiều sâu hần lún mẫu thí nghiệm theo chu kỳ tải trọng là chỉ có ý nghĩa định tính, đưa ra quy định yêu cầu tối thiểu cường độ kháng cắt của BTN. Không áp dụng để tính chiều sâu LVBX thực tế của các dự án, phụ thuộc điều kiện nhiệt độ và lưu lượng trục xe khai thác thực tế của các tuyến đường.

Nhựa đường polyme có lực dính và khả năng chịu nhiệt tốt nên BTN sử dụng nhựa đường Polyme có độ kháng cắt cao hơn so với BTN sử dụng nhựa thông thường. Nhằm định hướng và thúc đẩy việc sử dụng BTNP trong xây dựng mặt đường, Bộ Giao thông vận tải và Bộ Khoa học & Công nghệ đã ban hành các tiêu chuẩn: TCVN 11193:2021 (Nhựa đường Polyme - Yêu cầu kỹ thuật); TCVN 13567-2:2022 (Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng - Thi công và nghiệm thu, Phần 2: Bê tông nhựa chặt sử dụng nhựa đường polyme) thay thế 22TCN 356-06 để quy định các yêu cầu kỹ thuật về vật liệu, công nghệ chế tạo hỗn hợp, công nghệ thi công, kiểm tra, giám sát và nghiệm thu các lớp mặt đường BTN sử dụng chất kết dính là nhựa đường polyme.

#### 1.5.2.2. Giải pháp về quản lý khai thác

Các phương tiện lưu thông với tải trọng vượt quá quy định là một trong những nguyên nhân chủ yếu gây ra hư hỏng mặt đường BTN ở Việt Nam trong đó có hư hỏng LVBX, để hạn chế các phương tiện này, Bộ Giao thông vận tải đã ban hành Thông tư số 06/2017/TT-BGTVT ngày 28/12/2017 Quy định quy trình sử dụng phương tiện, thiết bị kỹ thuật nghiệp vụ và sử dụng kết quả thu được từ phương tiện, thiết bị kỹ thuật nghiệp vụ làm căn cứ để xác định vi phạm hành chính và xử phạt vi phạm hành chính trong lĩnh vực giao thông đường bộ, đây được xem như một giải pháp nhằm kiểm soát, hạn chế các phương tiện quá khổ, quá tải lưu thông trên đường bộ[3].

Ngoài ra, để kịp thời đánh giá, khắc phục hư hỏng LVBX trên mặt đường, nhằm hạn chế sự phát triển của LVBX cũng như đảm bảo an toàn giao thông, Tổng cục Đường bộ Việt Nam đã ban hành TCCS 21:2018/TCĐBVN để đo và đánh giá hư hỏng LVBX xảy ra trên mặt đường mềm, đưa ra các giới hạn cần thiết để sửa chữa, khắc phục.

## **1.6. Những vấn đề cần nghiên cứu về biến dạng LVBX trong lớp BTN trong điều kiện Việt Nam.**

Với tình hình hư hỏng LVBX thực tế tại Việt Nam và các kết quả nghiên cứu, khắc phục về biến dạng LVBX trong lớp BTN đã có trong và ngoài nước, có thể thấy một số vấn đề cần hoàn thiện, bổ sung như:

- Nghiên cứu phương pháp tính toán dự báo hằn lún lớp BTN để lựa chọn loại BTN phù hợp với yêu cầu khai thác cho các dự án, phù hợp với điều kiện nhiệt độ, thi công, vật liệu,... tại Việt Nam.

- Đề xuất các giải pháp khắc phục biến dạng hằn lún lớp BTN trên các tuyến đường hiện nay: loại vật liệu BTN mới có sức kháng cắt phù hợp với điều kiện nắng nóng của Việt Nam, các giải pháp quản lý khai thác liên quan.

## **1.7. Lựa chọn nội dung nghiên cứu của luận án**

Nghiên cứu, sử dụng phương pháp tính toán lý thuyết để xây dựng và đề xuất phương pháp tính toán chiều sâu lún lớp BTN trên làn xe chạy, cho phép xét tổng lưu lượng trục xe chạy vào các giờ khác nhau trong ngày có mức nhiệt độ khác nhau, vào các mùa khác nhau trong năm, xét được sự thay đổi độ lớn ứng suất cắt và độ lớn hệ số nhót thay đổi theo chiều sâu do nhiệt độ thay đổi trong lớp BTN, phù hợp với điều kiện nắng nóng của Việt Nam. Do không có điều kiện kinh phí và thời gian thực hiện các nghiên cứu thử nghiệm hiện trường, trong luận án lựa chọn phương pháp lý thuyết theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục, chỉ sử dụng một tham số hệ số nhót trong tính toán chiều sâu LVBX.

Thí nghiệm trong phòng xác định hệ số nhót phụ thuộc nhiệt độ của một loại BTN hiện có của Việt Nam hiện nay.

Đề xuất một số giải pháp hạn chế xảy ra biến dạng LVBX lớp BTN trong điều kiện Việt Nam.

## **CHƯƠNG 2. PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH ĐÀN NHÓT DẸO CỦA BÊ TÔNG NHỰA TRONG TÍNH TOÁN CHIỀU SÂU LÚN VỆT BÁNH XE LỚP BÊ TÔNG NHỰA MẶT ĐƯỜNG**

Trên cơ sở các phân tích hiện tượng hư hỏng LVBX lớp BTN mặt đường và các phương pháp tính toán xác định chiều sâu LVBX lớp BTN được trình bày ở Chương 1. Trong Chương 2, trình bày phân tích đặc tính đàn nhót dẻo của lớp vật liệu BTN dưới tác dụng của tải trọng động bánh xe trên làn xe chạy, làm cơ sở để xây dựng phương pháp tính toán lý thuyết xác định chiều sâu LVBX lớp BTN sẽ được trình bày ở Chương 3. Thực hiện thí nghiệm xác định hệ số nhót của 1 loại BTN hiện đang được sử dụng rộng rãi ở Việt Nam, phục vụ tính toán chiều sâu LVBX trong điều kiện Việt Nam.

### **2.1. Cơ chế hình thành biến dạng LVBX lớp BTN mặt đường**

#### **2.1.1 Mô hình tải trọng tác dụng lên lớp BTN mặt đường**

Tải trọng bánh xe tác dụng xuống mặt đường bao gồm 2 thành phần tải trọng: tải trọng do trọng lượng bản thân của phương tiện truyền qua các bánh xe theo phương thẳng đứng và lực hãm phanh theo phương ngang.

##### *2.1.1.1 Tải trọng tác dụng theo phương đứng*

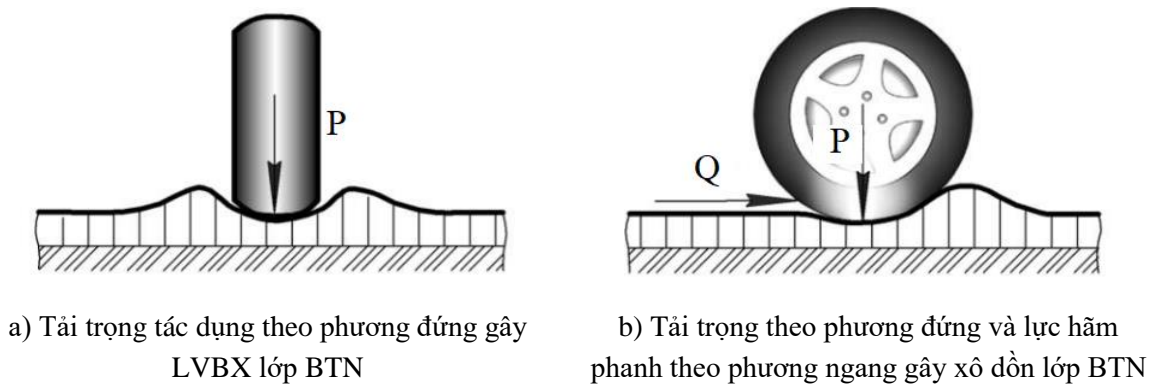
Trên làn xe chạy, tùy theo từng nước đã quy định tải trọng trục xe tính toán do trọng lượng bản thân gây ra, đối với Mỹ quy định tải trọng trục tính toán là 18 kip (tương đương 8,2T), theo Quy trình của Nga quy định 3 loại tải trọng tiêu chuẩn 10T, 11,5T và 13T cho các tuyến đường trục khác nhau. Ở Việt Nam quy định tải trọng trục tính toán là 10T cho các tuyến quốc lộ, tỉnh lộ, và 12T cho các tuyến đường trong các khu công nghiệp, áp lực bánh  $q=0,6\text{MPa}$ , đường kính vệt tải trọng khi có xét hệ số xung kích của tải trọng động có xét ảnh hưởng của lực xung kích lấy  $D=37\text{cm}$ , khi xét với tải trọng tĩnh lấy  $D=33\text{cm}$ .

##### *2.1.1.2 Tải trọng tác dụng theo phương ngang*

Trên khu vực bến xe, trạm dừng đỗ tại các nút giao, trạm thu phí: ngoài tải trọng theo phương đứng, còn xuất hiện lực ngang do hãm phanh ( $Q$ ) gây ra. Độ lớn của lực hãm phanh ngang phụ thuộc chế độ phanh. Trong tính toán,

khi phanh gấp đột ngột, độ lớn của lực hãm phanh ngang có thể đạt  $0,7 \div 0,8$  tải trọng đứng P.

Ngoài ra, khi lưu hành trên đường, do nhiều lý do khác nhau như khi cần tăng giảm tốc độ, khi lên dốc, xuống dốc...người lái các phương tiện còn sử dụng các hình thức tăng ga hoặc phanh nhẹ, gây ra lực ma sát xuống mặt đường, với hệ số ma sát xem Bảng 2.2 theo [91], nhìn chung, lực ngang trên làn xe chạy có giá nhỏ, tối đa  $15 \div 20 \%$  của tải trọng theo phương đứng.



**Hình 2.1: Mô hình tải trọng tác dụng**

Khi xe lưu hành bình thường trên mặt đường không tăng tốc hoặc giảm tốc, bánh xe sẽ gây ra lực ma sát với hệ số ma sát nhỏ, còn gọi là hệ số ma sát lăn [91], xem Bảng 2.1.

**Bảng 2.1: Hệ số ma sát lăn khi xe chạy**

STT	Loại bề mặt đường	Hệ số ma sát lăn (đối với xe bánh hơi)
1	BTN	0,01
2	Bê tông xi măng	0,015
3	Đá, sỏi gia cố nhựa bi tum	0,02
4	Cấp phối đá dăm	0,025
5	Nền đất khô, nhẵn	0,05

Xét trường hợp khi xe trên đường, có tăng tốc và giảm tốc, hệ số ma sát với mặt đường phụ thuộc vận tốc phương tiện [91], theo Bảng 2.2.

**Bảng 2.2: Hệ số ma sát của một số nước trên thế giới**

Tốc độ, km/h	Hệ số ma sát tối đa					
	Mỹ	Canada	Thụy Điển	Úc	Malasia	Trung Quốc
80	0,14	0,14	0,14	0,26	0,14	0,14
90	0,13	0,13	0,13	0,18	-	-
100	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12
110	0,1	0,1	0,1	0,12	-	-
120	0,09	0,09	0,09	0,11	0,1	0,1

Theo [66,87] do lực ma sát theo Bảng 2.1 và Bảng 2.2 có giá trị nhỏ, nên trong tính biến dạng LVBX trên làn xe chạy, có thể bỏ qua thành phần lực ma sát, chỉ tính ứng suất cắt do tải trọng theo phương đứng gây ra.

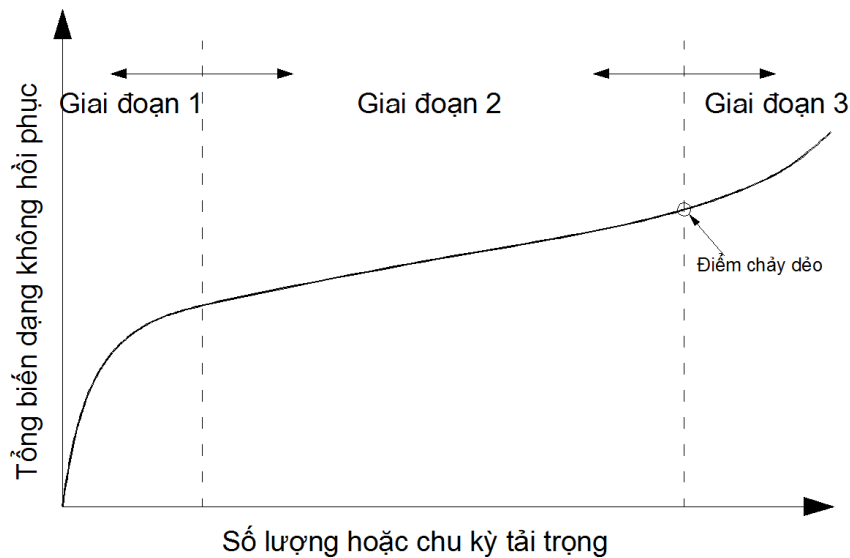
### **2.1.2 Cơ chế hình thành LVBX lớp BTN mặt đường**

Hiện tượng LVBX là 1 trong số các dạng hư hỏng lớp BTN mặt đường, đặc biệt là dạng hư hỏng phổ biến đối với khu vực có khí hậu nắng nóng. Biến dạng LVBX là dạng biến dạng hình học (là biến dạng hình dạng, không làm thay đổi thể tích lớp vật liệu) do ứng suất cắt trong lớp BTN gây ra, khi độ lớn của ứng suất cắt vượt quá giới hạn chảy dẻo của hỗn hợp BTN. Do tải trọng tác dụng trên làn xe chạy là tải trọng động, khi đó biến dạng của lớp BTN là quá trình biến dạng đàn nhớt dẻo. Quá trình hình thành LVBX lớp BTN dưới tải trọng trùng phục được phát triển theo 3 giai đoạn [36,41,49,54], phụ thuộc điều kiện tải trọng, nhiệt độ môi trường và loại vật liệu BTN. Với mỗi loại vật liệu BTN và điều kiện môi trường nhất định, biến dạng vĩnh cửu lớp BTN chỉ phụ thuộc thời gian tác dụng của tải trọng (số lượt trùng phục tải trọng), xem Hình 2.2, biến dạng gồm 3 giai đoạn:

Giai đoạn 1: là giai đoạn có tốc độ biến dạng không hồi phục (tỉ lệ biến dạng trên số lượt tải trọng tác dụng) có giá trị lớn. Biến dạng không hồi phục giai đoạn đầu gồm 2 thành phần do biến dạng thể tích khi lớp BTN bị chèn ép lu lèn thứ cấp do tải trọng bánh xe gây ra khi mới đưa vào khai thác và biến dạng hình học do ứng suất cắt gây ra. Càng về sau tốc độ biến dạng giảm dần.

Giai đoạn 2: tốc độ biến dạng giảm dần, quan hệ giữa biến dạng và số lượng trục xe có xu hướng là tuyến tính. Đây là giai đoạn biến dạng không hồi phục tương đối ổn định, độ lớn biến dạng do ứng suất cắt gây ra tăng dần, gây ra hằn lún lớp BTN do ứng suất cắt trong quá trình khai thác.

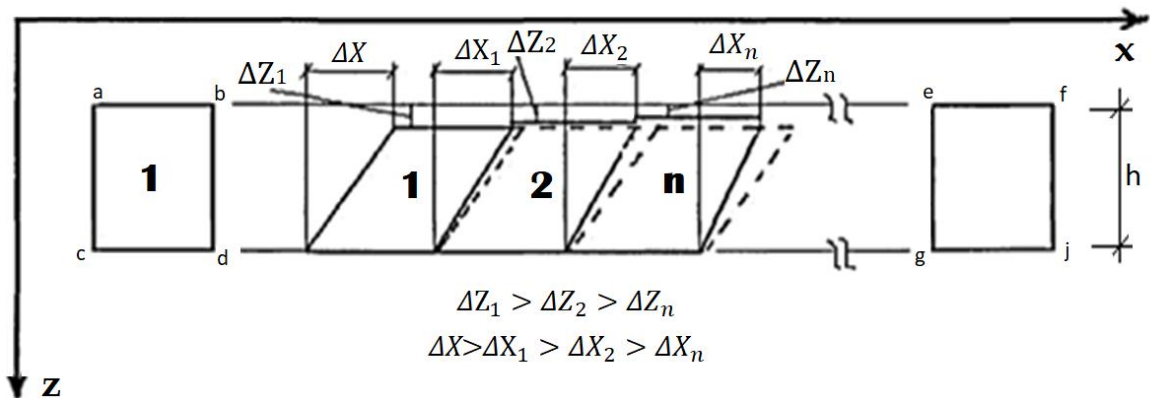
Giai đoạn 3: là giai đoạn biến dạng dẻo không hồi phục có tốc độ biến dạng rất lớn, làm phát triển nhanh chiều sâu LVBX, gây phá hoại lớp BTN.



**Hình 2.2: Các giai đoạn hình thành biến dạng không hồi phục lớp BTN**

Như đã phân tích ở trên, trên làn xe chạy chủ yếu do tải trọng đứng bánh xe ( $P$ ) tác dụng xuống mặt đường, khi đó trong các lớp vật liệu xuất hiện ứng suất pháp và ứng suất cắt gây biến dạng lớp vật liệu. Do cường độ chịu nén lớp BTN lớn hơn so với áp lực bánh xe tác dụng lên mặt đường, nên ứng suất pháp tuyến do áp lực bánh xe chỉ gây ra biến dạng đàn hồi lớp vật liệu, khi bánh xe dời đi thì biến dạng được hồi phục. Trong trường hợp các lớp vật liệu khi thi công lu lèn không đáp ứng hệ số độ chặt yêu cầu, có thể xảy ra lún do tái lu lèn bánh xe gây ra. Trong luận án, không xét hằn lún do hiện tượng tái lu lèn gây ra. Xét trường hợp biến dạng hình học lớp BTN trên làn xe chạy do ứng suất cắt hình thành bởi tải trọng theo phương đứng gây ra, do vật liệu BTN có cường độ kháng cắt nhỏ, nên khi ứng suất cắt do tải trọng gây ra, vượt quá giới hạn dẻo quy ước ( $\tau_k$ ), sẽ gây biến dạng hình học không hồi phục lớp BTN (theo điều kiện dẻo Tresca-Saint Venant), tích tụ quá trình trùng phục tải trọng trong quá trình khai thác tạo ra LVBX.

Quá trình hình thành LVBX trên mặt đường là quá trình tích tụ biến dạng dẻo do trùng phức tải trọng bánh xe gây ra trong lớp BTN. Chiều sâu vết lún tăng dần sau mỗi lần bánh xe lăn qua. Mỗi lần bánh xe di chuyển qua mặt cắt tính toán, phần biến dạng không hồi phục gây ra bởi tải trọng bánh xe trong lớp BTN mặt đường phân đều ra xung quanh vết bánh xe, trong đó phần BTN chuyển dịch ra 2 bên vết bánh tạo thành vết gờ trôi 2 bên vết bánh xe, tạo ra LVBX dọc theo phương chuyển động. Vết hằn lún bánh xe trên làn xe chạy có mặt cắt ngang và kích thước tương tự nhau dọc theo suốt làn đường. Chiều sâu vết hằn lún lớn nhất nằm tại tâm vết bánh xe, càng ra xa vết tải trọng, một mặt giá trị ứng suất cắt gây biến dạng lớp vật liệu giảm dần, mặt khác do phần vật liệu nằm phía ngoài vết tải trọng cản trở, trong khi tại bề mặt lớp vật liệu là bề mặt tự do, nên một phần thể tích khối vật liệu bị biến dạng có xu hướng chuyển dịch trôi lên trên, tạo thành vết gờ 2 bên vết hằn lún (xem Hình 2.3).



**Hình 2.3: Cơ chế hình thành LVBX lớp BTN mặt đường**

Từ Hình 2.3 và theo [7,9,23,72], tại phân tố thứ  $i$ , ta có:

- Biến dạng trượt ngang của phân tố:  $\gamma_i = \frac{\Delta X_i}{h}$

- Biến dạng theo phương đứng của phân tố:  $\varepsilon_i = \frac{\Delta Z_i}{h}$ ,

trong đó:  $\Delta X_i, \Delta Z_i$  – tương ứng là chuyển dịch trượt ngang và độ lún theo phương đứng của phân tố thứ  $i$ ;

$h$ - chiều cao của phân tố.

Dưới tác dụng của tải trọng động bánh xe trên làn xe chạy, BTN thể hiện đặc tính đàn nhót, quá trình hình thành biến dạng LVBX trên làn xe chạy là quá trình biến dạng nhót dẻo của BTN. Để tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN, cần phân tích đặc tính đàn nhót dẻo của loại BTN tính toán, xác định độ lớn hệ số nhót và mô đun đàn hồi động, phụ thuộc nhiệt độ và thời gian tác dụng của tải trọng.

### **2.1.3 Phân loại LVBX theo hình dạng và kích thước vết lún**

Như đã thể hiện trên hình 1.3, biến dạng LVBX mặt đường thường xảy ra theo 1 trong 2 loại biến dạng sau: biến dạng LVBX chỉ xảy ra ở lớp BTN và biến dạng LVBX xảy ra ở cả lớp BTN, lớp móng và nền tự nhiên. Để tiện cho công tác khảo sát xác định nguyên nhân gây LVBX trong thực tế, từ số liệu khảo sát hiện trường, trong [40,49,69,70] đã đưa ra các nhận xét phân biệt dạng LVBX theo hình dạng và kích thước vết lún như sau:

#### **2.1.3.1 Trường hợp LVBX chỉ xảy ra ở lớp BTN.**

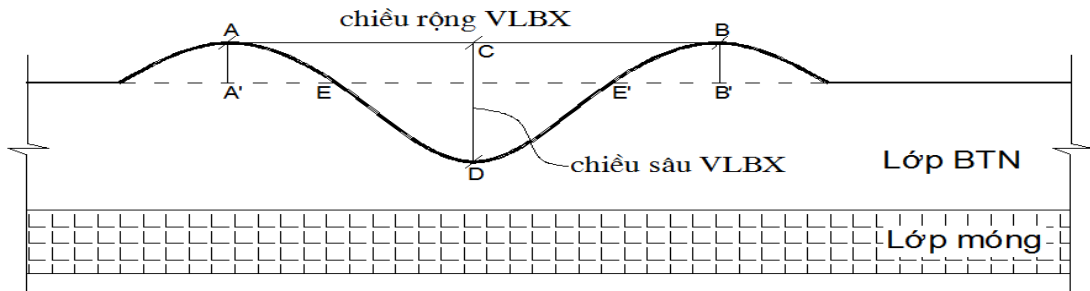
Khi kết cấu áo đường có lớp móng từ các loại vật liệu có cường độ kháng cắt cao không bị biến dạng không hồi phục dưới tác dụng của tải trọng, thì biến dạng LVBX chủ yếu chỉ xảy ra ở lớp BTN mặt đường. Mặt cắt ngang vết lún có dạng đường cong tròn (xem Hình 1.3a, Hình 2.4, Hình 2.5a), khối vật liệu BTN bị đùn trôi sang 2 bên có thể tích bằng với khối vật liệu bị LVBX. Quy luật hình thành và phát triển vết hằn lún bánh xe dưới tác dụng của tải trọng theo phương đứng trong quá trình khai thác là tương đối ổn định, tuân theo quy luật sau [40,49,69,70]:

- Theo phương ngang LVBX: khoảng cách giữa 2 đỉnh vết gờ trôi 2 bên vết hằn lún (đoạn AB trên Hình 2.4), được gọi là chiều rộng LVBX (kí hiệu là L), có độ lớn là tương đối ổn định, ít thay đổi trong suốt quá trình hình thành vết hằn lún trong khai thác, phụ thuộc loại phương tiện. Đoạn EE' là chiều rộng vết lún của bản thân lớp BTN cũng có độ lớn tương đối ổn định, có độ lớn xấp xỉ bằng 2/3 chiều rộng vết lún (đoạn EE' = 2/3 đoạn AB).

- Theo phương đứng LVBX: chiều sâu vết lún luôn phát triển tăng dần theo thời gian, phụ thuộc lưu lượng trục xe khai thác, nhưng theo tỉ lệ chiều cao vết gờ trôi (đoạn AA' và BB' trên Hình 2.4), luôn có độ lớn xấp xỉ bằng 1/3 chiều sâu vết hằn lún (đoạn AA' = BB' = 1/3 đoạn CD (Hình 2.4).



Các tỉ lệ nêu trên là tương đối ổn định trong suốt quá trình hình thành và phát triển của vết hằn lún bánh xe trong lớp BTN mặt đường.



**Hình 2.4: Mô hình mặt cắt ngang LVBX chỉ xảy ra ở lớp BTN**

### 2.1.3.2 Trường hợp LVBX xảy ra ở cả lớp BTN, lớp móng và nền.

Trường hợp này xảy ra khi lớp móng và nền có cường độ kháng cắt thấp, biến dạng không hồi phục xảy ra ở cả lớp BTN, lớp móng và nền tự nhiên. Khi đó khối thể tích của lớp BTN bị biến dạng sẽ bị đẩy xuống phân bố trong lớp móng và lớp nền phía dưới. Khả năng hình thành vết gờ trời 2 bên vết lún không xảy ra hoặc có xảy ra nhưng có chiều cao không đáng kể, tùy theo mức độ biến dạng không hồi phục các lớp móng và nền. Bề mặt vết lún không có dạng đường cong tròn, mà mép vết lún có dạng vách đứng, mức độ đúng của vách phụ thuộc biến dạng lún của lớp móng và nền (xem hình 2.5b) [69,70].

Trên hình 2.5 thể hiện hình ảnh hiện trường 2 loại biến dạng LVBX thường gặp trong thực tế [69,70]. Từ kết quả đo đạc thực tế LVBX, có thể đưa ra kết luận loại LVBX chỉ xảy ra ở lớp BTN hay xảy ra ở cả lớp BTN và các lớp móng và nền tự nhiên.



a. LVBX chỉ trong lớp BTN

b. LVBX lớp BTN, lớp móng và nền

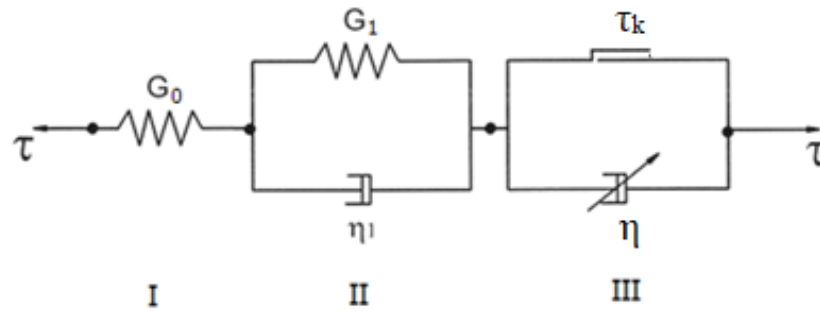
**Hình 2.5: Phân loại LVBX mặt đường**

## 2.2. Phân tích đặc tính đàn nhót dẻo vật liệu BTN phục vụ tính toán LVBX của lớp BTN mặt đường

### 2.2.1. Mô hình cơ học vật liệu BTN dưới tác dụng của tải trọng động

Dưới tác dụng của tải trọng động bánh xe, lớp vật liệu BTN thể hiện đặc tính đàn nhót, khi ứng suất do tải trọng gây ra chưa vượt quá giới hạn cho phép, biến dạng của lớp BTN là biến dạng đàn nhót, khi ứng suất vượt quá giới hạn chảy dẻo quy ước ( $\tau_k$ ), biến dạng đàn nhót chuyển sang biến dạng nhót dẻo. Khi bánh xe rời đi, phần biến dạng đàn nhót của lớp vật liệu được hồi phục, còn lại là phần biến dạng nhót dẻo, là biến dạng không hồi phục, tạo thành LVBX. Do vậy, để tính toán chiều sâu LVBX trên làn xe chạy bằng phương pháp lý thuyết theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục, cần xét đặc tính đàn nhót dẻo của BTN, từ đó lựa chọn mô hình cơ học của vật liệu bao gồm các phần tử thể hiện đặc tính biến dạng đàn - nhót và các phần tử thể hiện đặc tính biến dạng nhót dẻo của vật liệu phục vụ tính toán. Trường hợp xét biến dạng đàn nhót của BTN, thường chọn các mô hình gồm các phần tử lò xo (đặc trưng cho đặc tính đàn hồi) và phần tử pit tông (đặc trưng cho đặc tính nhót) [23,69,70], các phần tử trên hoặc mắc song song hoặc mắc nối tiếp với nhau tùy mô hình lựa chọn. Khi xét biến dạng không hồi phục (biến dạng nhót dẻo) của BTN, trong mô hình tính cần có thêm phần tử trượt xanh cơ năng- coulomb để xét giới hạn chảy dẻo quy ước của BTN.

Hiện nay có nhiều mô hình cơ học của vật liệu được áp dụng trong tính toán ứng suất - biến dạng của lớp BTN. Trong luận án, khi xét lớp BTN chịu tác dụng của tải trọng động gây biến dạng đàn nhót dẻo cho lớp BTN, chọn sử dụng mô hình theo cơ học môi trường liên tục bao gồm 3 nhóm phần tử liên kết nối tiếp nhau theo [64,65,69,70] (Hình 2.6): nhóm I đặc trưng cho đặc tính đàn hồi, gồm 1 phần tử lò xo có mô đun trượt  $G_0$ , nhóm phần tử II đặc trưng cho đặc tính đàn nhót, biến dạng tuyến tính, gồm phần tử lò xo có độ cứng  $G_1$ , liên kết song song với phần tử pit tông có hệ số nhót không đổi (nhót newton)  $\eta_1$ , có độ lớn phụ thuộc loại BTN. Nhóm phần tử thứ III, đặc trưng tính nhót dẻo của BTN gồm phần tử xanh cơ năng đặc trưng giới hạn chảy dẻo của BTN, liên kết song song với pit tông có hệ số nhót dẻo thay đổi (nhót phi newton), phụ thuộc tốc độ biến dạng do tải trọng gây ra.



**Hình 2.6: Mô hình cơ học của BTN khi xét biến dạng đàn nhót dẻo**

Khi ứng suất cắt do tải trọng gây ra có giá trị nhỏ, chưa vượt quá giới hạn chảy dẻo quy ước của BTN ( $\tau_k$ ), biến dạng của lớp vật liệu là biến dạng đàn nhót có hồi phục, gồm nhóm phần tử I và nhóm phần tử II làm việc, có hệ số nhót không đổi. Nhưng khi ứng suất cắt do tải trọng gây ra ( $\tau_{max}$ ) vượt giới hạn chảy dẻo quy ước của BTN ( $\tau_k$ ), phần tử xanh vỡ năng của nhóm phần tử III tham gia làm việc, biến dạng vật liệu từ biến dạng đàn nhót chuyển sang biến dạng nhót dẻo, là biến dạng phi tuyến, không hồi phục. Ở giai đoạn này, hệ số nhót  $\eta_1$  chuyển sang hệ số nhót dẻo  $\eta$ , độ lớn của nó ngoài phụ thuộc độ nhót của mỗi loại BTN, còn phụ thuộc tốc độ biến dạng của lớp BTN.

Từ phân tích trên cho thấy, mức độ biến dạng nhót dẻo của BTN phụ thuộc độ lớn hệ số nhót dẻo ( $\eta$ ) của BTN và độ lớn ứng suất cắt do tải trọng gây ra. Quan hệ giữa hệ số nhót và ứng suất cắt gây biến dạng không hồi phục ở mức nhiệt độ xác định, theo lý thuyết dẻo được thể hiện theo công thức:

$$\eta = \frac{\tau_{max} - \tau_k}{\frac{d\gamma}{dt}} = \frac{\tau}{\frac{d\gamma}{dt}}, \quad (2.1)$$

trong đó:  $\eta$  - hệ số nhót dẻo của BTN, độ lớn thay đổi phụ thuộc loại BTN, nhiệt độ và tốc độ biến dạng, được xác định bằng thí nghiệm mẫu, MPa.s;

$\tau$  - ứng suất cắt gây biến dạng không hồi phục của BTN, MPa;

$\tau_k$  - giới hạn chảy dẻo của BTN, MPa;

$\tau_{max}$  - ứng suất cắt lớn nhất do tải trọng gây ra, MPa;

$d\gamma/dt$  - tốc độ biến dạng, 1/s.

Biến đổi công thức (2.1), nhận được quan hệ giữa ứng suất cắt gây biến dạng không hồi phục với hệ số nhớt dẻo của BTN và tốc độ biến dạng trong miền biến dạng dẻo:

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt}. \quad (2.2)$$

Biến dạng LVBX trên mặt đường được hình thành là do tích tụ biến dạng không hồi phục lớp BTN do trùng phục bánh xe gây ra trong suốt quá trình khai thác.

Độ lớn của hệ số nhớt của từng loại BTN phụ thuộc độ nhớt của nhựa bitum và thành phần cấp phối của cốt liệu. Khi độ nhớt của nhựa bitum tăng lên hoặc khi nhiệt độ môi trường giảm sẽ làm tăng hệ số nhớt của BTN, ngược lại khi độ nhớt của nhựa bitum giảm hoặc nhiệt độ môi trường tăng lên sẽ làm giảm độ lớn hệ số nhớt. Các loại phụ gia sử dụng trong nhựa bitum góp phần làm tăng độ dính bám, tăng khả năng chịu nhiệt của nhựa bitum, đều góp phần làm tăng hệ số nhớt của BTN. Ngoài ra, thành phần cấp phối, kích cỡ hạt, độ nhám bề mặt cốt liệu, cũng góp phần làm thay đổi hệ số nhớt của BTN.

Từ công thức (2.2) cho thấy, để xác định mức độ biến dạng dẻo của lớp BTN gây LVBX, cần xác định độ lớn hệ số nhớt của BTN và xác định mô đun đàn hồi động của BTN phục vụ tính toán ứng suất cắt gây ra biến dạng dẻo trong lớp BTN.

### **2.2.2. Mô đun đàn hồi động của vật liệu BTN**

#### **2.2.2.1. Khái niệm mô đun đàn hồi động của vật liệu BTN**

Lớp BTN mặt đường là vật liệu có tính lưu biến, thể hiện đặc tính đàn nhớt dẻo. Dưới tác dụng của tải trọng bánh xe, các đặc trưng cơ lý của BTN thể hiện ứng xử của lớp vật liệu như mô đun đàn hồi, hệ số nhớt của BTN, phụ thuộc nhiệt độ và tốc độ biến dạng.

Trên làn xe chạy, tải trọng tác dụng lên lớp BTN mặt đường là tải trọng động, nên ứng xử của lớp vật liệu BTN thể hiện đặc tính đàn nhớt. Khi đó, tham số đặc trưng khả năng kháng biến dạng của vật liệu, không chỉ có tham số mô đun đàn hồi, mà còn tham số mô đun nhớt, phụ thuộc hệ số nhớt của

vật liệu. Để đơn giản trong tính toán, trong các bài toán động lực học mô tả quan hệ ứng suất - biến dạng của lớp vật liệu chịu tác dụng của tải trọng động. sử dụng tham số mô đun đàn hồi động, quy đổi ứng xử động lực học của vật liệu có tính đàn nhớt về ứng xử động lực học của vật liệu đàn hồi tương đương, thông qua việc thay thế đại lượng mô đun đàn hồi và mô đun nhớt của vật liệu đàn nhớt bằng đại lượng mô đun đàn hồi động của vật liệu theo nguyên lý đàn hồi – đàn nhớt tương đương [23,25,26,56,57,58,60].

Theo lý thuyết đàn nhớt, mô đun phức động cho phép xét được đặc tính đàn hồi và đặc tính nhớt của BTN, là một trong số các đại lượng đặc trưng cho quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của vật liệu có tính đàn nhớt. Trong mô đun phức động  $E^*$ , phần thực đặc trưng cho mô đun đàn hồi  $E'$  và phần ảo, đặc trưng cho mô đun nhớt  $E''$ :

$$E^* = \frac{\sigma_0 \cdot e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \varphi)}} = E' + iE'' \text{ hay } E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi + i \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi, \quad (2.3)$$

trong đó:  $E^*$ - mô đun phức, MPa;

$E'$  - mô đun đàn hồi (thành phần thực):

$$E' = |E^*| \cos \varphi; \quad (2.4)$$

$E''$  - mô đun nhớt (thành phần ảo):

$$E'' = |E^*| \sin \varphi, \quad (2.5)$$

$\varphi$ - góc lệch pha:

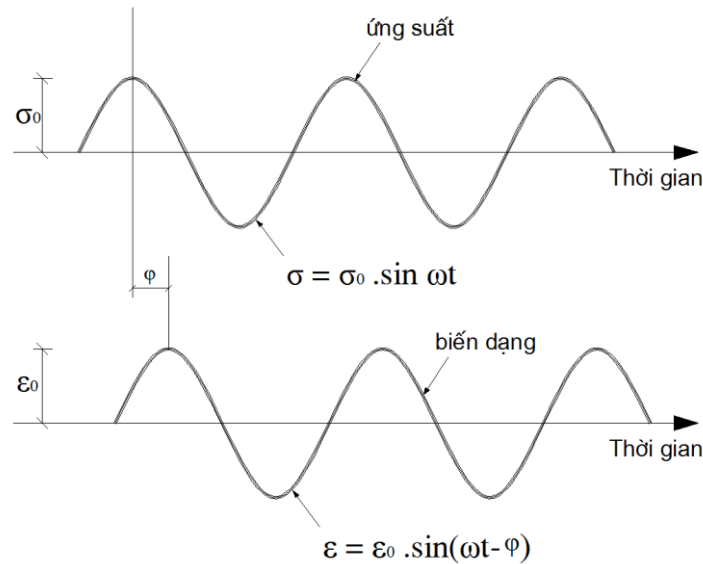
$$\varphi = \frac{\tau}{t} 360^\circ, \quad (2.6)$$

$\sigma_0$ - ứng suất pháp lớn nhất, MPa;

$\varepsilon_0$ - biến dạng lớn nhất;

$\tau$  - thời gian trễ của biến dạng.

t- biến thời gian.



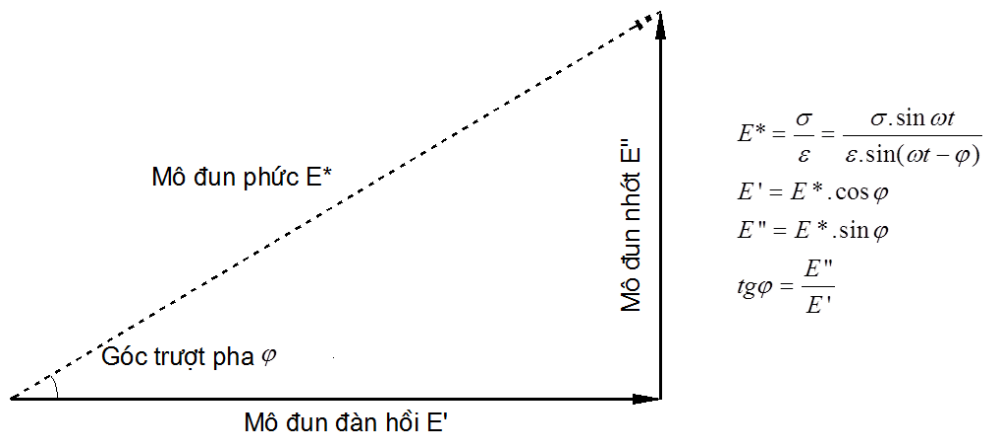
**Hình 2.7: Biểu đồ biến dạng, ứng suất vật liệu đàn nhớt**

Mô đun đàn hồi động là giá trị tuyệt đối của mô đun phức động, kí hiệu  $|E^*|$ . Độ lớn của mô đun đàn hồi động của BTN,  $|E^*|$  có giá trị bằng giá trị lớn nhất của ứng suất chia cho biến dạng lớn nhất, dưới tác dụng của tải trọng dạng điều hòa [18,23,24,26,33,34,36,75]:

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.7)$$

Các kí hiệu như trên.

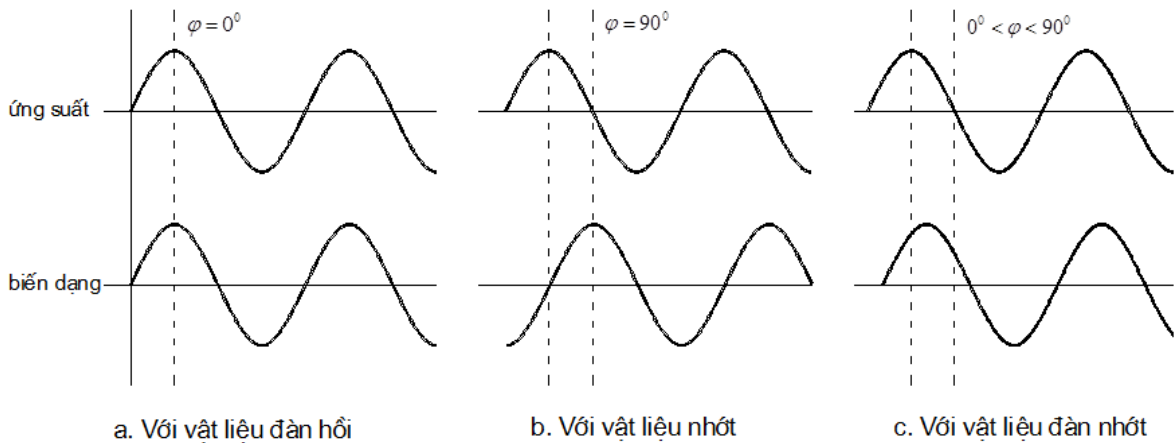
Quan hệ giữa mô đun phức động  $E^*$ , mô đun đàn hồi  $E'$ , mô đun nhớt  $E''$  và góc lệch pha  $\varphi$  xem Hình 2.8.



**Hình 2.8: Quan hệ giữa mô đun đàn hồi, mô đun nhớt và mô đun phức**

Góc trượt pha với vật liệu đàn hồi, có góc  $\varphi = 0$ , còn với vật liệu nhớt có góc  $\varphi = 90^\circ$ . Đối với vật liệu đàn nhớt, ta có  $0 < \varphi < 90^\circ$ . Đối với BTN, góc trượt pha  $\varphi$  có giá trị  $0 < \varphi < 45^\circ$  tùy thuộc loại BTN và nhiệt độ môi trường.

Trong tính toán ứng suất – biến dạng của vật liệu có tính đàn nhớt, ứng với mỗi thời gian tác dụng của tải trọng và mỗi mức nhiệt độ môi trường giá trị mô đun đàn hồi động là không đổi, do vậy trong tính toán kết cấu với tải trọng tác dụng là tải trọng động hay tải trọng tĩnh, cho phép sử dụng chung các công thức, toán đồ, bảng tra của vật liệu đàn hồi trong tính toán thiết kế kết cấu, chỉ khác thay đại lượng mô đun đàn hồi tĩnh của vật liệu đàn hồi bằng đại lượng mô đun đàn hồi động của vật liệu đàn nhớt (thí dụ theo [88] đưa ra 2 phương pháp tính toán thiết kế kết cấu ADM chịu tác dụng của tải trọng động tính cho làn xe chạy và mặt đường chịu tác dụng của tải trọng tĩnh, tính cho khu vực bến xe, bến đỗ, trong cùng 1 quy trình, cho phép dùng chung các công thức và các toán đồ trong tính toán, chỉ khác thay đổi giá trị mô đun động và tĩnh trong tính toán cho từng trường hợp tính).



**Hình 2.9: Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của vật liệu đàn hồi, nhớt và đàn nhớt.**

Đặc tính nhớt của vật liệu có tác dụng hấp thụ năng lượng, làm suy giảm biến dạng do tải trọng động gây ra. Khi vật liệu BTN là đàn nhớt dưới tác dụng của tải trọng động, đại lượng mô đun đàn hồi động là đại lượng đặc trưng cho khả năng kháng biến dạng của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng động, có giá trị lớn hơn so với giá trị mô đun đàn hồi tĩnh của cùng loại vật liệu khi chấp nhận BTN là vật liệu đàn hồi, với cùng độ lớn của tải trọng. Khi chịu tác động của tải trọng động, trong lớp BTN xuất hiện lực cản nhớt có tác

dụng cản trở biến dạng của lớp BTN, có độ lớn phụ thuộc hệ số nhớt của hỗn hợp BTN và tốc độ gia tải (vận tốc phương tiện). Theo kết quả nghiên cứu, độ võng mặt đường mềm dưới tác dụng của tải trọng bánh xe di động có độ lớn nhỏ hơn 20÷30 % so với độ võng do tải trọng tĩnh cùng độ lớn gây ra, sự khác biệt mức độ võng mặt đường phụ thuộc tốc độ phương tiện [65,66]. Theo quy trình thiết kế ADM của Việt Nam [6], giả thiết BTN hoàn toàn là vật liệu đàn hồi nên mặt đường có độ võng động bằng với độ võng tĩnh, do vậy quy định chung lấy giá trị mô đun đàn hồi tính toán là mô đun đàn hồi tĩnh, tính toán kết cấu có mức biến dạng lớn, thiên về an toàn. Trong quy trình thiết kế ADM của Nga [88], phân biệt tính toán kết cấu với tải trọng tĩnh và động, quy định khi tính toán mặt đường trên làn xe tính với mô đun đàn hồi là mô đun động, còn khi tính toán mặt đường tại bến xe, bãi đỗ thì lấy mô đun đàn hồi BTN là mô đun đàn hồi tĩnh. Theo quy trình thiết kế mặt đường mềm của Mỹ [27,28] quy định tính toán với tải trọng động, sử dụng đại lượng mô đun đàn hồi động trong tính toán kết cấu. Theo quy trình thiết kế ADM của Trung quốc (JTGD50-2017), quy định mặt đường BTN tính với tải trọng động, theo mô đun đàn hồi động.

Vật liệu BTN có độ nhớt càng cao thì giá trị đại lượng mô đun động càng lớn, khả năng kháng biến dạng của lớp vật liệu càng cao. Tại cùng một thời điểm, nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN thay đổi, nên sẽ làm thay đổi giá trị hệ số nhớt và giá trị mô đun đàn hồi động của BTN, nên cường độ kháng cắt trượt của BTN sẽ thay đổi theo chiều sâu lớp BTN.

#### 2.2.2.2. *Ảnh hưởng của thời gian tác dụng tải trọng và nhiệt độ đến mô đun đàn hồi động của BTN*

##### a) Ảnh hưởng của thời gian tác dụng tải trọng

Trong các quy trình tính toán thiết kế kết cấu áo đường xác định ứng suất - biến dạng trong các lớp vật liệu ADM theo quy trình Nga [83,88], quy định đại lượng mô đun đàn hồi động được xác định, tương ứng với thời gian tác dụng của tải trọng (tốc độ biến dạng) ở nhiệt độ tính toán, gây ra biến dạng đàn hồi trong các lớp vật liệu của kết cấu, phụ thuộc đường kính chậu võng mặt đường. Ta có thời gian tác dụng của tải trọng:



$$t_u = \frac{D_{cv}}{V}, \quad (2.8)$$

trong đó:  $D_{cv}$  - đường kính chậu vồng mặt đường do tải trọng gây ra, có độ lớn phụ thuộc kết cấu áo đường, m;

$V$  - vận tốc xe chạy theo thiết kế, m/s.

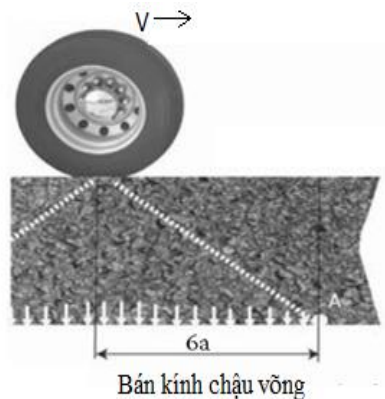
Theo [20,23,27], thời gian tác dụng của tải trọng trong tính toán kết cấu được có giá trị trung bình xác định theo công thức thực nghiệm:

$$t_u = \frac{12a}{V}, \quad (2.9)$$

trong đó:  $a$  - bán kính quy đổi vệt bánh xe, m;

$V$  - vận tốc xe chạy tính toán, m/s.

Bán kính chậu vồng theo [20,23,27] xem Hình 2.10.



**Hình 2.10: Bán kính chậu vồng do tải trọng gây ra**

Theo quy trình thiết kế của Nga và Mỹ, khi tính toán kết cấu mặt đường, đều chấp nhận lấy trung bình thời gian tác dụng của tải trọng là 0,1s, tương đương thời gian tác dụng của tải trọng trục xe với vận tốc tính toán trung bình 80 ÷ 100 km/h. Các giá trị mô đun đàn hồi động tương ứng với từng mức nhiệt độ, của từng loại BTN hiện đã được xác định bằng thí nghiệm mẫu và được công bố trong quy trình của Mỹ [20,23,27] và của Nga [88].

Khác với tính toán độ vồng kết cấu áo đường, khi tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN, do biến dạng lớp BTN trong miền biến dạng dẻo nên vệt hằn lún lớp BTN chỉ xảy ra trong phạm vi diện tích vệt bánh xe, khi đó theo

[65,72,76,80], quy định thời gian tác dụng của tải trọng trong tính toán hần lún lớp BTN được xác định:

$$t_p = \frac{D}{V}, \quad (2.10)$$

trong đó: D- đường kính vệt bánh xe hình tròn quy đổi, m;

V- vận tốc thiết kế tính toán, m/s.

Do giá trị mô đun đàn hồi động phụ thuộc thời gian tác dụng của tải trọng, nên để tính toán biến dạng hần lún với thời gian tác dụng của tải trọng bằng  $t_p$  tính theo (2.10), giá trị mô đun đàn hồi động của BTN được xác định bằng thí nghiệm mẫu với thời gian tác dụng tải trọng tương ứng  $t_p$ .

Khi không có điều kiện thí nghiệm mẫu, cũng có thể tham khảo áp dụng công thức chuyển đổi mô đun đàn hồi động, quy đổi từ thời gian tác dụng của tải trọng tính bằng 0,1s, về thời gian tác dụng của tải trọng  $t_p$  tính theo (2.10), mô đun đàn hồi động được xác định như sau [72,80]:

$$E_u^T = E_{0,1s} \cdot k, \quad (2.11)$$

$$k = \left( \frac{t_p}{0,1} \right)^{-(0,0148T+0,18)} \quad (2.12)$$

trong đó:  $t_p$  - thời gian tính toán của tải trọng tính theo (2.10), phụ thuộc vận tốc phương tiện, s;

$E_{0,1s}$  - mô đun động ứng với thời gian tác dụng của tải trọng  $t=0,1s$ , với nhiệt độ tính toán (T), được xác định bằng thí nghiệm mẫu. Với BTNC nhựa bitum 60/70, tương tự BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011, có thể tham khảo trong [87], ta có:

$$E_{0,1s} = 4939 \cdot e^{(-0,049 \cdot T)}, \quad (2.13)$$

với: T - nhiệt độ tính toán,  $^{\circ}C$ .

Cũng có thể tính mô đun đàn hồi động theo công thức thực nghiệm quy đổi mô đun đàn hồi ở nhiệt độ  $T^0$  về nhiệt độ tính toán, có dạng [38]:

$$E_{(T)}^* = E_0^* \cdot e^{a(T-T_0)}, \quad (2.14)$$

với:  $E_{(T)}^*$ - mô đun động ở nhiệt độ tính toán  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$E_0^*$ - mô đun động ở nhiệt độ dẫn xuất  $T_0$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$a$  - hệ số thực nghiệm, phụ thuộc tần số tác dụng của tải trọng và loại BTN.

## b) Nhiệt độ trong lớp BTN

### Nhiệt độ tại bề mặt lớp BTN

Nhiệt độ trong lớp BTN tại một thời điểm thay đổi theo chiều sâu lớp BTN, phụ thuộc nhiệt độ bề mặt. Nhiệt độ cao làm suy giảm các đặc trưng cường độ của BTN, trong đó có mô đun đàn hồi BTN. Để tính toán các đặc trưng cường độ của lớp BTN thay đổi theo chiều sâu lớp BTN do nhiệt độ thay đổi, cần biết nhiệt độ lớn nhất và nhỏ nhất trên bề mặt lớp BTN trong suốt thời kỳ khai thác.

Để xác định trường nhiệt độ trong lớp BTN theo chiều sâu, có thể áp dụng phương pháp thí nghiệm khảo sát đo đạc hiện trường hoặc tính toán bằng công thức.

Nhiệt độ bề mặt lớp BTN được tính toán thông qua nhiệt độ không khí và nhiệt độ do bức xạ mặt trời, trong đó nhiệt độ bức xạ mặt trời có thể tính toán thông qua cường độ bức xạ mặt trời, hệ số hấp thụ nhiệt ( $\rho$ ) của từng loại vật liệu (phụ thuộc màu sắc vật liệu)... hoặc tính bằng công thức thực nghiệm.

Có 02 công thức thực nghiệm mô tả quan hệ giữa Nhiệt độ không khí - Nhiệt độ mặt đường được xác lập là mô hình SHRP (kết quả của chương trình nghiên cứu chiến lược đường bộ Hoa Kỳ) và mô hình LTPP (kết quả của chương trình nghiên cứu dài hạn mặt đường Hoa Kỳ). Mô hình LTPP đã khắc phục những hạn chế của mô hình SHRP, đưa ra quan hệ Nhiệt độ không khí - Nhiệt độ mặt đường có độ tin cậy cao hơn nên được áp dụng phổ biến hiện nay. Hiện nay, chương trình LTPP đã cập nhật hệ thống khí hậu cho toàn thế giới. Dựa trên chuỗi phân tích số liệu vệ tinh lâu dài (từ năm 1981 đến 2015) cho nghiên cứu và phát triển MERRA (Modern - Era Retrospective analysis for Research and Applications) của NASA. Ở Việt Nam có 108 trạm số liệu MERRA phân bố đều khắp cả nước. Việc sử dụng công thức thực nghiệm này được các nhà khoa học trên thế giới và Việt Nam sử dụng phổ biến do bộ số

liệu chi tiết, cụ thể đến từng khu vực, được cập nhật thường xuyên, phù hợp với tình hình khí hậu diễn biến phức tạp như trong giai đoạn gần đây.

Do không có điều kiện khảo sát xác định nhiệt độ trong lớp BTN, để tính nhiệt độ tính toán lớn nhất trên bề mặt  $T_{\max}$  trong luận án lấy theo LTPP [29], quy định nhiệt độ  $T_{\max}$  được lấy ở 2cm cách bề mặt lớp BTN, phụ thuộc nhiệt độ không khí lớn nhất (xét điều kiện khu vực) và nhiệt độ bức xạ mặt trời (thông qua vị trí địa lý theo độ vĩ tuyến):

$$T_{\max} = 54,32 + 0,78 \cdot T_{kk,\max} - 0,0025 \cdot VD^2 - 15,14 \cdot \log(H+25) + z(9 + 0,61 \cdot \sigma^2)^{0,5} \quad (2.15)$$

Nhiệt độ mặt đường thấp nhất, theo [29] ta có:

$$T_{\min} = -1,56 + 0,72 \cdot T_{kk,\min} - 0,004 \cdot VD^2 + 6,26 \log(H+25) - z(4,4 + 0,52 \cdot \sigma^2)^{0,5} \quad (2.16)$$

trong đó:  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  - nhiệt độ tính toán lớn nhất và nhỏ nhất, °C;

$T_{kk,\max}$ ,  $T_{kk,\min}$  - tương ứng nhiệt độ không khí 7 ngày liên tục lớn nhất và nhỏ nhất, °C;

$VD$  - vĩ độ khu vực;

$H$  - chiều sâu tính toán, trong tính toán LVBX nhiệt độ bề mặt lớp BTN lấy  $H=20\text{mm}$ ;

$z$  - tham số của phân bố chuẩn, lấy theo độ tin cậy, trong điều kiện Việt Nam, có thể lấy độ tin cậy 95%, khi đó tham số  $z=1,645$ ;

$\sigma$  - độ lệch chuẩn số liệu đo.

#### Nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN.

Tính toán nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN để phục vụ tính toán độ lớn tham số mô đun đàn hồi động và độ lớn hệ số nhớt tại các độ sâu tính toán khác nhau trong lớp BTN.

Tham khảo theo [36], đưa ra công thức thực nghiệm, cho phép tính nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN với mức nhiệt độ bề mặt bất kỳ từ  $T_{\min}$  đến  $T_{\max}$  trên bề mặt:

$$T_z = b \cdot \ln(0,01z + 1,0) + T_{bm}, \quad (2.17)$$

trong đó:  $T_z$  - nhiệt độ tại độ sâu  $z$ , °C;

$z$  - độ sâu tính toán, cm;

b - hệ số thực nghiệm, phụ thuộc nhiệt độ bề mặt tính toán, có thể tính theo công thức:  $b = -0,0028.(T_{bm})^2 - 0,1787.(T_{bm}) + 3,406$

$T_{bm}$  - nhiệt độ bất kỳ tại bề mặt lớp BTN,  $^{\circ}\text{C}$ ;

Nhiệt độ bề mặt lớp BTN ( $T_{bm}$ ) có thể được xác định theo công thức đề xuất của Rajib B. Mallick, Tahar El-Korchi như sau [20]:

$$T_{bm} = T_{kk} - 0,00618.VĐ^2 + 0,2289.VĐ + 24,4, \quad (2.18)$$

trong đó:  $T_{kk}$  - nhiệt độ không khí lớn nhất 7 ngày liên tục,  $^{\circ}\text{C}$ ;

VĐ - vĩ độ nơi tuyến đường đi qua.

Thay  $T_{bm}$  vào (2.17) sẽ tính được  $T_z$  ở các độ sâu khác nhau.

Thay các giá trị nhiệt độ bề mặt và theo chiều sâu z lớp BTN theo (2.15) ÷ (2.17) vào công thức (2.13), sẽ xác định được giá trị đại lượng mô đun đàn hồi động của BTN phụ thuộc nhiệt độ tại các độ sâu khác nhau trong lớp BTN.

### **2.3. Thí nghiệm xác định hệ số nhớt hỗn hợp BTN**

#### **2.3.1. Các phương pháp thí nghiệm xác định hệ số nhớt của BTN**

Để tính toán biến dạng không hồi phục, xác định chiều sâu LVBX lớp BTN theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục, cần xác định hệ số nhớt của BTN. Độ lớn hệ số nhớt của từng loại BTN được xác định bằng thí nghiệm mẫu, ngoài phụ thuộc độ nhớt của nhựa bitum và thành phần cấp phối của cốt liệu, còn phụ thuộc tốc độ gia tải mẫu thí nghiệm. Để đơn giản trong tính toán, theo quy trình thí nghiệm của Nga, Mỹ và các nước trên thế giới, đều quy định thí nghiệm mẫu với tốc độ gia tải 50 mm/min (tương đương với tốc độ thiết kế tính toán trung bình của phương tiện khi tham gia giao thông trên đường). Khi sử dụng các loại phụ gia trong nhựa bitum góp phần làm tăng độ dính bám, tăng khả năng chịu nhiệt của nhựa bitum, đều góp phần làm tăng hệ số nhớt của BTN, thành phần cấp phối, kích cỡ hạt, độ nhám bề mặt cốt liệu, cũng góp phần làm thay đổi hệ số nhớt của BTN.

Để xác định hệ số nhớt của BTN hiện có ở Việt Nam cần tiến hành thí nghiệm mẫu cho từng loại BTN. Ở Việt Nam chưa ban hành quy trình thí nghiệm xác định hệ số nhớt của BTN. Tại Mỹ, hiện nay chỉ quy định phương

pháp thí nghiệm xác định hệ số nhớt của nhựa bitum và của vữa asphalt phục vụ tính toán LVBX, mà không quy định thí nghiệm xét hệ số nhớt của hỗn hợp BTN. Tại Nga đã giới thiệu quy trình thí nghiệm hệ số nhớt của hỗn hợp BTN [69,75,79]. Để xác định hệ số nhớt của hỗn hợp BTN phục vụ tính toán LVBX, trong luận án kiến nghị áp dụng quy trình thí nghiệm của Nga.

### 2.3.1.1. Quy trình thí nghiệm xác định hệ số nhớt trực tiếp từ mẫu

Theo [69], hệ số nhớt BTN được thí nghiệm theo mẫu hình trụ, có chiều cao bằng đường kính mẫu, nén dọc trục với tải trọng không đổi trong phạm vi trên dưới 1kN, sao cho sau 10 phút nén mẫu, mẫu biến dạng từ 1÷ 5 mm, trong quá trình thí nghiệm cần đảm bảo mẫu luôn ở giá trị nhiệt độ yêu cầu, giá trị hệ số nhớt được xác định theo công thức:

$$\eta = \frac{k.F.t}{3\pi d^4 (h^{-2} - h_0^{-2})}, \quad (2.19)$$

trong đó: k - hệ số, phụ thuộc kích thước mẫu, với chiều cao bằng đường kính mẫu;

F - lực nén mẫu, kN;

d - đường kính mẫu, mm;

$h_0, h$  - tương ứng là chiều cao mẫu trước và sau thí nghiệm, mm;

t - thời gian thí nghiệm nén mẫu, s.

### 2.3.1.2. Phương pháp thí nghiệm xác định hệ số nhớt gián tiếp từ cường độ nén của BTN

Theo [75,79], mỗi loại BTN ở mỗi mức nhiệt độ nhất định có độ lớn hệ số nhớt và cường độ nén nhất định, phụ thuộc loại nhựa bitum và thành phần cấp phối cốt liệu của hỗn hợp. Nên giữa hệ số nhớt và cường độ nén của mỗi loại BTN ở nhiệt độ tính toán có quan hệ chặt với nhau. Quan hệ trên có dạng như sau:

$$\eta = \left( \frac{R_n}{a} \right)^3, \quad (2.20)$$

trong đó:  $\eta$  - hệ số nhớt tại nhiệt độ tính toán, MPa.s;

$R_n$ - cường độ nén mẫu, phụ thuộc nhiệt độ tính toán, MPa;

$a$  - hệ số, phụ thuộc loại BTN và nhiệt độ tính toán, xác định bằng thí nghiệm mẫu.

Từ kết quả nghiên cứu với loại BTNC có cốt liệu thô nhóm B, có hàm lượng thô  $D \geq 4,75\text{mm}$  trong khoảng  $(40 \div 50) \%$ , nhựa bitum 60/70, trong phạm vi từ  $(0 \div 70) ^\circ\text{C}$ , theo [75,79] giá trị hệ số  $a$  được xác định như sau:

$$a = 0,000107.T^2 + 0,00245.T + 0,0473, \quad (2.21)$$

trong đó:  $T$ - nhiệt độ tính toán.

Với mỗi loại BTN sẽ có độ lớn hệ số nhớt và độ lớn cường độ nén nhất định, vì vậy với mỗi loại BTN quan hệ giữa 2 đại lượng hệ số nhớt và cường độ nén thông qua hệ số  $a$  là đại lượng có độ lớn ổn định, phụ thuộc loại nhựa bitum và thành phần cấp phối của hỗn hợp BTN. Theo [75,79], với hệ số  $a$  cho mỗi loại BTN, khi biết cường độ nén của BTN, theo (2.20) sẽ tính được hệ số nhớt của BTN.

Từ kết quả thí nghiệm theo [75,79] nhận được hệ số nhớt của các loại BTN phụ thuộc nhiệt độ theo bảng 2.3.

**Bảng 2.3. Quan hệ giữa hệ số nhớt dẻo và nhiệt độ của BTN**

Loại BTN	Hệ số nhớt dẻo ở các mức nhiệt độ, MPa.s		
	50 °C	20 °C	0 °C
BTNC, nhựa bitum 60/70, cốt liệu nhóm B, hàm lượng $D \geq 4,75\text{mm}$ từ $40 \div 50\%$	30	$5,10^4$	$2.10^7$
BTNC, nhựa bitum 60/70, cốt liệu nhóm A, hàm lượng $D \geq 4,75\text{mm}$ từ $50 \div 60\%$	55	$8,2.10^4$	$1.10^8$

Từ kết quả nghiên cứu cho thấy, độ lớn hệ số nhớt hoặc cường độ nén của BTN đều có ảnh hưởng đến phát triển biến dạng LVBX lớp BTN. Để tránh xảy ra LVBX lớp BTN mặt đường, cần đảm bảo yêu cầu về độ lớn hệ số nhớt hoặc độ lớn cường độ nén của lớp mặt BTN cho một số vùng khí hậu của Nga theo Bảng 2.4 [75,79]:

**Bảng 2.4. Quy định giá trị hệ số nhót và cường độ nén yêu cầu lớp mặt BTN**

Vùng khí hậu	Hệ số nhót yêu cầu ở 50°C, $\eta$ , MPa.s	Cường độ nén yêu cầu ở 50°C, $R_n$ , MPa
Kaliningrad	17,5	0,84
Sankt Petecrburg	9,0	0,67
Mockva	16,5	0,82
Kracnodar	115,0	1,57
Vùng viễn đông	30,5	1,01
Novosibirck	24	0,93
Voronezh	28	0,98

Theo [68], giữa các đại lượng lực dính và góc nội ma sát với cường độ nén mẫu thí nghiệm của BTN có quan hệ với nhau, tăng lực dính  $C$  làm tăng lực dính kết giữa các hạt cốt liệu, còn tăng thành phần cốt liệu thô không chỉ làm lực nội ma sát (thông qua hệ số nội ma sát  $tg\varphi$ ), có tác dụng làm tăng cản trở dịch chuyển tương đối của các hạt, làm giảm biến dạng của lớp vật liệu, mà còn có tác dụng làm tăng khung cốt chịu lực của hỗn hợp, góp phần làm tăng cường độ nén của hỗn hợp. Khi đó giữa lực dính và góc nội ma sát với cường độ nén của hỗn hợp BTN có quan hệ sau:

$$R_n = 2.C.tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right), \quad (2.22)$$

trong đó:  $C$ - lực dính của hỗn hợp BTN, MPa;

$\varphi$ - góc nội ma sát của hỗn hợp BTN.

Như vậy, với loại BTN có độ lớn lực dính và hệ số nội ma sát cao, thì chiều sâu LVBX tính theo nguyên lý cơ học môi trường rời cho giá trị thấp, đồng thời, với độ lớn lực dính và hệ số nội ma sát cao, theo (2.22) sẽ tính được cường độ nén của hỗn hợp có giá trị cao, thay vào (2.20) sẽ nhận được hệ số nhót có giá trị cao, khi đó sẽ cho độ lớn LVBX có giá trị thấp. Do vậy cho phép sử dụng các phương pháp tính toán chiều sâu LVBX theo nguyên lý cơ học môi trường rời theo tham số lực dính  $C$  và hệ số nội ma sát  $tg\varphi$  hay



theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục theo tham số hệ số nhót đều cho giá trị tương tự nhau.

Từ quy trình thí nghiệm hệ số nhót của BTN theo phương pháp trực tiếp theo (2.19) và gián tiếp theo (2.20) cho thấy, nếu sử dụng phương pháp thí nghiệm gián tiếp, xác định hệ số nhót có quy trình thí nghiệm đơn giản hơn so với phương pháp trực tiếp. Do vậy, theo [75,79], phương pháp thí nghiệm xác định hệ số nhót gián tiếp theo cường độ nén cũng được chấp nhận và đang được sử dụng ở Nga hiện nay.

Loại BTNC theo TCVN 8819:2011 ở Việt Nam có thành phần cốt liệu thô gần tương tự nhóm B theo quy định của Nga, do không có điều kiện thí nghiệm kiểm chứng lại hệ số  $a$  trong điều kiện vật liệu BTN của Việt Nam, nên trong luận án, kiến nghị sử dụng hệ số  $a$  theo công thức (2.21).

### 2.3.1.3. Lựa chọn phương pháp thí nghiệm hệ số nhót BTN

Cả 2 phương pháp xác định hệ số nhót nêu trên có sự giống nhau là hệ số nhót đều được xác định thông qua cường độ nén của mẫu BTN. Sự khác nhau là nén mẫu theo phương pháp trực tiếp thì mẫu chưa bị phá hủy, còn nén mẫu theo phương pháp gián tiếp thì mẫu đã bị phá hủy. Kết quả xác định hệ số nhót theo phương pháp phá hủy mẫu thường cho giá trị thấp hơn, so với phương pháp không phá hủy mẫu. Song sự khác biệt không lớn, nên theo [75,79], có thể sử dụng 1 trong 2 phương pháp thí nghiệm trên để xác định hệ số nhót đều chấp nhận được.

Do điều kiện hiện nay các PTN của Việt Nam chưa được trang bị các thiết bị thí nghiệm chuyên dụng theo phương pháp thí nghiệm xác định hệ số nhót trực tiếp từ thí nghiệm mẫu theo (2.19) trong [69,71], mà chỉ có các thiết bị xác định cường độ nén mẫu đơn giản. Vì vậy, trong luận án kiến nghị lựa chọn phương pháp thí nghiệm xác định hệ số nhót gián tiếp từ cường độ nén của BTN theo (2.20). Các mẫu thí nghiệm được thực hiện tại PTN chuyên dùng, trường Đại học Công nghệ GTVT.

### **2.3.2. Thí nghiệm xác định hệ số nhớt của BTN hiện có tại Việt Nam**

#### **2.3.2.1. Các loại BTN hiện có tại Việt Nam**

Hiện nay ở Việt Nam đang sử dụng phổ biến 03 loại BTNC: BTNC sử dụng nhựa thông thường theo TCVN 8819:2011 [4], BTNC sử dụng nhựa thông thường theo TCVN 13567-1:2022 (trên cơ sở QĐ 858/2014[1]); BTNP theo TCVN 13567-2:2022.

##### **a) BTNC sử dụng nhựa thông thường theo TCVN 8819:2011**

Đây là loại BTN mặt đường truyền thống, được sử dụng nhiều nhất tại Việt Nam, các tuyến đường sử dụng BTNC được xây dựng trước năm 2015 hầu hết sử dụng loại BTN này, trong các năm gần đây loại vật liệu này vẫn được sử dụng. Yêu cầu kỹ thuật đối với loại BTN này như sau:

- Yêu cầu đối với nhựa (bitum): Nhựa đường dùng để chế tạo BTN là loại nhựa đường đặc, gốc dầu mỏ thoả mãn các yêu cầu kỹ thuật quy định tại TCVN 7493:2005. Tham khảo Phụ lục A của TCVN 7493:2005 để lựa chọn loại nhựa đường thích hợp làm BTN nóng. Dùng loại nhựa đường nào do Tư vấn thiết kế quy định. Nhựa đường 60/70 rất thích hợp để chế tạo các loại BTNC và BTNR. Nhựa đường 85/100 rất thích hợp để chế tạo BTNC 4,75.

- Yêu cầu kỹ thuật đối với hỗn hợp BTN phải đảm bảo theo Bảng 3 - TCVN 8819:2011[4], các yêu cầu đối với vật liệu đầu vào, quy trình sản xuất và thi công cũng được trình bày cụ thể trong tiêu chuẩn này.

##### **b) BTNC sử dụng nhựa thông thường theo TCVN 13567-1:2022[5] (trên cơ sở QĐ 858/2014)**

Loại BTNC này được sử dụng từ năm 2014 đến nay và dần thay thế loại BTNC theo TCVN 8819:2011[4]. Các chỉ tiêu kỹ thuật, yêu cầu về vật liệu, quá trình sản xuất và thi công cũng được trình bày chi tiết trong TCVN 13567-1:2022.

BTNC theo TCVN 13567-1:2022[5] có xu hướng thô hóa cốt liệu hơn so với BTNC theo TCVN 8819:2011, làm tăng khả năng kháng cắt trượt của BTN. Một số chỉ tiêu kỹ thuật được điều chỉnh cụ thể như sau:

**Bảng 2.5. Chỉ tiêu kỹ thuật của một số loại BTNC phổ biến tại Việt Nam**

Chỉ tiêu		QĐ858	TCVN 8819:2011	TCVN 13567-1:2022	
Loại BTNC		BTNC 12.5 và BTNC 19			
1. Số chày đâm			75x2	75x2	
2. Độ ổn định ở 60°C, 40 phút, kN			≥ 8	≥ 8	
3. Độ dẻo, mm		1.5 ÷ 4.0	2 ÷ 4	1.5 ÷ 4.0	
4. Độ ổn định còn lại, %		≥ 80		≥ 80	
5. Độ rỗng dư, %	Lớp BTNC trên cùng	4 ÷ 6	3 ÷ 6	4 ÷ 6	
	Lớp BTNC lớp dưới	3 ÷ 6	3 ÷ 6	3 ÷ 6	
6. Độ rỗng cốt liệu, %	4%	Cỡ hạt 12.5	≥ 13.5	≥ 14	≥ 14.0
		Cỡ hạt 19	≥ 13	≥ 13	≥ 13
	5%	Cỡ hạt 12.5	≥ 14.5	-	≥ 15
		Cỡ hạt 19	≥ 14	-	≥ 14
	6%	Cỡ hạt 12.5	≥ 15.5	-	≥ 16
		Cỡ hạt 19	≥ 15	-	≥ 15
	7. Độ rỗng lấp đầy nhựa, %		65 ÷ 75	-	65 ÷ 75
	8. Độ sâu vết hằn bánh xe, mm	10000 chu kỳ	-	≤ 12.5	-
15000 lượt		≤ 12.5	-	-	
20000 lượt		-	-	≤ 12.5	
9. Tỷ lệ $P_{0.075}/P_{ae}$		-	-	0.8 ÷ 1.6	
10. Độ ổn định động, lần/mm		-	-	≥ 1000	

Các chỉ tiêu có sự thay đổi như vậy cơ bản là do cấp phối cốt liệu đã có sự điều chỉnh theo hướng thô hóa, cốt liệu có kích thước  $\geq 4,75$  mm chiếm thành phần  $\geq 50\%$ . Ví dụ đối chiếu với 02 loại BTNC như sau:

**Bảng 2.6. So sánh cấp phối hỗn hợp cốt liệu BTNC 12.5**

Tên tiêu chuẩn	QĐ858	TCVN 8819:2011	TCVN 13567-1:2022
Loại BTNC	<b>BTNC 12.5</b>		
1. Cỡ hạt danh định	12,5	12,5	12,5
2. Cỡ sàng vuông	Lượng lọt sàng, % khối lượng		
31,5	÷	÷	÷
25	÷	÷	÷
19	100	100	÷
16	÷	÷	100
12,5	74 ÷ 90	90 ÷ 100	90 ÷ 100
9,5	60 ÷ 80	74 ÷ 89	68 ÷ 85
4,75	34 ÷ 62	48 ÷ 71	38 ÷ 68
2,36	20 ÷ 48	30 ÷ 55	24 ÷ 50
1,18	13 ÷ 36	21 ÷ 40	15 ÷ 38
0,6	9 ÷ 26	15 ÷ 31	10 ÷ 28
0,3	7 ÷ 18	11 ÷ 22	7 ÷ 20
0,15	5 ÷ 14	8 ÷ 15	5 ÷ 15
0,075	4 ÷ 8	6 ÷ 10	4 ÷ 8

**c) BTNP sử dụng nhựa polyme theo 22TCN 356-06**

BTNP mới được sử dụng nhiều từ năm 2010 tại một số tuyến đường có lưu lượng lớn và các phương tiện tải trọng nặng, vật liệu này thường được sử dụng làm lớp mặt trên do có khả năng kháng cắt trượt lớn, các lớp mặt dưới vẫn sử dụng BTNC thông thường như trên tuyến QL.1 đoạn tránh TP. Phủ Lý, cao tốc Hà Nội – Hải Phòng,...

Từ năm 2022 trở về trước, BTNP được thiết kế chế tạo, sản xuất và thi công theo 22TCN 356-06, từ tháng 6/2022 Bộ Khoa học và Công nghệ đã ban hành TCVN 13567-2:2022 (Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng-Thi công và nghiệm thu- Phần 2: Bê tông nhựa chặt sử dụng nhựa đường polyme) làm căn cứ áp dụng BTNP vào các tuyến đường tại Việt Nam. Nhựa Polyme sử dụng trong BTNP đảm bảo theo TCVN 11193:2021.

TCVN 13567-2:2022 điều chỉnh, bổ sung thêm các tiêu chí kỹ thuật của BTNP, bổ sung thành phần cấp phối hỗn hợp cốt liệu của một số loại BTNP như BTNP16, BTNP25 so với 22TCN 356-06, điều chỉnh thành phần

cấp phối hỗn hợp cốt liệu so với 22TCN 356-06. Ví dụ đối với BTN12.5 như ở bảng sau:

**Bảng 2.7. So sánh cấp phối hỗn hợp cốt liệu BTN 12.5**

Tên tiêu chuẩn	22TCN 356-06	TCVN 13567-2:2022
Cỡ sàng vuông	Lượng lọt sàng, % khối lượng	
19	÷	÷
16	100	100
12,5	90 ÷ 100	90 ÷ 100
9,5	74 ÷ 89	68 ÷ 85
4,75	48 ÷ 71	38 ÷ 68
2,36	30 ÷ 55	24 ÷ 50
1,18	21 ÷ 40	15 ÷ 38
0,6	15 ÷ 31	10 ÷ 28
0,3	11 ÷ 22	7 ÷ 20
0,15	8 ÷ 15	5 ÷ 15
0,075	6 ÷ 10	4 ÷ 8

**d) Chọn loại BTN thí nghiệm**

Do không có điều kiện thí nghiệm nhiều loại BTN khác nhau, nên trong luận án kiến nghị thí nghiệm hệ số nhót cho 01 loại BTNC.

Hiện nay tình trạng LVBX ở Việt Nam, chủ yếu xảy ra trên các tuyến đường sử dụng loại BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011. Để tiện so sánh đánh giá chiều sâu LVBX giữa tính toán theo công thức đề xuất với chiều sâu LVBX lớp BTN thực tế trên các tuyến đường khảo sát, trong luận án chọn thí nghiệm hệ số nhót của loại BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011.

**2.3.2.2. *Kết quả thí nghiệm xác định hệ số nhót BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011***

**a) Thiết kế thành phần BTNC12.5**

Thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm của trường Đại học Công nghệ GTVT từ tháng 4/2020 đến 5/2020.

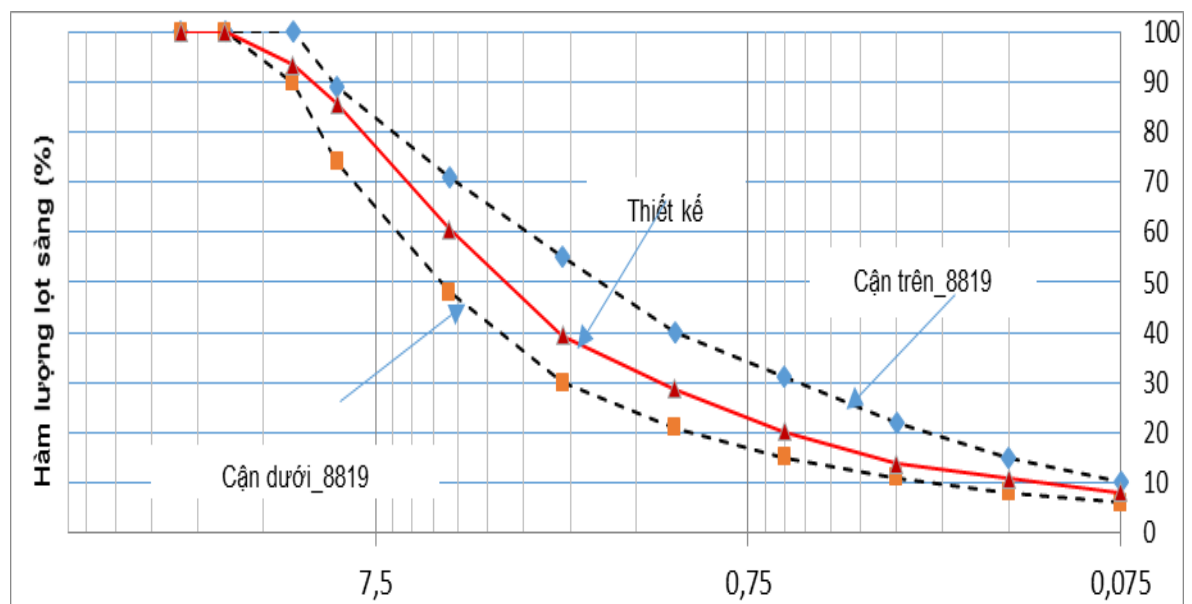
Thiết kế hỗn hợp BTNC12.5 là lựa chọn được cấp phối cốt liệu hợp lý và hàm lượng bitum tối ưu về mặt kinh tế mà vẫn thoả mãn các yêu cầu kỹ

thuật. Hàm lượng bitum tối ưu được xác định thông qua các chỉ tiêu về độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu, độ ổn định Marshall, độ dẻo,...

Cốt liệu và bột khoáng sử dụng trong thử nghiệm là cốt liệu nghiền có nguồn gốc từ mỏ đá Sunway (Phú Mỹ - Quốc Oai - Hà Nội). Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu đáp ứng các Tiêu chuẩn của Việt Nam TCVN 8819:2011 và được trình bày ở Bảng 2.8.

**Bảng 2.8. Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu**

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả			
		Đá 10x20	Đá 5x10	Đá 0x5	Bột khoáng
Hàm lượng bụi, bùn, sét	%	0,32	0,57	0,67	-
Hàm lượng hạt thoi dẹt	%	8,75	8,97	-	-
Độ hao mòn Los Angeles	%	16,03	16,17	-	-
Hàm lượng hạt mềm yếu phong hóa	%	0,45	1,05	-	-
Tỷ trọng khối		2,875	2,86	2,847	2,806
Độ hút nước	%	0,53	0,84	1,40	-



**Hình 2.11: Đường cong cấp phối hỗn hợp BTCN12.5 sau khi phối trộn**

Đối tượng nghiên cứu được lựa chọn là hỗn hợp BTNC12,5 có kích cỡ hạt lớn nhất danh định bằng 12,5mm. Tiêu chuẩn về cấp phối cốt liệu được lựa chọn thiết kế theo TCVN 8819:2011. Kết quả thiết kế thành phần hỗn hợp vật liệu khoáng được thể hiện ở Hình 2.11.

Trong thử nghiệm này, sử dụng bitum 60/70 do Công ty TNHH Nhựa đường Petrolimex. Hàm lượng nhựa đã thí nghiệm tối ưu 4,5%.

#### **b) Chế tạo mẫu thí nghiệm**

Mẫu thí nghiệm được thiết kế theo quy trình thí nghiệm tại GOST 12801-98: Sử dụng mẫu thí nghiệm dạng lăng trụ tiêu chuẩn có chiều cao mẫu H bằng với đường kính D và bằng 71,4 mm (chiều cao của mẫu cho phép là  $71,4 \pm 1,5$  mm). Sử dụng phương pháp khoan rút lõi để chế tạo mẫu như sau:

- Đúc mẫu kích thước (300x300x71,4)mm sử dụng khuôn của mẫu thí nghiệm hàn LVBX.
- Sử dụng khoan rút lõi đường kính 70 mm để khoan mẫu.
- Số lượng mẫu: với 7 chế độ nhiệt, mỗi chế độ nhiệt thí nghiệm 6 mẫu, tổng cộng 42 mẫu.



**Hình 2.12: Kiểm tra kích thước mẫu sau khi chế tạo**

#### **c) Quy trình thực hiện thí nghiệm:**

- Đưa mẫu về nhiệt độ thí nghiệm: Ngâm mẫu trong thời gian 60 phút trong bể ổn định nhiệt sau khi đưa nhiệt độ của bể về nhiệt độ thí nghiệm

- Lắp đặt mẫu vào thiết bị nén, sử dụng thiết bị thí nghiệm Marshall của hãng Daiwa Kenko – Nhật Bản.

- Cho thiết bị nén mẫu xác định lực khi mẫu bị phá hoại.



**Hình 2.13: Chạy thí nghiệm các mẫu**

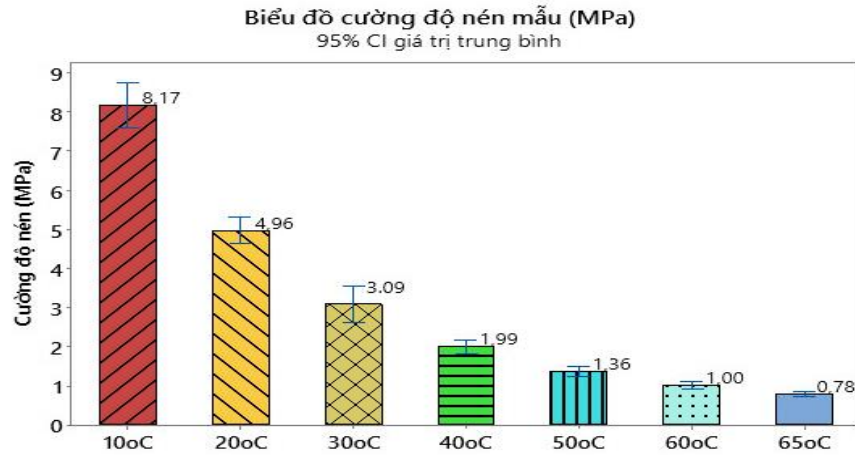
**d) Phân tích và xử lý số liệu thí nghiệm**

Các kết quả thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 2.9 và Hình 2.14.

**Bảng 2.9. Kết quả thí nghiệm**

Mẫu thí nghiệm	Cường độ nén mẫu, MPa						
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	65 °C
1	8,16	4,74	3,45	2,01	1,42	1,04	0,72
2	8,67	5,14	2,97	1,95	1,28	0,86	0,70
3	7,25	4,68	2,94	2,28	1,47	1,12	0,75
4	8,48	4,66	2,73	1,79	1,26	1,04	0,86
5	8,62	5,43	2,65	1,90	1,53	0,96	0,86
6	7,84	5,16	3,80	2,01	1,20	1,02	0,83
Cường độ nén trung bình (MPa)	8,17	4,96	3,09	1,99	1,36	1,0	0,78
Độ lệch chuẩn, s	0,55	0,32	0,45	0,16	0,13	0,09	0,07
Hệ số biến sai đạt được, Cv (%)	4,50	4,00	9,50	6,50	6,50	6,50	6,00





**Hình 2.14: Biểu đồ cường độ nén mẫu**

Từ kết quả thu thập được, ứng dụng phần mềm Minitab 19 xây dựng phương trình quan hệ giữa Cường độ phá hoại mẫu và nhiệt độ thí nghiệm. Theo các nghiên cứu đã biết, quan hệ giữa cường độ phá hoại của mẫu BTN và nhiệt độ là quan hệ phi tuyến, vì vậy sử dụng một số dạng hàm phi tuyến cơ bản để xây dựng phương trình quan hệ, kết quả xây dựng như sau:

**Bảng 2.10: Các hàm quan hệ giữa  $R_n$  và  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )**

STT	Hàm quan hệ	Hệ số xác định ( $R^2$ )	Tỷ số $Se/Sy$
1	$R_n = 11,15 - 0,3534 T + 0,003040 T^2$	97,9	0,147
2	$R_n = 12,82 - 0,5544 T + 0,009308 T^2 - 0,000056 T^3$	98,7	0,116
3	$R_n = e^{2,54846-0,0460028T}$	98,5	0,122
4	$R_n = 16,963 - 3,96304 \ln T$	97,3	0,163

Hệ số xác định ( $R^2$ ) là thước đo độ chính xác của mô hình (tỷ lệ chính xác giữa giá trị xây dựng được theo mô hình và giá trị thí nghiệm thực tế). Để đánh giá về mức độ phù hợp, Witczak và cộng sự cũng sử dụng Tỷ lệ sai số chuẩn ( $Se/Sy$ ) cho việc đánh giá các mô hình phi tuyến.

$$R^2 = 1 - \frac{n-k}{n-1} \left( \frac{S_e}{S_y} \right)^2 \quad (2.23)$$

trong đó:  $R^2$  – Hệ số xác định;

$n$  – số lượng mẫu thí nghiệm;

$k$  – số biến độc lập của mô hình;

$S_e$  - sai số chuẩn của ước lượng,  $S_e = \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{(n-k)}}$ ;

$y$  – giá trị đo được;

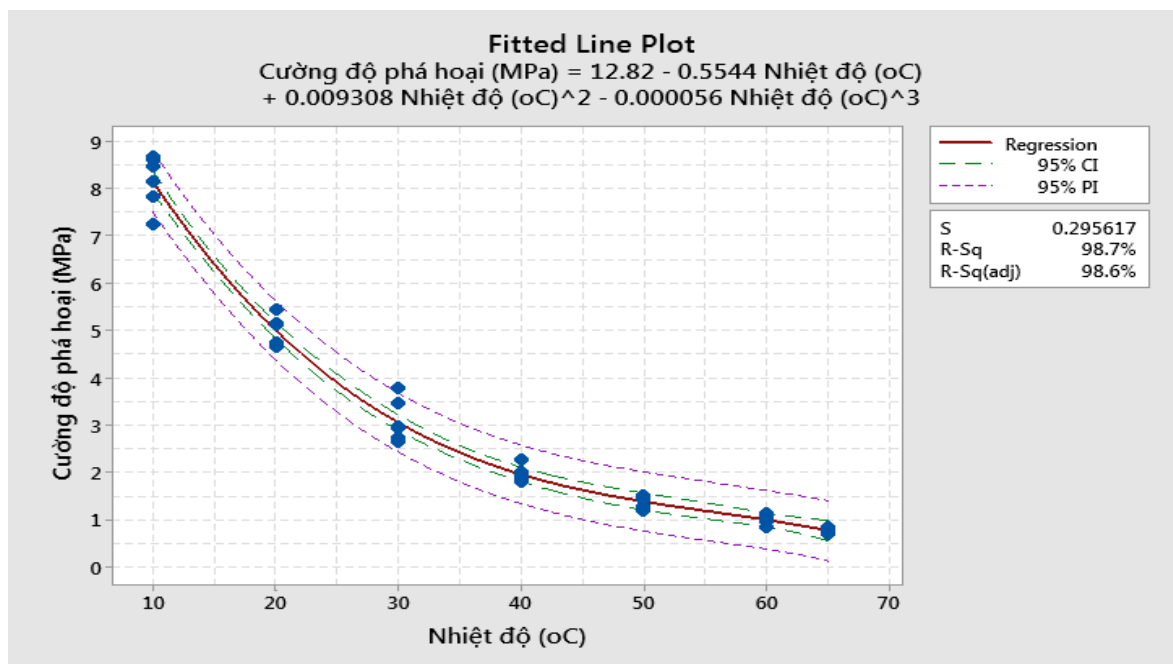
$\hat{y}$  – giá trị dự đoán;

$S_y$  - độ lệch chuẩn của các giá trị đo được,  $S_y = \sqrt{\frac{\sum (y - \bar{y})^2}{(n-1)}}$

$\bar{y}$  – giá trị trung bình đo được.

So sánh Hệ số xác định và tỷ số  $S_e/S_y$  của các phương trình quan hệ đã xây dựng được, ta thấy Hàm quan hệ có hệ số xác định lớn nhất  $R^2 = 98,7\%$  tương ứng với tỷ số  $S_e/S_y$  nhỏ nhất  $= 0,116 < 0,35$  chứng tỏ phản ánh chính xác mối quan hệ giữa Cường độ phá hoại mẫu (MPa) và Nhiệt độ làm việc của mẫu ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$R_n = 12,82 - 0,5544 T + 0,009308 T^2 - 0,000056 T^3. \quad (2.24)$$



**Hình 2.15: Quan hệ giữa cường độ nén và nhiệt độ**

Từ công thức (2.20) ta cũng có thể xây dựng hàm số thể hiện mối quan hệ giữa hệ số nhớt ( $\eta_T$ ) và nhiệt độ (T) như sau:

$$\eta_T = \left( \frac{12,82 - 0,5544.T + 0,009308.T^2 - 0,000056.T^3}{0,0473 + 0,00245.T + 0,000107.T^2} \right)^3. \quad (2.25)$$

Trong công thức (2.25), nhiệt độ T phụ thuộc các mùa trong năm và phụ thuộc chiều sâu lớp BTN mặt đường trong điều kiện khí hậu Việt Nam, lấy trọng phạm vi từ 0°C đến 70°C.

Trong Bảng 2.12 trình bày kết quả tính toán hệ số nhớt BTN theo (2.25) và so sánh với số liệu hệ số nhớt BTN cùng loại theo [79].

**Bảng 2.11. Hệ số nhớt BTN phụ thuộc nhiệt độ tính theo (2.25) cho BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011 và theo [79].**

Nhiệt độ BTN, °C	Hệ số nhớt BTN, MPa.s		
	Tính theo (2.25)	Theo [79]	Sai lệch, %
0	19.910.430	21.000.000	0,5
20	46.864	51.000	6,0
50	30,7	30	2,3
60	4,7	5,0	6,0

Hệ số nhớt tính theo (2.25) có giá trị tương đương giá trị hệ số nhớt BTNC của Nga theo [69], với loại BTNC của Nga sử dụng nhựa bitum có độ kim lún 60/70, cốt liệu hạt thô (D lớn hơn 4,75mm) hàm lượng 40-50%, tương đương BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011, sai lệch không quá 6,0%.

Ngay tại cùng 1 khu vực, độ lớn hệ số nhớt của lớp BTN bề mặt mặt đường sẽ thay đổi theo các mùa trong năm do nhiệt độ thay đổi.

## 2.4. Kết luận chương 2

Đã phân tích cơ chế hình thành LVBX lớp BTN trên làn xe chạy, khi ứng suất cắt gây biến dạng hình học vượt qua giới hạn chảy dẻo lớp BTN sẽ gây ra biến dạng không hồi phục lớp vật liệu. LVBX trên làn xe chạy là quá trình tích tụ biến dạng dẻo lớp BTN trong suốt quá trình khai thác.

Đã phân tích đặc tính nhót của BTN phụ thuộc nhiệt độ và tốc độ biến dạng (thời gian tác dụng của tải trọng), làm cơ sở lựa chọn phương pháp phân tích sự làm việc của lớp BTN dưới tác dụng của tải trọng động thông qua tham số mô đun đàn hồi động, đặc trưng cho khả năng kháng biến dạng của lớp BTN. Trên cơ sở đó kiến nghị sử dụng tham số hệ số nhót của BTN trong tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN trên làn xe chạy, theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục.

Đã tiến hành thí nghiệm mẫu BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011, xác định hệ số nhót BTN có độ lớn thay đổi theo nhiệt độ, phục vụ tính toán chiều sâu vệt lún lớp BTN. Số lượng mẫu đủ lớn nên kết quả thí nghiệm đảm bảo độ tin cậy.

### **CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN CHIỀU SÂU LVBX LỚP BTN MẶT ĐƯỜNG TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM**

Trong chương 3, trình bày nghiên cứu đề xuất phương pháp tính toán xác định chiều sâu LVBX lớp BTN mặt đường trong điều kiện Việt Nam theo phương pháp lý thuyết, xây dựng công thức tính chiều sâu LVBX cho phép xét được tổng số trục xe trong suốt thời kỳ khai thác, xét được điều kiện khí hậu và loại BTN thực tế hiện đang sử dụng tại Việt Nam. Trong công thức tính chỉ xét LVBX xảy ra ở lớp BTN mặt đường.

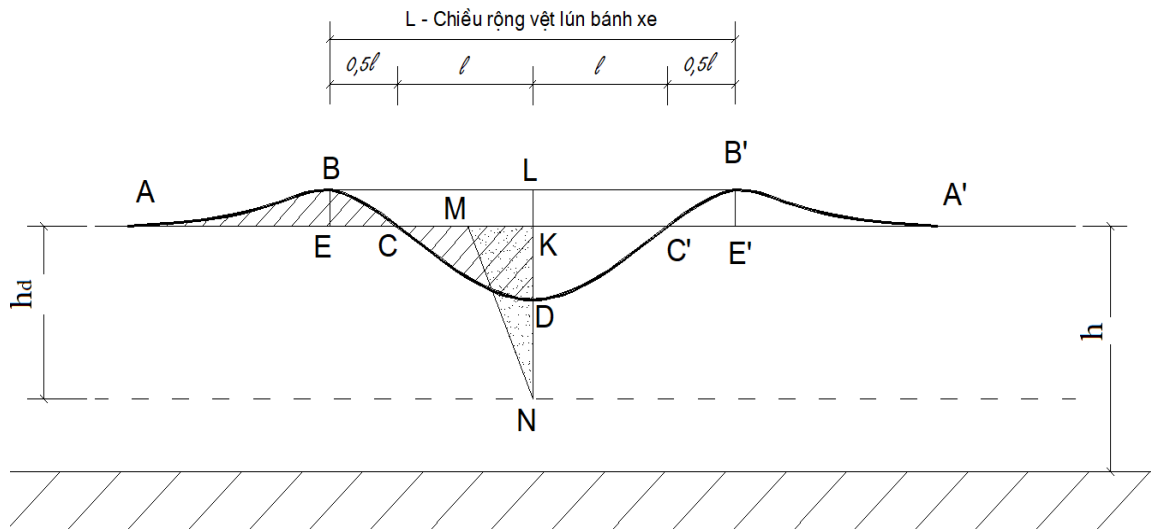
#### **3.1. Cơ sở lý thuyết tính toán LVBX lớp BTN mặt đường**

Để tính chiều sâu LVBX lớp BTN mặt đường, áp dụng phương pháp tính toán lý thuyết theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục, xét vật liệu BTN theo mô hình cơ học vật liệu đàn nhớt dẻo theo Hình 2.6, tính toán chiều sâu vết hằn lún lớp BTN trên làn xe chạy theo điều kiện dẻo Tresca-Saint Venant, biến dạng dẻo do ứng suất cắt gây ra là biến dạng hình học lớp BTN (biến dạng hình dạng với thể tích không đổi).

Tham khảo nhận xét nêu trong [68,69,70], chấp nhận giả thiết tác dụng của tải trọng bánh xe tạo ra biến dạng LVBX lớp BTN là biến dạng phẳng, vuông góc với phương chuyển động, đưa bài toán tính chiều sâu vết hằn lún về bài toán phẳng. Trên Hình 3.1 mô phỏng mặt cắt ngang LVBX lớp BTN mặt đường điển hình trên làn xe chạy. Như đã phân tích trong mục 2.1.2, thể hiện trên hình 2.4, khi xét LVBX chỉ xảy ra ở lớp BTN bề mặt, phần thể tích BTN mặt đường bị đùn trôi đều sang hai bên bằng với thể tích phần BTN bị biến dạng lún (diện tích các hình ABC và A'B'C' bằng với diện tích các hình CKD và C'KD). Kí hiệu đoạn BB' là chiều rộng vết lún (kí hiệu L), đoạn LD là chiều sâu vết hằn lún (kí hiệu RD - Rutting Depth). Theo quan trắc thực tế nêu trong [68,69,70,89] chấp nhận gần đúng, chiều rộng vết lún của bản thân lớp BTN, đoạn CC' = 2/3L, đoạn CE = C'E' = l/2, với l bằng L/3, còn chiều cao vết gờ trời EB = E'B' = RD/3, các tỉ lệ này tương đối ổn định trong suốt quá trình hình thành LVBX. Chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán lớp BTN kí hiệu là  $h_d$ , chiều dày lớp BTN kí hiệu là h (hình 3.1).

Để tính chiều sâu LVBX, trong luận án sử dụng khái niệm mặt trượt ngang quy ước MKN gây ra nửa vết lún bánh xe CKD (Hình 3.1) và chấp nhận giả thiết xem các hình trên là các tam giác vuông. Các giả thiết trên đã được sử dụng trong quy trình tính LVBX của Nga [69,70,81,88] như đã nêu tại mục 1.3.1.3 của Chương I. Biến dạng do mặt trượt ngang quy ước MKN gây ra nửa vết lún bánh xe CKD là biến dạng hình học nên 2 hình trên có diện tích bằng nhau. Mặt khác, do các cạnh MK và Kn cũng như CK và KD vuông góc với nhau nên để đơn giản trong tính toán trong [69,70,81,88] đã chấp nhận giả thiết gần đúng các hình MKN và CKD là các tam giác vuông và có diện tích bằng nhau:

$$\frac{KC.KD}{2} = \frac{KN.KM}{2}. \quad (3.1)$$



**Hình 3.1: Sơ đồ LVBX lớp BTN mặt đường**

Theo lý thuyết dẻo, đại lượng biến dạng trượt ngang tương đối gây ra LVBX quy ước có giá trị:

$$\gamma_p = \frac{KM}{KN}. \quad (3.2)$$

Biến đổi công thức (3.1) kết hợp với (3.2) nhận được:

$$\gamma_p = \frac{KM}{KN} = \frac{KC.KD}{KN^2} = \frac{l}{h_d} \cdot \frac{KD}{h_d}. \quad (3.3)$$

trong đó:  $l$  – nửa chiều rộng vùng biến dạng lún của lớp BTN theo phương ngang (đoạn CK trên Hình 3.1);

$h_d$ - chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán trong lớp BTN, được xác định bằng khảo sát thực tế hoặc bằng tính toán lý thuyết, cm. Theo kết quả nghiên cứu trong [40,50,67,69,70,84], chiều sâu vùng biến dạng dẻo trong lớp BTN do áp lực bánh xe gây ra, có độ lớn từ  $7,5 \div 10$  cm, tùy độ lớp áp lực bánh xe, loại BTN và nhiệt độ môi trường.

Khái niệm biến dạng trượt ngang quy ước trên (mặt cắt MKN trên Hình 3.1) đã được sử dụng trong tính toán quy đổi từ biến dạng trượt ngang  $\gamma$  tính theo công thức (1.11) sang chiều sâu LVBX tính theo công thức (1.12) trong quy trình tính toán chiều sâu LVBX trong [69,81] hiện nay của Nga: khi tính được  $\gamma$  theo công thức (1.11), theo công thức (3.3) khi thay  $l=L/3$  và thay  $KD=2/3.LD$  sẽ nhận được công thức (1.12).

Trong luận án, để xác định chiều sâu LVBX theo phương pháp lý thuyết, chấp nhận sử dụng khái niệm mặt trượt ngang quy ước như đã nêu trên và dựa trên cơ sở lý thuyết đàn nhớt và lý thuyết nhớt dẻo theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục, theo điều kiện dẻo Treska-Saint Venant, xét biến dạng gây LVBX lớp BTN do ứng suất cắt gây ra. Trong tính toán, ứng dụng mô hình cơ học đàn- nhớt- dẻo của vật liệu BTN chịu tác dụng của tải trọng động bánh xe trên làn xe chạy nêu trong mục 2.2.1, Hình 2.6, để xây dựng công thức tính chiều sâu LVBX của lớp BTN mặt đường.

Theo lý thuyết biến dạng đàn hồi, biến dạng dẻo [7,65] và theo mục 2.1.2, hình 2.3, trong công thức (3.3) đại lượng  $KD/h$  chính là biến dạng dẻo tương đối (kí hiệu  $\varepsilon_p$ ) theo phương đứng của phân tử tại tâm vết lún là vị trí RD có độ sâu lớn nhất của vết lún (xem hình 2.3), với  $l=L/3$ , khi đó thay vào (3.3) và sau biến đổi nhận được:

$$\varepsilon_p = \frac{\gamma_p \cdot h_d}{l} = \frac{3h_d}{L} \gamma_p. \quad (3.4)$$

Theo [69,70,81], các đại lượng chiều rộng (L) và chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán ( $h_d$ ) trong lớp BTN là các đại lượng tương đối ổn định ở mỗi làn đường phụ thuộc điều kiện khai thác cụ thể, nên đại lượng  $3h_d/L$  là tương đối ổn định. Khi đó ở trong điều kiện khai thác cụ thể của mặt đường, quan hệ giữa biến dạng trượt ngang và biến dạng theo phương đứng ( $\gamma_p$  và  $\varepsilon_p$ ) ở tâm vết lún có quan hệ chặt chẽ với nhau. Khi đại lượng biến dạng trượt

ngang lớn thì biến dạng tương đối theo phương đứng cũng lớn, và ngược lại. Đặt  $k=3h_d/L$  là hệ số có độ lớn ổn định, phụ thuộc loại trục xe, loại BTN và điều kiện khai thác thực tế, khi đó từ công thức (3.4) ta có quan hệ giữa biến dạng theo phương đứng và biến dạng trượt ngang tại tâm LVBX:

$$\varepsilon_p = k.\gamma_p. \quad (3.5)$$

Theo mô hình cơ học của hỗn hợp BTN trong miền biến dạng nhớt dẻo (Hình 2.6) và từ công thức (2.2) chương 2:

$$\tau = \eta.\frac{d\gamma_p}{dt}, \quad \rightarrow \quad d\gamma_p = \frac{\tau.dt}{\eta}. \quad (3.6)$$

trong đó:  $\eta$  - hệ số nhớt dẻo lớp BTN, xác định theo (2.27), MPa.s;

$\tau$  - phần ứng suất cắt gây biến dạng không hồi phục, MPa;

$\frac{d\gamma_p}{dt}$  - tốc độ biến dạng trượt ngang không hồi phục;

$t$  - biến thời gian tác dụng của tải trọng, s.

Lấy tích phân về trái theo biến là biến dạng  $\gamma_p$ , về phải theo biến là thời gian  $t$ , ta có:

$$\int_0^{\gamma} d\gamma_p = \int_0^t \frac{\tau}{\eta} dt. \quad (3.7)$$

Tại mỗi thời điểm, nhiệt độ bề mặt và ở mỗi độ sâu, mức nhiệt độ lớp BTN là cố định, khi đó giá trị ứng suất cắt ( $\tau$ ) và hệ số nhớt ( $\eta$ ) là các hằng số, nên theo [7,23] lấy tích phân (3.7) về trái theo biến  $\gamma_p$ , về phải theo biến  $t$ , nhận được công thức sau:

$$\gamma_p = \frac{\tau}{\eta}.t. \quad (3.8)$$

Thay (3.8) vào (3.5), và sau một số biến đổi, nhận được:

$$\varepsilon_p = k.\gamma_p = k.\frac{\tau}{\eta}.t, \quad (3.9)$$



trong đó:  $\varepsilon_p, \gamma_p$  - tương ứng là biến dạng tương đối không hồi phục theo phương đứng và biến dạng trượt ngang tại tâm vết hằn lún lớp BTN.

Các đại lượng khác như đã nêu.

Theo lý thuyết dẻo [7,65], từ (3.9), khi biết biến dạng tương đối ( $\varepsilon_p$ ) theo phương đứng, ta có chiều sâu hằn lún lớp BTN (đoạn KD Hình 3.1), tính cho một mức nhiệt độ tại bề mặt lớp BTN, theo công thức:

$$KD = \int_0^h \varepsilon_p . dz = k.t. \int_0^h \frac{\tau_z}{\eta_z} dz. \quad (3.10)$$

trong đó:  $\tau_z, \eta_z$  - ứng suất cắt trượt và hệ số nhớt dẻo tại chiều sâu z trong lớp BTN;

h- chiều dày lớp BTN, cm.

Các kí hiệu khác như trên.

Trong công thức (3.10), khi tính chiều sâu LVBX thì đại lượng t là tổng thời gian tác dụng tính toán của tải trọng trùng phục gây ra biến dạng dẻo lớp bê tông nhựa trong suốt thời kỳ khai thác, phụ thuộc số lần tác dụng của tải trọng. Quá trình gia tăng biến dạng không hồi phục không tỉ lệ với số lần tác dụng của tải trọng mà luôn thay đổi theo từng giai đoạn biến dạng trong suốt thời gian khai thác [36,41,65,86] (xem Hình 2.2). Ở giai đoạn đầu quá trình biến dạng, lớp vật liệu bị lèn chặt, các hạt cốt liệu cài móc với nhau, lấp kín các lỗ rỗng còn lại trong quá trình thi công, nên tỉ lệ biến dạng (mức biến dạng trên số lượt tải trọng tác dụng) có giá trị lớn, quan hệ biến dạng và số lượt tác dụng của tải trọng mang tính phi tuyến. Sang giai đoạn tiếp theo, khi các hạt cốt liệu đã được cài móc chặt, nên mức biến dạng giảm đi, quan hệ giữa mức biến dạng và số lần tác dụng của tải trọng là quan hệ tương đối tuyến tính. Khi đó để tính tổng thời gian tác dụng của tải trọng gây LVBX phụ thuộc số lần tác dụng của tải trọng tại tiết diện tính toán, có thể được xác định gần đúng theo công thức trong [65] như sau:

$$t = N.t_p \cdot \left( 1 - e^{\frac{-\sqrt{N.t_p}}{N.t_p}} \right) \quad (3.11)$$

trong đó:  $t_p$  – thời gian tác dụng 1 lần của tải trọng tính theo (2.8), s;

$N$  – tổng số lượt trục xe khai thác quy đổi về trục tính toán, có xét xác suất trùng phục của trục tải trọng đi qua một điểm xem xét, tính theo công thức theo [67]:

$$N = N_1 \left( \frac{q_N'^N - 1}{q_N - 1} \right) \cdot T \cdot k_p, \quad (3.12)$$

với:  $N_1$  - lưu lượng trục xe trong năm đầu khai thác, trục xe/làn/ng.đ;

$q_N$  - mức tăng trưởng lưu lượng dự báo trung bình hàng năm;

$t_N$  - thời gian khai thác, năm;

$T$  - số ngày khai thác trong năm, ngày;

$k_p$  - hệ số xét xác suất trùng phục vệt bánh xe qua 1 điểm của vệt tải trọng trên làn xe.

Lấy tích phân (3.10) và thay thời gian tác dụng của tải trọng trong (3.10) theo (3.11) ta được chiều sâu vệt hằn lún trực tiếp của lớp BTN (đoạn KD), chưa xét vệt gờ trời 2 bên:

$$KD = k \cdot N \cdot t_p \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\sqrt{N \cdot t_p}}{N \cdot t_p}} \right) \cdot \int_0^h \frac{\tau_z}{\eta_z} \cdot dz. \quad (3.13)$$

Để tính tổng chiều sâu vệt hằn lún của lớp BTN (đoạn LD trên Hình 3.1), cần xét thêm vệt gờ trời lên ở hai bên vệt hằn (đoạn LK trên Hình 3.1), làm tăng chiều sâu vệt hằn lún. Chiều cao vệt gờ trời (LK) có giá trị tương đối ổn định, theo phân tích trong mục 2.1.3 lấy xấp xỉ bằng 1/3 chiều sâu vệt lún ( $KL=LD/3$ ).

Khi đó chiều sâu vệt lún (RD), có xét cả chiều cao vệt gờ trời 2 bên, được xác định:

$$RD = 1,5 \cdot k \cdot N \cdot t_p \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\sqrt{N \cdot t_p}}{N \cdot t_p}} \right) \cdot \int_0^h \frac{\tau_z}{\eta_z} \cdot dz. \quad (3.14)$$

Trong công thức (3.14), các đại lượng  $\tau_z$  và  $\eta_z$  là các đại lượng thay đổi, phụ thuộc chiều sâu tính toán lớp BTN. Trong đó, đại lượng  $\eta_z$  được xác định bằng thí nghiệm mẫu BTN, với BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011 có thể xác định theo công thức (2.25).

Giá trị ứng suất cắt theo chiều sâu  $z$  ( $\tau_z$ ) gây ra biến dạng dẻo trong công thức (3.14) có xét giới hạn chảy dẻo của BTN thông qua hệ số nội ma sát, do nhiệt độ giảm tại độ sâu  $z$  làm tăng mô đun đàn hồi BTN, có tác dụng làm suy giảm ứng suất cắt theo chiều sâu, trong tính toán có thể áp dụng công thức (1.20):

$$\tau_z = \frac{q}{2 \left[ 1 + \sqrt{2\pi} \left( \frac{z}{D} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{BTN}}{E_{ch,m}}} \right)^2 \cdot \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right]}$$

Tính ứng suất cắt theo công thức trên cho phép xét được ảnh hưởng của nhiệt độ đến độ lớn ứng suất cắt thông qua giá trị mô đun đàn hồi BTN thay đổi phụ thuộc nhiệt độ thay đổi theo chiều sâu trong lớp BTN và xét được ảnh hưởng của cường độ các lớp móng và nền đến độ lớn ứng suất cắt, thông qua tham số mô đun đàn hồi chung móng và nền ( $E_{ch,m}$ ).

Biến dạng LVBX tính theo (3.14) là áp dụng cho tính toán biến dạng tính cho từng mức nhiệt độ tính toán tại bề mặt lớp BTN. Trong suốt quá trình khai thác với tổng  $N$  lượt trục xe, nhiệt độ bề mặt lớp BTN luôn thay đổi trong phạm vi từ giá trị thấp nhất ( $T_{\min}$ ) đến giá trị cao nhất ( $T_{\max}$ ). Do vậy, để tính tổng chiều sâu LVBX trong suốt quá trình khai thác, cần xác định tần suất xuất hiện các mức nhiệt độ từ ( $T_{\min}$ ) đến ( $T_{\max}$ ), trong suốt quá trình khai thác.

Khi giả thiết chế độ nhiệt trong các ngày trong năm của các năm liên kế là giống nhau, khi đó tần suất thời gian xuất hiện các mức nhiệt độ khác nhau trên bề mặt lớp BTN được xác định theo công thức:

$$P(T) = \frac{t(T^0C)}{t_{kt}}, \quad (3.15)$$

trong đó:  $P(T)$  – tần suất thời gian xuất hiện mức nhiệt độ  $T^0C$  trong suốt thời kỳ khai thác;

$t(T^0C)$ - tổng thời gian mặt đường làm việc mặt đường ở mức nhiệt độ tính toán  $T^0C$ , h;

$t_{kt}$ - tổng thời gian khai thác mặt đường, h.

Theo kết quả từ khảo sát hiện trường [31,32,69,70] cho thấy, nhận được quy luật biến đổi hàm  $P(T)$  trên bề mặt lớp BTN như sau: Trong phạm vi miền nhiệt độ từ  $(T_{min} + 10^0C)$  đến  $(T_{max} - 10^0C)$ , tần suất  $P(T)$  có giá trị tương đối ổn định, và bằng nhau với mọi mức nhiệt độ khác nhau. Các vùng nhiệt độ từ  $(T_{min} + 10^0C)$  đến  $(T_{min} - 2^0C)$  và từ  $(T_{max} - 10^0C)$  đến  $(T_{max} + 2^0C)$ , tần suất  $P(T)$  có xu hướng giảm, chấp nhận gần đúng là tuyến tính dần về 0. Biểu diễn dưới dạng hàm số như sau:

khi mức nhiệt độ trong khoảng  $(T_{min} - 2^0C) \leq T \leq (T_{min} + 10^0C)$ :

$$P(T) = \frac{T - T_{min} + 2}{12(T_{max} - T_{min} - 8)}, \quad (3.16)$$

khi mức nhiệt độ trong khoảng  $(T_{min} + 10^0C) \leq T \leq (T_{max} - 10^0C)$ :

$$P(T) = \frac{1}{(T_{max} - T_{min} - 8)}, \quad (3.17)$$

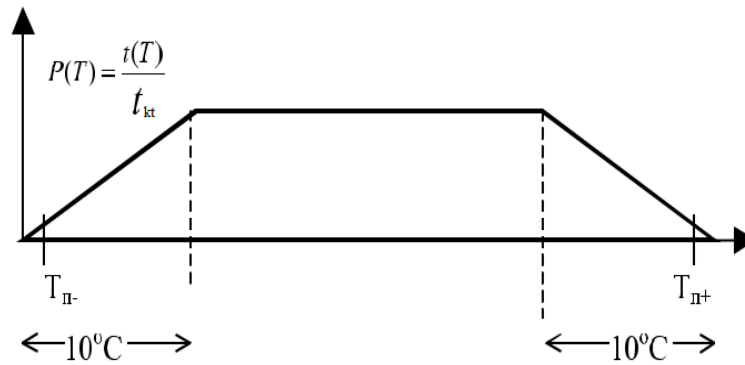
khi mức nhiệt độ trong khoảng  $(T_{max} - 10^0C) \leq T \leq (T_{max} + 2^0C)$ :

$$P(T) = \frac{1}{(T_{max} - T_{min} - 8)} - \frac{(T - T_{max} + 10)}{12(T_{max} - T_{min} - 8)}, \quad (3.18)$$

trong đó:  $T_{min}$ ,  $T_{max}$ - nhiệt độ thấp nhất trong năm và nhiệt độ cao nhất (lấy cách bề mặt 2cm) trong năm của lớp BTN, lấy trung bình 7 ngày;

$T$ - biến nhiệt độ.

Hình 3.2 thể hiện đường phân bố tần suất nhiệt độ bề mặt trong suốt thời kỳ khai thác theo các hàm (3.16) ÷ (3.18).



**Hình 3.2: Đồ thị quan hệ giữa tần suất xuất hiện mức nhiệt độ  $P(T)$  với các mức nhiệt khác nhau trong năm**

Thay hàm phân bố các mức nhiệt độ theo thời gian (3.15) vào công thức (3.14), nhận được công thức tính toán chiều sâu LVBX, có xét thay đổi nhiệt độ trong suốt thời kỳ khai thác, với tổng số trục xe khai thác, có xét độ lớn ứng suất cắt và hệ số nhót thay đổi theo chiều sâu do thay đổi nhiệt độ gây ra. Khi đó nhận được công thức tính chiều sâu LVBX lớp BTN:

$$RD = 1,5 \cdot k \cdot N \cdot t_p \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\sqrt{N \cdot t_p}}{N \cdot t_p}} \right) \cdot \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} P(T) \cdot \left[ \int_0^{h_d} \frac{q}{2 \cdot \eta_{z,T} \left[ 1 + \sqrt{2\pi} \left( \frac{z}{D} \cdot \sqrt{\frac{E_{BTN,T}}{E_{ch,m,T}}} \right)^2 \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right]} dz \right] dT, \quad (3.19)$$

trong đó:  $k$  - hệ số, phụ thuộc chiều sâu vùng biến dạng dẻo trong lớp BTN. Trong điều kiện Việt Nam, chiều sâu vùng biến dạng dẻo ( $h_d$ ) được xác định trong mục 3.3, chương 3;

$q$  - áp lực bánh xe, Mpa ;

$\eta_{z,T}$  - hệ số nhót dẻo phụ thuộc nhiệt độ tại độ sâu  $z$ , phụ thuộc nhiệt độ và loại BTN;

$E_{BTN,T}$ ,  $E_{ch,m,T}$  - mô đun đàn hồi động của lớp BTN và lớp nền móng tương đương ở nhiệt độ tính toán, MPa;

$\varphi$  - hệ số nội ma sát;

$T$  - biến nhiệt độ tính toán,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$P(T)$ - hàm phân bố tần suất nhiệt tính theo (3.15);

$T_{\max}, T_{\min}$ - nhiệt độ tính toán lớn nhất và nhỏ nhất trên bề mặt lớp BTN trong suốt thời kỳ khai thác,  $^{\circ}\text{C}$ .

Các kí hiệu khác như đã nêu trên.

Công thức xác định chiều sâu hần lún theo (3.19) có ưu điểm cho phép tính được chiều sâu LVBX trong điều kiện Việt Nam, cụ thể cho phép xét được điều kiện nhiệt độ trong suốt thời kỳ khai thác từ mức nhiệt độ cao nhất đến thấp nhất của Việt Nam, cho phép xét được loại BTN hiện có tại Việt Nam thông qua hệ số nhót của từng loại BTN, xét được các giá trị hệ số nhót, mô đun đàn hồi BTN, ứng suất cắt thay đổi theo chiều sâu lớp BTN do nhiệt độ thay đổi theo chiều sâu, cho phép xét được ảnh hưởng của cường độ lớp móng và nền đến chiều sâu LVBX thông qua đại lượng mô đun đàn hồi chung móng và nền ( $E_{ch,m}$ ), nên công thức đề xuất đã khắc phục được các hạn chế trong các phương pháp tính lý thuyết theo (1.11) và (1.22) và theo các công thức thực nghiệm như đã nêu trong chương 1. Do vậy công thức tính chiều sâu hần lún nêu trên là phù hợp với điều kiện của Việt Nam.

Phương pháp tính chiều sâu LVBX theo công thức (3.19) là phương pháp tính toán lý thuyết. Để áp dụng được thực tế cho các loại BTN trong điều kiện Việt Nam, cần nghiên cứu xác định hệ số nhót cho phù hợp với loại BTN hiện có của Việt Nam.

### **3.2. Đánh giá độ tin cậy của phương pháp tính toán đề xuất**

Để so sánh độ tin cậy của phương pháp tính đề xuất, trong luận án thực hiện khảo sát với trường hợp cụ thể, tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN theo công thức (3.19), so sánh với phương pháp tính theo quy trình của Nga hiện nay theo công thức (1.11) và (1.12), cũng là phương pháp tính theo phương pháp lý thuyết. Tính cho kết cấu áo đường khu vực TP. Hà Nội.

#### **3.2.1 Tính toán chiều sâu LVBX theo phương pháp đề xuất**

##### **3.2.1.1 Số liệu đầu vào bài toán**

Ứng dụng tính toán so sánh cho 1 bài toán cụ thể:

+ Tính cho tuyến đường cấp cao, lưu lượng trục xe tính toán năm đầu khai thác là 3.000 trục xe tiêu chuẩn/ ngày đêm / làn, tương đương 19.000.000 trục xe/ 15 năm, là mức lưu lượng giao thông rất nặng theo [31,41,85], mức tăng trưởng hàng năm 7,5 %, loại tải trọng trục tiêu chuẩn 10T, áp suất bánh hơi  $q = 0,6$  MPa.

+ Thời gian khai thác tuyến đường, dự kiến là 15 năm, vận tốc khai thác theo thiết kế 80km/h.

+ Kết cấu mặt đường, mặt đường cấp cao A1 sử dụng BTN theo TCVN 8819:2011, tính với kết cấu áo đường chịu tác dụng của tải trọng động theo hướng dẫn trong [88] đáp ứng yêu cầu khai thác 3.000 trục xe / ngày đêm, gồm 1 lớp BTNC12,5 dày 9cm, lớp BTNC19 dày 16cm, lớp móng trên CPĐĐ loại 1 dày 50cm, lớp móng dưới CPĐĐ loại 2 dày 50cm, trên lớp đáy áo đường dày 30cm có hệ số đầm chặt K98, trên lớp nền đất có mô đun đàn hồi  $E=45$ MPa.

+ Tính cho khu vực Hà Nội, đại diện cho khí hậu miền Bắc Việt Nam, có vĩ độ 21 độ Bắc.

+ Hệ số nhót của BTNC12,5 lấy theo kết quả thí nghiệm ở chương 2.

### 3.2.1.2 Các bước tính toán

#### **Bước 1: Xác định nhiệt độ tính toán lớn nhất và nhỏ nhất tại bề mặt lớp BTN**

Để tính toán nhiệt độ lớn nhất tính toán ( $T_{\max}$ ) và nhiệt độ nhỏ nhất tính toán ( $T_{\min}$ ) trong (3.19), do không có điều kiện khảo sát xác định nhiệt độ trong lớp BTN ở Việt Nam, để tính nhiệt độ tính toán lớn nhất vào mùa hè trên bề mặt  $T_{\max}$  theo (2.15), nhiệt độ thấp nhất tính theo (2.16). Với khu vực TP. Hà Nội theo [13], nhiệt độ không khí tính toán lớn nhất bằng  $37,75^{\circ}\text{C}$ , thấp nhất  $8^{\circ}\text{C}$ , ở 21 vĩ độ bắc, tính được nhiệt độ lớn nhất tại 2cm cách bề mặt là  $T_{2\text{cm}} = 62,7^{\circ}\text{C}$ , nhiệt độ thấp nhất  $T_{\min} = 8,5^{\circ}\text{C}$ .

#### **Bước 2: Tính toán nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN.**

Tính toán nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN để phục vụ tính toán độ lớn ứng suất cắt và độ lớn hệ số nhót tại các độ sâu tính toán khác nhau theo chiều

sâu trong lớp BTN. Do không có điều kiện thử nghiệm đo đạc thực tế, trong luận án tham khảo theo (2.17) công thức thực nghiệm.

### **Bước 3: Tính toán độ lớn mô đun đàn hồi thay đổi theo nhiệt độ và thời gian tác dụng của tải trọng**

Để tính toán ứng suất cắt, cần biết độ lớn mô đun đàn hồi động phụ thuộc nhiệt độ và thời gian tác dụng của tải trọng.

#### **Mô đun đàn hồi theo chiều sâu phụ thuộc nhiệt độ:**

Do ở Việt Nam chưa sử dụng khái niệm mô đun đàn hồi động của BTN, nên trong tính toán ứng dụng số liệu của nước ngoài. Áp dụng theo [76,88], và theo chương 2 trong công thức (2.13), mô đun đàn hồi BTN là mô đun đàn hồi động, độ lớn mô đun đàn hồi động của loại BTN, với thời gian tác dụng của tải trọng  $t=0,1s$ , phụ thuộc nhiệt độ tại độ sâu tính theo (2.17).

#### **Mô đun đàn hồi động phụ thuộc thời gian tác dụng của tải trọng:**

Thời gian tác dụng tính toán tính theo (2.10). Áp dụng tính mô đun đàn hồi theo công thức (2.11), (2.12) theo [38] chương 2, tính được mô đun đàn hồi động phụ thuộc thời gian tác dụng của tải trọng.

Với vận tốc  $80km/h \approx 22,2m/s$ , thời gian tác dụng của tải trọng là:

$$t_u = \frac{D}{V} = \frac{0,37}{22,2} = 0,0167 s.$$

### **Bước 4: Tổng lưu lượng trục xe tính toán N**

Được xác định theo công thức (3.11). Hệ số xác suất trùng phục vết bánh qua 1 điểm, theo [66,88] lấy  $k_p=0,7$ .

Trong thí dụ tính toán, tính với tần suất trung bình quy đổi suốt 15 năm khai thác, tính với lưu lượng trục xe năm đầu khai thác 3000 lượt/ngày đêm /làn. Trục xe 10T, áp lực bánh hơi  $q=0,6MPa$ .

Tính được tổng trục xe tính toán:  $N=20,02$  triệu lượt.

### **Bước 5: Tính toán chiều sâu LVBX theo công thức đề xuất**

Để đơn giản trong tính chiều sâu hần lún lớp BTN theo công thức (3.19), thực hiện như sau:



1) Xác định mô đun đàn hồi chung lớp móng và nền dưới lớp BTN, làm căn cứ tính toán ứng suất cắt thay đổi theo chiều sâu lớp BTN trong công thức (1.20).

2) Tính tích phân xác định chiều sâu LVBX lớp BTN tại mỗi mức nhiệt độ bề mặt, là hàm tích phân theo chiều sâu  $h$  (biểu thức trong ngoặc vuông trong công thức (3.19), theo chiều sâu từ bề mặt đến chiều sâu  $h$ , kí hiệu  $A_z$ :

$$A_z = \int_0^h \frac{\tau_z}{\eta_z} dz = \int_0^h \frac{q}{2 \cdot \eta_z \left[ 1 + \sqrt{2\pi} \left( \frac{z}{D} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{BTN}}{E_{ch,m}}} \right)^2 \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \right]} dz, \quad (3.20)$$

trong đó:  $z_i$  - chiều sâu tại phân lớp  $\Delta z$  thứ  $i$ ;

$\eta_{z,i}$  - hệ số nhớt tại độ sâu  $z_i$ , ứng với mức nhiệt tại độ sâu  $z_i$ , xác định theo (2.25);

$h$  - chiều dày lớp BTN, cm. Khi chiều dày lớp BTN bằng hoặc lớn hơn 9cm thì lấy đại lượng  $h$  bằng chiều sâu vùng biến dạng dẻo;

$E_{BTN}$  - mô đun đàn hồi BTN, phụ thuộc nhiệt độ thay đổi theo chiều sâu lớp BTN và thời gian tác dụng của tải trọng, tính theo (2.11).

Các kí hiệu khác như trên.

Tích phân (3.20) được xác định bằng phương pháp tích phân số, chia lớp BTN trong miền biến dạng có chiều sâu  $h$  thành các phân lớp, trong tính toán lấy phân lớp  $\Delta z = 1$  cm:

$$A_z = \sum_{i=1}^n \frac{q}{2 \cdot \eta_{z,i} \left[ 1 + \sqrt{2\pi} \left( \frac{z_i}{D} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{BTN}}{E_{ch,m}}} \right)^2 \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \right]} \cdot \Delta z_i \quad (3.21)$$

Tính toán mức biến dạng hần lún của từng phân lớp, với các tham số ứng suất cắt và hệ số nhớt tại độ sâu với mức nhiệt độ tương ứng. Khi đó, ứng với mỗi mức nhiệt độ bề mặt, chiều sâu vệt lún bằng tổng biến dạng dẻo của các phân lớp tính theo (3.21).

4) Tính biến dạng hần lún do tổng số trục xe khai thác gây ra theo (3.19), theo từng mức nhiệt độ từ  $T_{\min}$  đến  $T_{\max}$ , có xét xác suất phân bố từng mức nhiệt độ  $P(T)$  theo (3.16) ÷ (3.18). Hàm tích phân phân bố mức nhiệt độ  $P(T)$  được tính theo phương pháp tích phân số, với bước nhiệt độ  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned}
 RD &= 1,5.k.N.t_p \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\sqrt{N.t_p}}{N.t_p}} \right) \cdot \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \left\{ P(T) \cdot \left( \int_0^h \frac{\tau_{z,T}}{\eta_{z,T}} dz \right) \right\} \cdot dT = \\
 &= 1,5.k.N.t_p \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\sqrt{N.t_p}}{N.t_p}} \right) \cdot \sum_{T_{\min}}^{T_{\max}} [P(T_i)A_z(T)] \cdot \Delta T.
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

Với  $k$  là hệ số, phụ thuộc chiều sâu vùng biến dạng dẻo trong lớp BTN. Trong điều kiện Việt Nam, với loại BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011, theo kết quả tính toán tại mục 3.3, trong điều kiện Việt Nam tính được chiều sâu vùng biến dạng dẻo lớp BTN  $h_d = 9\text{cm}$ . Khi LVBX chỉ xảy trong lớp BTN, giá trị chiều rộng của vết lún ( $L$ ) tương đối ổn định trọng suốt quá trình khai thác, được khảo sát thực tế. Khi lấy  $L=100\text{cm}$  [40,49,69,70,81]. Khi đó nhận được độ lớn hệ số  $k=3.h_d/L=3.9/100 = 0,27$ .

Kết quả tính tổng chiều sâu LVBX thể hiện trên Bảng 3.1 và Hình 3.3 và Hình 3.4.

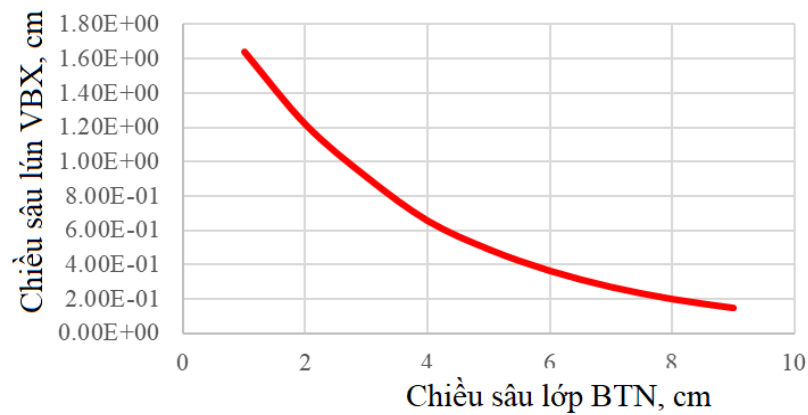
**Bảng 3.1: Kết quả tính chiều sâu LVBX**

Mức nhiệt độ bề mặt, T <sup>0</sup> C	Tần suất nhiệt, P(T)	RD theo tần suất nhiệt độ P(T), cm	Cộng dồn RD, cm
8,5	0,0036	1,320E-06	1,32E-06
9	0,0045	1,909E-06	3,23E-06
10	0,0063	3,572E-06	6,80E-06
11	0,0082	6,135E-06	1,29E-05
12	0,0100	1,001E-05	2,29E-05
13	0,0118	1,576E-05	3,87E-05
14	0,0136	2,420E-05	6,29E-05
15	0,0154	3,646E-05	9,94E-05
16	0,0172	5,407E-05	1,53E-04
17	0,0190	7,916E-05	2,33E-04
18	0,0208	1,147E-04	3,47E-04
19	0,0217	1,579E-04	5,05E-04
20	0,0217	2,080E-04	7,13E-04
21	0,0217	2,735E-04	9,87E-04
22	0,0217	3,588E-04	1,35E-03
23	0,0217	4,698E-04	1,82E-03

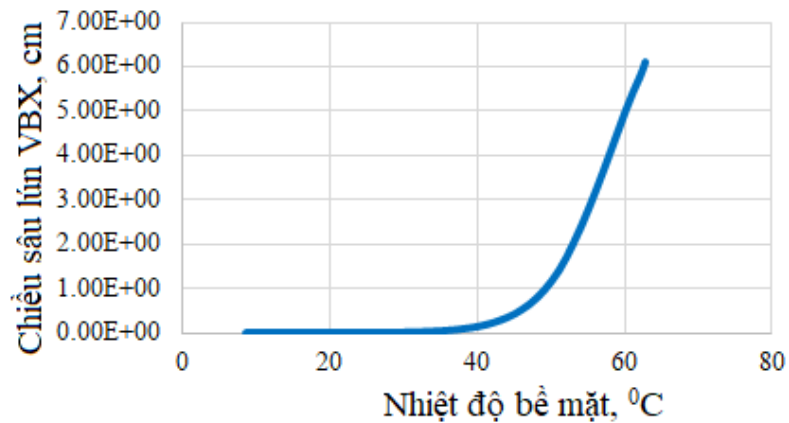
<b>Mức nhiệt độ bề mặt, T<sup>0</sup>C</b>	<b>Tần suất nhiệt, P(T)</b>	<b>RD theo tần suất nhiệt độ P(T), cm</b>	<b>Cộng dồn RD, cm</b>
24	0,0217	6,136E-04	2,43E-03
25	0,02174	7,996E-04	3,23E-03
26	0,0217	1,039E-03	4,27E-03
27	0,0217	1,348E-03	5,62E-03
28	0,0217	1,712E-03	7,33E-03
29	0,0217	2,247E-03	9,57E-03
30	0,0217	2,890E-03	1,25E-02
31	0,0217	3,704E-03	1,62E-02
32	0,0217	4,734E-03	2,09E-02
33	0,0217	6,030E-03	2,69E-02
34	0,0217	7,656E-03	3,46E-02
35	0,0217	9,685E-03	4,43E-02
36	0,0217	1,221E-02	5,65E-02
37	0,0217	1,533E-02	7,18E-02
38	0,0217	1,917E-02	9,10E-02
39	0,0217	2,389E-02	1,15E-01
40	0,0217	2,965E-02	1,45E-01
41	0,0217	3,664E-02	1,81E-01
42	0,0217	4,509E-02	2,26E-01
43	0,0217	5,528E-02	2,82E-01
44	0,0217	6,748E-02	3,49E-01
45	0,0217	8,205E-02	4,31E-01
46	0,0217	9,937E-02	5,30E-01
47	0,0217	1,199E-01	6,50E-01
48	0,0217	1,441E-01	7,94E-01
49	0,0217	1,727E-01	9,67E-01
50	0,0217	2,063E-01	1,17E+00
51	0,0217	2,458E-01	1,42E+00
52	0,0217	2,921E-01	1,71E+00
53	0,0208	3,378E-01	2,05E+00
54	0,0190	3,659E-01	2,42E+00
55	0,0172	3,926E-01	2,81E+00
56	0,0154	4,167E-01	3,22E+00
57	0,0136	4,366E-01	3,66E+00
58	0,0118	4,505E-01	4,11E+00

Mức nhiệt độ bề mặt, T <sup>0</sup> C	Tần suất nhiệt, P(T)	RD theo tần suất nhiệt độ P(T), cm	Cộng dồn RD, cm
59	0,0100	4,556E-01	4,57E+00
60	0,0082	4,483E-01	5,02E+00
61	0,0063	4,232E-01	5,44E+00
62	0,0045	3,729E-01	5,81E+00
62,7	0,0036	3,169E-01	<b>6,13E+00</b>

Tổng chiều sâu LVBX: RD = 6,13cm.



**Hình 3.3: Phân bố LVBX theo chiều sâu lớp BTN**



**Hình 3.4: Cộng dồn tổng chiều sâu LVBX theo các mức nhiệt độ bề mặt từ T<sub>min</sub> đến T<sub>max</sub>**

Từ kết quả tính Bảng 3.1 và trên các hình vẽ cho thấy:

LVBX xảy ra chủ yếu khi nhiệt bề mặt từ 40<sup>0</sup>C trở lên, đáng kể nhất từ mức 50<sup>0</sup>C trở lên, đặc biệt từ mức 60<sup>0</sup>C, đây là điều bất lợi cho các nước có

mức nhiệt độ cao như Việt Nam. Ở những vùng có nhiệt độ thấp, hoặc vào thời kỳ mùa đông lạnh, hiện tượng LVBX xảy ra không nhiều.

### 3.2.2 *Tính toán so sánh với phương pháp tính theo quy trình của Nga*

Để đánh giá độ tin cậy phương pháp tính đề xuất (công thức (3.19)), kiến nghị đối chiếu so sánh với phương pháp tính toán chiều sâu hần lún theo quy trình của Nga [67,73,88]. Cả 2 phương pháp đều cho phép xét được mức hần lún do tổng lưu lượng trục xe khai thác gây ra và tính cho tất cả các mức nhiệt độ từ thấp nhất đến cao nhất.

Theo công thức (1.11) và (1.12), trong tính toán, thực hiện tính hàm tích phân biến nhiệt độ theo phương pháp tích phân số, với bước nhiệt  $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ .

Với các tham số  $C, \varphi, m, U$  của BTNC12,5 của Việt Nam. Theo TCVN 8819:2011, tham khảo theo nghiên cứu trong [11] như sau:  $C=0,31\text{MPa}$ ;  $\text{tg}\varphi=0,81$ ;  $m=0,117$  và  $U=320\text{ kJ/phân tử gam}$ .

Các số liệu đầu vào của kết cấu, nhiệt độ và lưu lượng trục xe tính toán tương tự với bài toán tính theo phương pháp đề xuất theo mục 3.2.1.1.

**Bảng 3.2: Kết quả tính chiều sâu vệt lún theo quy trình của Nga**

Mức nhiệt độ bề mặt, $T, ^{\circ}\text{C}$	Tần suất, $P(T)$	Biến dạng $\gamma$ theo mức nhiệt độ	Cộng dồn biến dạng $\gamma$
8.5	0.00362	6.69E-11	6.69E-11
9	0.00453	1.06E-10	1.73E-10
10	0.00634	2.41E-10	4.15E-10
11	0.00815	5.01E-10	9.15E-10
12	0.00996	9.84E-10	1.90E-09
13	0.01178	1.86E-09	3.76E-09
14	0.01359	3.43E-09	7.20E-09
15	0.01540	6.20E-09	1.34E-08
16	0.01721	1.10E-08	2.44E-08
17	0.01902	1.92E-08	4.36E-08
18	0.02083	3.32E-08	7.68E-08
19	0.02174	5.45E-08	1.31E-07
20	0.02174	8.54E-08	2.17E-07
21	0.02174	1.33E-07	3.50E-07

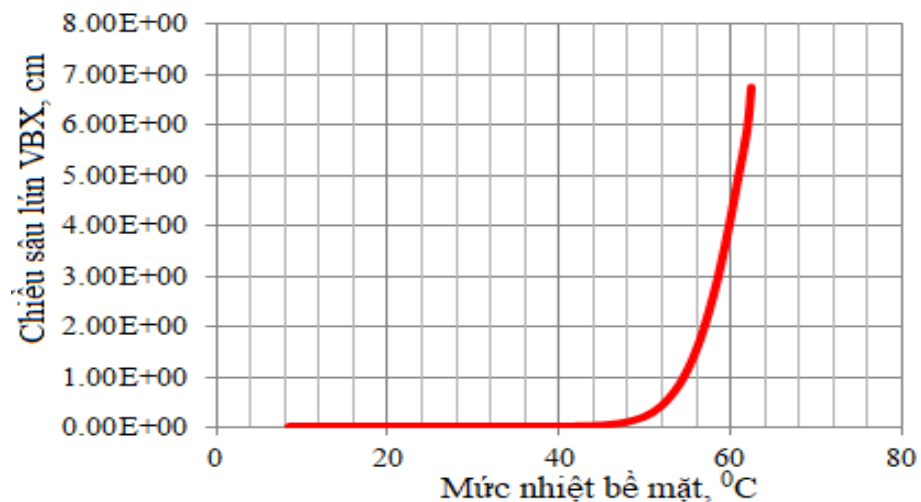
<b>Mức nhiệt độ bề mặt, T·°C</b>	<b>Tần suất, P(T)</b>	<b>Biến dạng <math>\gamma</math> theo mức nhiệt độ</b>	<b>Cộng dồn biến dạng <math>\gamma</math></b>
22	0.02174	2.08E-07	5.58E-07
23	0.02174	3.23E-07	8.81E-07
24	0.02174	5.00E-07	1.38E-06
25	0.02174	7.72E-07	2.15E-06
26	0.02174	1.19E-06	3.34E-06
27	0.02174	1.83E-06	5.17E-06
28	0.02174	2.79E-06	7.96E-06
29	0.02174	4.27E-06	1.22E-05
30	0.02174	6.49E-06	1.87E-05
31	0.02174	9.86E-06	2.86E-05
32	0.02174	1.49E-05	4.35E-05
33	0.02174	2.25E-05	6.60E-05
34	0.02174	3.39E-05	9.99E-05
35	0.02174	5.09E-05	1.51E-04
36	0.02174	7.63E-05	2.27E-04
37	0.02174	1.14E-04	3.41E-04
38	0.02174	1.70E-04	5.11E-04
39	0.02174	2.52E-04	7.64E-04
40	0.02174	3.74E-04	1.14E-03
41	0.02174	5.54E-04	1.69E-03
42	0.02174	8.17E-04	2.51E-03
43	0.02174	1.20E-03	3.71E-03
44	0.02174	1.76E-03	5.47E-03
45	0.02174	2.58E-03	8.06E-03
46	0.02174	3.77E-03	1.18E-02
47	0.02174	5.50E-03	1.73E-02
48	0.02174	8.00E-03	2.53E-02
49	0.02174	1.16E-02	3.69E-02
50	0.02174	1.68E-02	5.37E-02
51	0.02174	2.42E-02	7.80E-02
52	0.02174	3.49E-02	1.13E-01
53	0.02083	4.81E-02	1.61E-01
54	0.01902	6.30E-02	2.24E-01
55	0.01721	8.16E-02	3.06E-01
56	0.01540	1.04E-01	4.10E-01
57	0.01359	1.31E-01	5.41E-01

Mức nhiệt độ bề mặt, T, °C	Tần suất, P(T)	Biến dạng $\gamma$ theo mức nhiệt độ	Cộng dồn biến dạng $\gamma$
58	0.01178	1.62E-01	7.03E-01
59	0.00996	1.94E-01	8.97E-01
60	0.00815	2.25E-01	1.12E+00
61	0.00634	2.47E-01	1.37E+00
62	0.00453	2.49E-01	1.62E+00
62.7	0.00362	2.36E-01	1.85E+00

Tổng biến dạng  $\gamma = 1,85$ .

Từ tổng biến dạng trên, theo công thức (1.12), tính được:

$$RD = \frac{9 \cdot \gamma_u \cdot h^2}{2 \cdot L} = \frac{9 \cdot 1,85 \cdot 9^2}{2 \cdot 100} = 6,8 \text{ cm.}$$



**Hình 3.5: Cộng dồn tổng chiều sâu LVBX theo mức nhiệt độ**

Nhận xét kết quả tính toán theo 2 công thức:

- Cả 2 công thức tính nêu trên đều xét hần lún lớp BTN do tổng lưu lượng trục xe khai thác gây ra, và tính tất cả các mức nhiệt độ từ thấp nhất đến cao nhất trong suốt thời kỳ khai thác.

- Tính RD theo công thức đề xuất (3.19) do xét cường độ kháng cắt của BTN (hệ số nhớt) tăng dần (do nhiệt độ giảm) và ứng suất cắt giảm dần theo chiều sâu lớp BTN, cho kết quả  $RD = 6,13$  cm. Theo quy trình của Nga [69,70,89], cho kết quả cao hơn  $RD = 6,8$  cm, chênh lệch 10,3 %. Sự chênh lệch này được giải thích là theo quy trình Nga, áp dụng cho vùng khí hậu ôn

hòa, chấp nhận giả thiết nhiệt độ trong suốt chiều sâu tính toán không thay đổi, lấy chung bằng nhiệt độ tại độ sâu 2cm, nên các giá trị lực dính (C), góc nội ma sát ( $\varphi$ ), hệ số động (m) và năng lượng kích hoạt biến dạng nhớt dẻo (U) không đổi theo chiều sâu tính toán. Khi chấp nhận các thông số tính toán ở nhiệt độ cao tại độ sâu 2cm sẽ cho các giá trị tính toán là nhỏ hơn giá trị thực tế, nên cho kết quả tính chiều sâu LVBX cao hơn.

- Phương pháp tính chiều sâu LVBX theo (3.19) cho phép tính toán được giá trị ứng suất cắt thay đổi theo chiều sâu lớp BTN và xét được độ lớn hệ số nhớt thay đổi theo chiều sâu phụ thuộc mức nhiệt độ thay đổi trong lớp BTN, xét được tổng lưu lượng trục xe trong suốt thời kỳ, do vậy kết quả tính toán là phù hợp với khả năng làm việc thực tế của lớp BTN và điều kiện khí hậu nắng nóng của Việt Nam.

### **3.3. Tính toán xác định chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán trong lớp BTN trong điều kiện Việt Nam**

Để tính toán chiều sâu vết hằn lún lớp BTN trong điều kiện Việt Nam cần biết chiều sâu vùng biến dạng dẻo ( $h_d$ ) tính toán gây ra biến dạng LVBX lớp BTN theo hệ số k ( $k=3.h_d/L$ ) theo công thức (2.36). Chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán theo [23,66,70] được hiểu là chiều sâu lớp BTN bị biến dạng dẻo do tải trọng gây ra chủ yếu từ bề mặt đến độ sâu này, từ chiều sâu này trở đi trong lớp BTN, biến dạng dẻo có giá trị nhỏ, trong tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN có thể bỏ qua. Độ lớn chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán trong điều kiện Việt nam, được xác định trên cơ sở độ lớn hệ số nhớt của loại BTN, điều kiện khí hậu thực tế các vùng miền của Việt nam và tổng lưu lượng trục xe khai thác thực tế.

Chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán có thể xác định bằng khảo sát thực tế tại hiện trường hoặc bằng tính toán lý thuyết, có độ lớn phụ thuộc điều kiện khai thác thực tế. Theo [40,49,50,66,69,70,81], chiều sâu vùng biến dạng dẻo trong khoảng 3 ÷ 4 inch (7,5 ÷ 10 cm) tùy điều kiện khai thác cụ thể. Để xác định chiều sâu vùng biến dạng dẻo trong điều kiện Việt Nam, trong luận án sử dụng phương pháp khảo sát tính toán lý thuyết. Chiều sâu vùng biến dạng phụ thuộc độ lớn áp lực bánh xe tác dụng xuống mặt đường và loại BTN, trong khảo sát lấy theo quy định trong TCCS 38:2022/TCĐBVN, tính



với trục đơn tiêu chuẩn 10T, áp lực bánh hơi  $q=0,6\text{MPa}$ , với loại BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011. Độ lớn mức biến dạng dẻo tại từng độ sâu các phân lớp BTN phụ thuộc tổng thời gian tác dụng của tải trọng (phụ thuộc tổng lưu lượng trục xe khai thác và vận tốc phương tiện). Theo thông tư 31/2019/TT-BGTVT quy định đối với phương tiện vận tải ô tô chở người trên 30 chỗ, ô tô tải có trọng tải trên 3,5 tấn trên các tuyến quốc lộ đường ngoài khu vực đông dân cư, vận tốc tối đa  $60 \div 80 \text{ km/h}$  tùy theo đường một chiều và hai chiều. Còn đối với đường cao tốc quy định từ  $80 \div 120 \text{ km/h}$  và từ  $60 \div 100 \text{ km/h}$  tùy theo làn đường.

Để xác định chiều sâu vùng biến dạng dẻo lớp BTN trong điều kiện Việt Nam phục vụ tính toán chiều sâu LVBX, trong luận án sử dụng phương pháp lý thuyết, khảo sát ảnh hưởng của lưu lượng, tải trọng trục xe khai thác, loại BTN, điều kiện khí hậu các vùng miền của Việt Nam.

Về phân loại lưu lượng trục xe khai thác trên các tuyến đường. Hiện nay trên thế giới thường phân lưu lượng theo các mức nhẹ, trung bình, nặng và rất nặng. Với kết cấu áo đường mềm, tham khảo theo [30,41,85] có mức lưu lượng quy định theo bảng sau:

**Bảng 3.3: Phân loại mức lưu lượng giao thông**

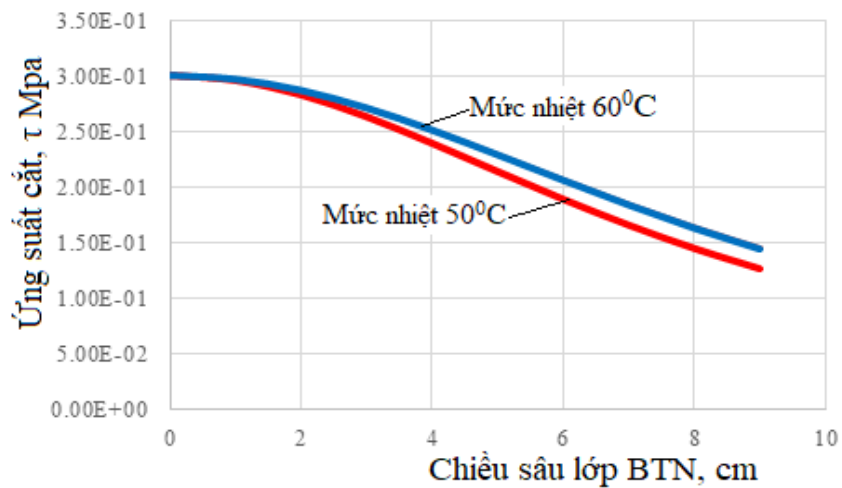
Mức lưu lượng	Tổng trục xe tiêu chuẩn, triệu lượt/làn
Mức nhẹ	$0,3 \div 1,0$
Mức trung bình	$1,0 \div 3,0$
Mức nặng	$3,0 \div 10$
Mức rất nặng	$10 \div 30$

### ***3.3.1 Tính toán chiều sâu vùng biến dạng dẻo phụ thuộc tải trọng, áp lực trục xe tiêu chuẩn và nhiệt độ***

Theo chiều sâu, độ lớn ứng suất cắt trong lớp BTN giảm dần do giá trị mô đun đàn hồi lớp BTN tăng lên khi nhiệt độ trong lớp BTN giảm, trong khảo sát xét cho bài toán hệ 2 lớp, với lớp BTN trên lớp nền móng tương đương, theo công thức (1.20). Tính toán cho trường hợp nhiệt độ bề mặt lớp BTN ở 2 mức là  $50^{\circ}\text{C}$  và  $60^{\circ}\text{C}$ , trục xe tiêu chuẩn, áp suất bánh  $0,6 \text{ Mpa}$ . Kết quả thể hiện trên Bảng 3.4 và Hình 3.6.

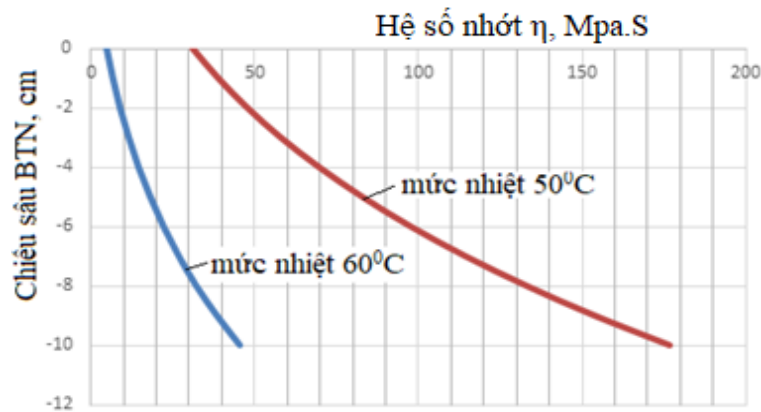
**Bảng 3.4: Phân bố hệ số nhớt ( $\eta$ ) và ứng suất cắt ( $\tau$ ) theo chiều sâu**

Chiều sâu $z, \text{cm}$	Độ lớn $\tau_z$ , MPa phụ thuộc nhiệt độ					
	Mức nhiệt bề mặt 50 °C			Mức nhiệt bề mặt 60 °C		
	Nhiệt độ, °C	Hệ số nhớt $\eta$ , MPa.s	Ứng suất cắt $\tau$ , MPa	Nhiệt độ, °C	Hệ số nhớt $\eta$ , MPa.s	Ứng suất cắt $\tau$ , MPa
0	50,0	31,0	3.00E-01	60,0	4,7	3.00E-01
1	48,8	38,8	2.94E-01	58,4	6,6	2.95E-01
2	47,7	47,7	2.78E-01	56,8	8,8	2.80E-01
3	46,7	57,9	2.53E-01	55,4	11,5	2.58E-01
4	45,7	69,6	2.25E-01	54,1	14,5	2.32E-01
5	44,9	82,8	1.96E-01	52,9	18,1	2.05E-01
6	44,1	97,6	1.70E-01	51,8	22,2	1.79E-01
7	43,3	114,3	1.46E-01	50,7	26,9	1.55E-01
8	42,6	133,0	1.25E-01	49,7	32,3	1.33E-01
9	41,9	153,7	1.07E-01	48,8	38,6	1.15E-01



a) ứng suất cắt theo chiều sâu

**Hình 3.6: Phân bố độ lớn ứng suất cắt và hệ số nhớt theo chiều sâu lớp BTN với nhiệt độ bề mặt khác nhau**



b) hệ số nhớt theo chiều sâu

**Hình 3.6: Phân bố độ lớn ứng suất cắt và hệ số nhớt theo chiều sâu lớp BTN với nhiệt độ bề mặt khác nhau**

**Nhận xét:** Trong lớp BTN ứng với mức nhiệt khảo sát là 50 và 60°C, độ lớn ứng suất cắt giảm nhanh theo chiều sâu, chủ yếu ở độ sâu từ bề mặt xuống đến 9cm (Hình 3.6a). Trong khoảng chiều sâu này, đường cong quan hệ ứng suất cắt với chiều sâu lớp BTN có độ dốc lớn. Tại độ sâu lớn hơn 9cm trở xuống, độ lớn ứng suất cắt có giá trị nhỏ và độ dốc đường cong có xu hướng đi ngang. Tương tự, với hệ số nhớt, do nhiệt độ tại độ sâu từ 9cm giảm nhiều so với bề mặt (Hình 3.6b), làm tăng hệ số nhớt từ 31 MPa.s lên 153,7 MPa.s với nhiệt độ bề mặt 50°C và từ 4,7 lên 38,6 MPa.s với nhiệt độ bề mặt 60°C. Như vậy từ độ sâu dưới 9cm trở xuống, ứng suất cắt có giá trị nhỏ và hệ số nhớt có giá trị lớn, nên biến dạng dẻo trong lớp BTN có giá trị nhỏ, là không đáng kể, trong tính toán chấp nhận gần đúng có thể bỏ qua.

**3.3.2 Tính toán chiều sâu vùng biến dạng dẻo theo chiều sâu phụ thuộc nhiệt độ môi trường và lưu lượng trục xe khai thác**

Xét ảnh hưởng của điều kiện khí hậu các vùng miền ở Việt Nam đến chiều sâu LVBX lớp BTN. Nhiệt độ tính toán lớp BTN cao nhất và thấp nhất phụ thuộc nhiệt độ không khí và nhiệt độ do bức xạ mặt trời gây ra, phụ thuộc vị trí địa lý (vĩ độ) nơi tuyến đường đi qua. Địa hình của Việt Nam trải dài từ vĩ độ 9° 11' thuộc địa phận tỉnh Cà Mau đến vĩ độ 22° 40' thuộc địa phận tỉnh Cao Bằng, do vậy nhiệt độ không khí giữa các vùng miền của Việt Nam có sự khác biệt khá lớn.

Trong tính toán khảo sát, xét cho 3 vùng khí hậu là khu vực TP. Hà Nội - đặc trưng cho khí hậu miền Bắc, khu vực TP. Đà Nẵng - đặc trưng cho khí hậu miền Trung và khu vực TP. Hồ Chí Minh - đặc trưng cho khí hậu miền Nam. Theo [8], khu vực TP. Hà Nội có nhiệt độ không khí cao nhất trung bình 7 ngày là  $37,75^{\circ}$  và thấp nhất là  $8^{\circ}$  và vĩ độ  $21^{\circ}$ , khu vực TP. Đà Nẵng có nhiệt độ không khí cao nhất 7 ngày liên tục là  $37,82^{\circ}$  và thấp nhất là  $14,45^{\circ}$ , có vĩ độ  $16^{\circ}$ , khu vực TP Hồ Chí Minh có nhiệt độ cao nhất 7 ngày liên tục là  $36,33^{\circ}$  và thấp nhất là  $19^{\circ}$ , vĩ độ  $10^{\circ}$ . Thay vào các công thức (2.15), (2.16), tính được nhiệt độ cách bề mặt 2cm lớp BTN, cao nhất khu vực TP. Hà Nội là  $T_{\max} = 62,7^{\circ}$ , thấp nhất là  $T_{\min} = 8,3^{\circ}$ , khu vực TP. Đà Nẵng có nhiệt độ cách bề mặt 2cm lớp BTN cao nhất khu là  $63,13^{\circ}$ , thấp nhất là  $13,78^{\circ}$ , khu vực TP Hồ Chí Minh có nhiệt độ bề mặt cách 2cm lớp BTN cao nhất  $T_{\max} = 62,4^{\circ}$ , thấp nhất là  $T_{\min} = 17,6^{\circ}$ . Nhiệt độ tại 2cm cách bề mặt khu vực Hà Nội tính theo (2.15) có độ lớn  $62,7^{\circ}$ , số liệu trên tương tự số liệu đo đạc khảo sát hiện trường ở độ sâu 2cm trong lớp BTN tại Hà Nội theo [8] bằng  $62,7^{\circ}\text{C}$ .

Thay các số liệu nhiệt độ trên vào công thức (3.19), tính được chiều sâu LVBX của 3 khu vực trên. Số liệu đầu vào tính cho kết cấu tương tự trong bài toán nêu ở mục 3.2, với lưu lượng trục xe 3000 lượt/ ngày đêm, các bước tính toán tương tự mục 3.2.1.2. Kết quả tính thể hiện trên Bảng 3.5.

**Bảng 3.5: Tính chiều sâu LVBX cho các địa phương ở Việt Nam**

Khu vực Tính toán	Nhiệt độ không khí 7 ngày liên tục, $^{\circ}\text{C}$		Nhiệt độ bề mặt lớp BTN, $^{\circ}\text{C}$		RD, cm
	Cao nhất	Thấp nhất	$T_{\max}$	$T_{\min}$	
TP. Hà Nội	37,75	8,0	62,7	8,5	6,13
TP. Đà Nẵng	37,82	14,0	63	14	7,16
TP Hồ Chí Minh	36,33	19,0	62,4	18	7,48

**Nhận xét:**

Từ kết quả tính chiều sâu LVBX theo bảng 3.5 cho thấy, độ lớn chiều sâu LVBX ngoài phụ thuộc nhiệt độ  $T_{\max}$ , còn phụ thuộc nhiệt độ  $T_{\min}$ . Trong bảng 3.5, nhiệt độ  $T_{\max}$  khu vực TP. Hà Nội và TP Hồ Chí Minh khác nhau

không nhiều (chênh lệch  $0,3^{\circ}\text{C}$ ), song do nhiệt độ  $T_{\min}$  tại TP Hồ Chí Minh lớn hơn nhiệt độ  $T_{\min}$  tại TP Hà Nội tới gần  $10^{\circ}\text{C}$ , khi đó tần suất thời gian các mức nhiệt độ cao (đại lượng  $P(T)$  theo công thức (3.15)) tại khu vực TP Hồ Chí Minh sẽ cao hơn khu vực TP Hà Nội, dẫn đến làm tăng chiều sâu LVBX lớp BTN khu vực TP Hồ Chí Minh.

Từ kết quả bảng tính 3.5 cũng cho thấy, tình trạng hư hỏng biến dạng LVBX xảy ra bất lợi nhất trong điều kiện Việt Nam là khu vực miền Nam (TP Hồ Chí Minh), tiếp theo là khu vực miền Trung (TP. Đà Nẵng), mức ảnh hưởng thấp hơn là khu vực miền Bắc (TP. Hà Nội).

Để lựa chọn chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán lớp BTN trong điều kiện Việt Nam phụ thuộc điều kiện khí hậu, trong tính toán khảo sát chọn tính cho 2 vùng khí hậu là khu vực TP Hồ Chí Minh có ảnh hưởng cao nhất và khu vực TP. Hà Nội có ảnh hưởng thấp nhất đến chiều sâu LVBX.

Trong bài toán khảo sát xác định chiều sâu vùng biến dạng dẻo với điều kiện khí hậu của khu vực TP. Hà Nội và TP Hồ Chí Minh, phụ thuộc mức lưu lượng (tính với 3 mức lưu lượng trục xe: mức trung bình, mức nặng và mức rất nặng theo bảng 3.3). Để đơn giản trong tính toán, chấp nhận giả thiết chiều sâu vùng biến dạng dẻo bằng với chiều dày lớp BTN của lớp trên của hệ 2 lớp, xét cho 2 trường hợp lớp BTN dày bằng 8 và 9cm. Trong khảo sát, khi xét với trường hợp lớp BTN dày 8cm, khi đó hệ số  $k$  trong công thức (3.19) có giá trị:  $k=3.h_d/L = 3.8/100=0,24$ , còn khi xét trường hợp lớp BTN dày 9cm, hệ số  $k$  có giá trị:  $k=3.9/100=0,27$ . Kết quả tính làm cơ sở chọn chiều dày tính toán vùng biến dạng dẻo lớp BTN ( $h_d$ ) để xác định hệ số  $k$  trong công thức (3.19) phù hợp với điều kiện Việt Nam.

### 3.3.2.1 Với khu vực khí hậu miền Bắc

Xét nhiệt độ khu vực TP. Hà Nội - đại diện khu vực miền Bắc. TP. Hà Nội có vĩ độ có vĩ độ  $21,23^{\circ}$ . Theo bài toán mục 3.3, có nhiệt độ tính toán lớn nhất  $T_{2\text{cm}} = 62,7^{\circ}\text{C}$  và  $T_{\min} = 8,5^{\circ}\text{C}$ .

Để đánh giá mức độ LVBX phụ thuộc tổng lưu lượng trục xe khai thác, tính với các mức lưu lượng trung bình, mức nặng và rất nặng theo bảng (3.3). với 2 trường hợp chiều dày khảo sát tính toán lớp BTN khác nhau (bằng 8 và

9cm) làm căn cứ để chọn chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán. Các bước tính toán tương tự nêu trong 3.2.1.1.

**Bảng 3.6 - Lưu lượng áp dụng khảo sát thử nghiệm**

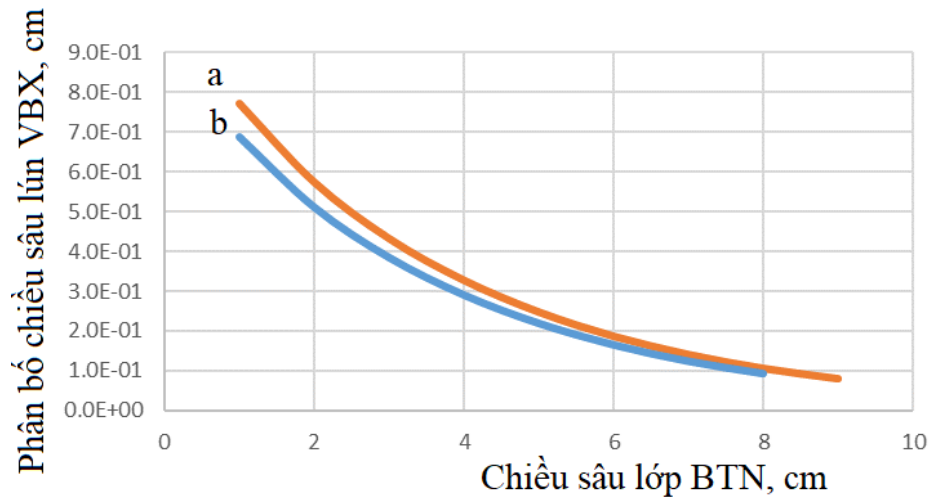
STT	Thông số	Mức lưu lượng		
		Trung bình	Nặng	Rất nặng
<i>I</i>	<i>Tổng lưu lượng trục xe trong suốt thời gian khai thác (trục/làn)</i>	<i>3.000.000</i>	<i>9.000.000</i>	<i>18.000.000</i>
1	Thời gian khai thác dự kiến	15 năm		
2	Lưu lượng quy đổi năm đầu tiên (trục/làn/ng.đ)	500	1.500	3.000
3	Hệ số tăng trưởng (%)	7,5	7,5	7,5
<i>II</i>	<i>Tốc độ khai thác</i>	<i>60 km/h</i>	<i>70 km/h</i>	<i>80 km/h</i>

Áp dụng công thức tính chiều sâu LVBX theo công thức (3.19), tính toán kết cấu xác định chiều sâu vùng biến dạng dẻo với chiều dày lớp BTN khảo sát cho các trường hợp chiều dày lớp BTN h bằng 8cm, 9 cm các lớp móng và nền có chiều dày và cường độ được chọn đáp ứng yêu cầu theo chỉ tiêu thiết kế mô đun đàn hồi chung bằng với mô đun đàn hồi yêu cầu.

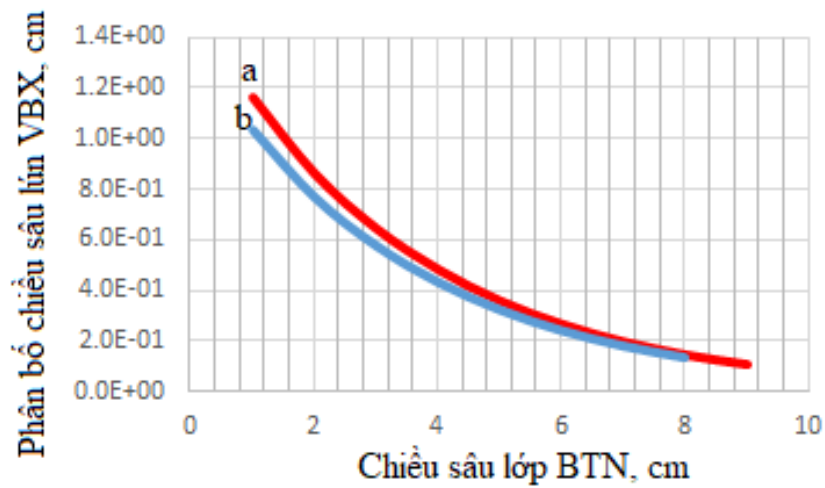
Tính toán xác định chiều sâu hần lún lớp BTN cho các trường hợp chiều dày lớp BTN khác nhau, thay đổi h từ 8-9cm. Kết quả tính toán thể hiện trên **Bảng 3.7, và Hình 3.7.**

**Bảng 3.7: Mức RD của các phân lớp khi chiều dày lớp BTN khác nhau (khu vực miền Bắc)**

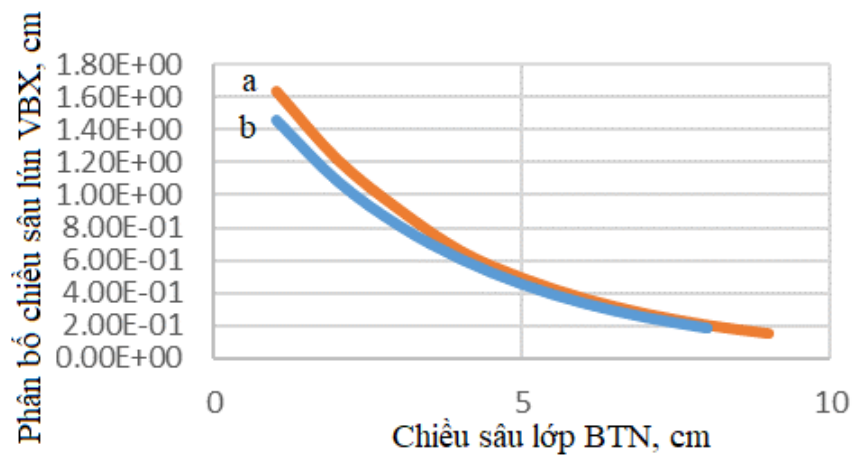
Số thứ tự phân lớp	Chiều dày phân lớp,cm	Với lưu lượng mức trung bình		Với lưu lượng mức nặng		Với lưu lượng mức rất nặng	
		Lớp BTN dày 8 cm	Lớp BTN dày 9 cm	Lớp BTN dày 8 cm	Lớp BTN dày 9 cm	Lớp BTN dày 8 cm	Lớp BTN dày 9 cm
1	1	0,69	0,77	1,0	1,2	1,46	1,681
2	1	0,511	0,575	0,77	0,861	1,08	1,245
3	1	0,385	0,433	0,57	0,645	0,812	0,932
4	1	0,291	0,328	0,43	0,484	0,608	0,698
5	1	0,22	0,248	0,32	0,361	0,454	0,521
6	1	0,166	0,187	0,24	0,269	0,339	0,388
7	1	0,125	0,141	0,18	0,2	0,252	0,289
8	1	0,094	0,106	0,13	0,149	0,187	0,215
9	1	-	0,08	-	0,111	-	0,160
<b>Cộng RD, cm</b>		<b>2,48</b>	<b>2,9</b>	<b>3,7</b>	<b>4,2</b>	<b>5,19</b>	<b>6,13</b>



a) với lưu lượng trung bình



b) với lưu lượng nặng



c) với lưu lượng rất nặng

**Hình 3.7: Đồ thị phân bố RD theo các phân lớp chiều sâu với lớp BTN 8cm và 9cm (khu vực miền Bắc)**  
 a- chiều dày 9cm; b- chiều dày 8cm



Từ kết quả khảo sát thể hiện trên Bảng 3.7 và Hình 3.7, ta có thể thấy:

- Phân bố chiều sâu vết lún trong lớp BTN theo các phân lớp suốt thời kỳ khai thác với các chiều dày tính toán h lớp BTN khác nhau.

- Chiều sâu hần lún xảy ra chủ yếu tại các phân lớp phía trên lớp BTN, càng xuống sâu, mức hần lún giảm nhanh. Từ độ sâu 8cm trở xuống, đường đồ thị có xu hướng đi ngang, mức hần lún ở các độ sâu này có giá trị thấp.

Xác định độ lớn biến dạng hần lún tại các phân lớp cuối cùng trong lớp BTN có chiều dày 8 và 9cm. Kết quả tính toán thể hiện trong Bảng 3.8.

**Bảng 3.8: Tổng hợp chiều sâu LVBX tại phân lớp dưới cùng cho các trường hợp lưu lượng khác nhau (miền Bắc)**

Mức lưu lượng	Phân lớp 8cm		Phân lớp 9cm	
	RD/ tổng RD	%	RD/ tổng RD	%
Mức trung bình	0,094/2,48	3,8	0,08/2,9	2,5
Mức nặng	0,13/3,7	3,5	0,11/4,2	2,5
Mức rất nặng	0,187/5,19	3,6	0,16/6,13	2,5

**Nhận xét:** Từ kết quả tính phân bố trên Bảng 3.8 cho thấy, ứng suất cắt theo chiều sâu từ độ sâu 9cm trở xuống, có giá trị nhỏ và giảm nhanh, mức hần lún và tỉ lệ hần lún so với tổng chiều sâu hần lún có giá trị nhỏ: ở phân lớp 8cm mức hần lún chiếm mức cao tới  $3,5 \div 3,8$  % tổng hần lún tùy theo chiều dày lớp BTN, nhưng từ độ sâu phân lớp 9 cm của trường hợp lớp BTN dày 9cm, mức hần lún chỉ chiếm không quá 2,5 % so với tổng độ LVBX. Điều đó cho thấy ở mọi mức lưu lượng trục xe khai thác, vùng biến dạng dẻo lớp BTN chủ yếu chỉ xảy ra ở mức chiều sâu không quá 9cm. Từ mức 9cm trở xuống, mức hần lún có giá trị nhỏ, trong tính toán chiều sâu hần lún có thể bỏ qua. Từ kết quả tính toán cho thấy trong điều kiện khí hậu miền Bắc, chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán gây LVBX trong lớp BTN, chủ yếu xảy ra trong phạm vi không quá 9cm với mọi mức giao thông, trong tính toán chiều sâu LVBX có thể chọn chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán bằng 9cm.

### 3.3.2.2 Với khu vực khí hậu miền Nam

Trong khảo sát, xét điều kiện khí hậu tính cho khu vực TP Hồ Chí Minh, đại diện cho khí hậu khu vực miền Nam. Với số liệu lưu lượng, loại BTN tương tự tính cho khu vực TP. Hà Nội nêu tại **Bảng 3.6**.

TP. Hồ Chí Minh có vĩ độ bắc  $10,0^{\circ}$ , với các điều kiện không khí như sau:

- Nhiệt độ tính toán lớn nhất tại độ sâu 2cm theo công thức (2.15) bằng  $62,4^{\circ}\text{C}$ .

- Nhiệt độ tính toán nhỏ nhất tính theo (2.16) bằng  $17,6^{\circ}\text{C}$ .

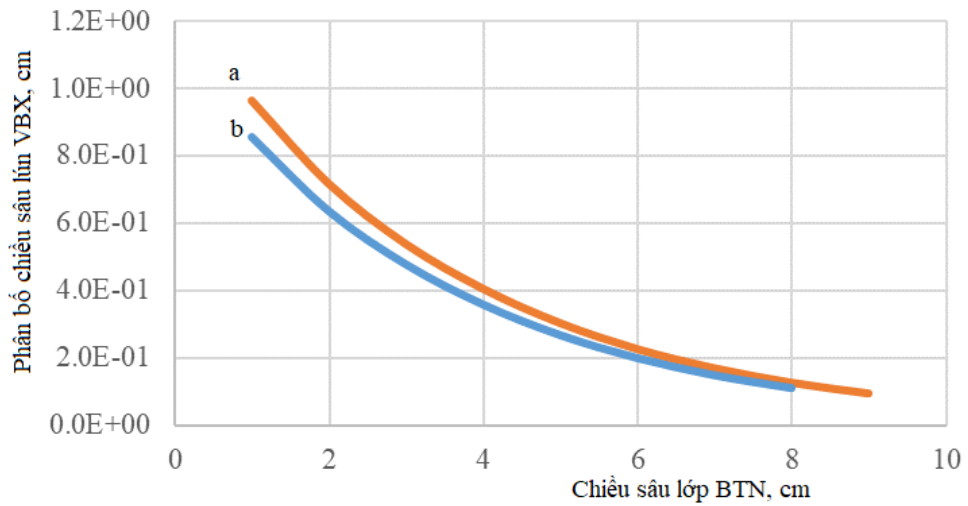
Với số liệu đầu vào và các bước tính toán tương tự nêu trong mục 3.3.1.1.

Kết cấu mặt đường, mặt đường cấp cao A1 sử dụng BTN theo TCVN 8819:2011, tính với kết cấu áo đường chịu tác dụng của tải trọng động theo hướng dẫn trong [88] đáp ứng yêu cầu khai thác 3.000 trục xe / ngày đêm, gồm 1 lớp BTNC12,5 dày 9cm, lớp BTNC19 dày 16cm, lớp móng trên CPĐD loại 1 dày 50cm, lớp móng dưới CPĐD loại 2 dày 50cm, trên lớp đáy áo đường dày 30cm có hệ số đầm chặt K98, trên lớp nền đất có mô đun đàn hồi  $E=45\text{MPa}$ .

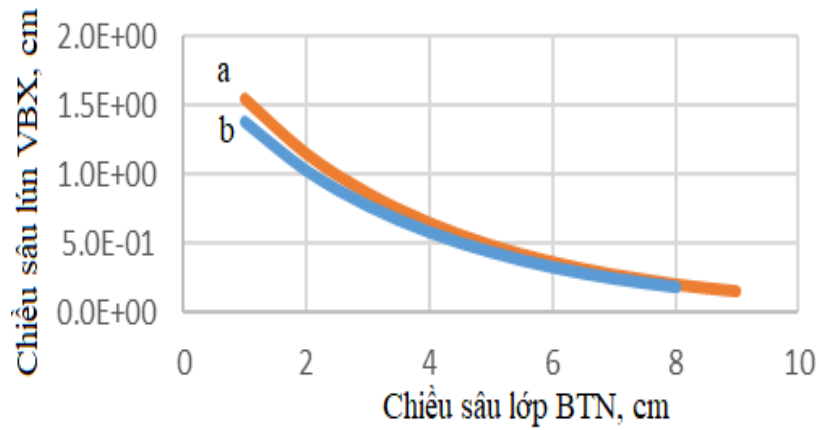
Kết quả tính toán được trình bày trong Bảng 3.9 và Hình 3.8.

**Bảng 3.9: Mức RD của các phân lớp khi chiều dày lớp BTN khác nhau (khu vực miền Nam)**

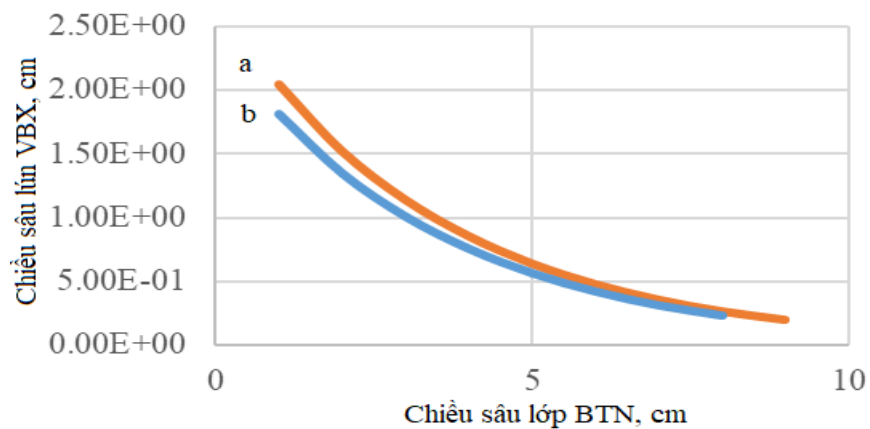
Số thứ tự phân lớp	Chiều dày phân lớp,cm	Với lưu lượng mức trung bình		Với lưu lượng mức nặng		Với lưu lượng mức rất nặng	
		Lớp BTN dày 8 cm	Lớp BTN dày 9 cm	Lớp BTN dày 8 cm	Lớp BTN dày 9 cm	Lớp BTN dày 8 cm	Lớp BTN dày 9 cm
1	1	0,860	0,960	1,4	1,50	1,82	2,05
2	1	0,636	0,716	1,0	1,149	1,35	1,52
3	1	0,478	0,537	0,77	0,861	1,01	1,14
4	1	0,359	0,404	0,57	0,646	0,759	0,854
5	1	0,268	0,302	0,43	0,483	0,567	0,638
6	1	0,200	0,225	0,32	0,36	0,423	0,476
7	1	0,149	0,168	0,24	0,268	0,314	0,354
8	1	0,111	0,125	0,18	0,199	0,234	0,263
9	1	-	0,093	-	0,149	-	0,196
<b>Tổng RD,cm</b>		<b>3,1</b>	<b>3,5</b>	<b>4,9</b>	<b>5,7</b>	<b>6,48</b>	<b>7,49</b>



a) mức lưu lượng trung bình



b) mức lưu lượng nặng



b) mức lưu lượng rất nặng

**Hình 3.8: Đồ thị phân bố RD theo các phân lớp chiều sâu với lớp BTN 8cm và 9cm (khu vực miền Nam)**

a- chiều dày 9cm; b- chiều dày 8cm

Từ kết quả khảo sát thể hiện trên Bảng 3.9 và Hình 3.8, ta có thể thấy:

- Phân bố chiều sâu vết lún trong lớp BTN theo các phân lớp suốt thời kỳ khai thác với các chiều dày tính toán h lớp BTN khác nhau.

- Chiều sâu hần lún xảy ra chủ yếu tại các phân lớp phía trên lớp BTN, càng xuống sâu, mức hần lún giảm nhanh. Từ độ sâu 8cm trở xuống, đường đồ thị có xu hướng đi ngang, mức hần lún ở các độ sâu này có giá trị thấp.

Xác định độ lớn biến dạng hần lún tại các phân lớp cuối cùng trong lớp BTN có chiều dày 8 và 9cm. Kết quả tính toán thể hiện trong Bảng 3.10.

**Bảng 3.10: Tổng hợp chiều sâu LVBX cho các trường hợp lưu lượng khác nhau (miền Nam)**

Mức lưu lượng	Phân lớp 8cm		Phân lớp 9cm	
	RD/tổng RD	%	RD/tổng RD	%
Mức trung bình	0,111/3,1	3,5	0,093/3,5	2,5
Mức nặng	0,18/4,9	3,6	0,149/5,7	2,5
Mức rất nặng	0,234/6,48	3,6	0,196/7,49	2,5

#### **Nhận xét kết quả tính:**

1) Từ kết quả tính trên các Bảng 3.4 đến Bảng 3.10 và Hình 3.6 đến Hình 3.8 cho thấy, ứng suất cắt theo chiều sâu từ độ sâu 8 ÷ 9cm trở xuống, có giá trị nhỏ và giảm nhanh, còn theo Bảng 3.7, Bảng 3.9 và Hình 3.7 ÷ Hình 3.8 cho thấy, ở cả 2 vùng khí hậu miền Bắc và miền Nam, từ chiều sâu 9cm trở xuống, mức hần lún và tỉ lệ hần lún so với tổng chiều sâu hần lún có giá trị nhỏ: ở phân lớp 8cm của trường hợp lớp BTN dày 8cm, mức hần lún chiếm mức cao tới 3,5 ÷ 3,6 % tổng hần lún tùy theo mức lưu lượng, nhưng từ độ sâu phân lớp 9cm của trường hợp lớp BTN dày 9cm, mức hần lún chỉ chiếm không quá 2,5 % so với tổng độ LVBX. Điều đó cho thấy ở mọi mức lưu lượng trục xe khai thác, với các vùng khí hậu khác nhau ở Việt nam, vùng biến dạng dẻo lớp BTN chủ yếu chỉ xảy ra ở mức chiều sâu không quá 9 cm.

Từ mức 9 cm trở xuống, mức hần lún có giá trị nhỏ, trong tính toán chiều sâu hần lún có thể bỏ qua, trong tính toán chiều sâu LVBX có thể chọn chiều sâu vùng biến dạng dẻo trong điều kiện Việt Nam, tính toán bằng 9 cm.

2) Hệ số  $k$  trong công thức (3.19) được xác định trên cơ sở độ lớn chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán, phụ thuộc độ lớn ứng suất cắt theo chiều sâu, loại BTN, nhiệt độ môi trường và lưu lượng trục xe khai thác. Trong điều kiện khí hậu các vùng miền của Việt Nam, với loại BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011, khi tính chiều sâu LVBX, chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán  $h_d$  trong lớp BTN có độ lớn trung bình bằng 9cm với mọi mức giao thông (trung bình, nặng và rất nặng), khi đó hệ số  $k$  được lấy bằng 0,27 ( $k=3h_d/L = 3.9/100=0,27$ ).

3) Trường hợp trong phạm vi lớp BTN bề mặt 9cm được bố trí nhiều lớp với các loại BTN khác nhau, trong tính toán chiều sâu LVBX, tại các phân lớp theo chiều sâu của từng loại BTN, thay giá trị các tham số mô đun đàn hồi và hệ số nhớt tương ứng của loại BTN để tính toán.

### 3.4. Kết luận chương 3

1) Kết quả nghiên cứu trong chương 3 đã xây dựng công thức tính chiều sâu LVBX trên làn xe chạy theo phương pháp lý thuyết theo nguyên lý cơ học môi trường liên tục (theo công thức 3.19), cho phép xét được tổng lưu lượng trục xe trong suốt thời kỳ khai thác, có xét sự thay đổi nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN làm thay đổi giá trị mô đun đàn hồi động và giá trị hệ số nhớt của BTN, cho phép tính toán các giá trị ứng suất cắt và giá trị hệ số nhớt theo chiều sâu của BTN là đảm bảo độ chính xác, nên phương pháp tính đảm bảo độ tin cậy và phù hợp với điều kiện khí hậu nắng nóng của Việt Nam.

2) Kết quả tính toán RD theo phương pháp đề xuất phù hợp sát với điều kiện thực tế của Việt Nam, cho phép xét được điều kiện thực tế các vùng khí hậu khác nhau, loại BTN khác nhau, các mức lưu lượng trục xe khai thác thực tế. Cho phép xét được ảnh hưởng của cường độ lớp móng và nền đến chiều sâu LVBX lớp BTN thông qua tham số mô đun đàn hồi chung móng và nền. Nên kết quả tính đảm bảo độ chính xác.

3) Ngoài yếu tố nhiệt độ môi trường làm giảm cường độ kháng cắt của BTN, lưu lượng khai thác và vận tốc phương tiện có ảnh hưởng đáng kể đến

độ lớn LVBX (RD) tại các phân lớp chiều sâu. Với lưu lượng khai thác bằng nhau nhưng trên các tuyến đường có xe vận hành với vận tốc cao, thời gian tác dụng của tải trọng xuống mặt đường giảm, nên cho chiều sâu vệt lún nhỏ hơn các tuyến đường có vận tốc xe chạy nhỏ hơn, dù ở cùng loại kết cấu và điều kiện nhiệt độ môi trường.

4) Kết quả tính toán với trục đơn 10T, áp suất bánh hơi 0,6MPa, trong điều kiện khí hậu của Việt Nam, theo tính toán phân bố chiều sâu LVBX theo các phân lớp cho thấy, chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán trong lớp BTN có giá trị bằng 9cm. Kết quả tính toán trên trùng với nhận xét về chiều sâu vùng biến dạng dẻo lớp BTN trên làn xe chạy nêu trong [40,49,69,70,72,84,87], là  $h_d$  bằng 3 ÷ 4 inch (7,5 ÷ 10cm). Như vậy, chiều dày lớp BTN có cường độ kháng cắt tính toán theo yêu cầu khai thác cần đạt 9cm, dưới chiều sâu trên, có thể sử dụng loại BTN có cường độ kháng cắt thấp hơn.

## **CHƯƠNG 4. ỨNG DỤNG TÍNH TOÁN LÚN VẾT BÁNH XE LỚP BTN TRONG ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM**

Từ kết quả nghiên cứu đề xuất phương pháp tính toán chiều sâu LVBX nêu trong chương 3, trong chương 4 sẽ tiến hành ứng dụng phương pháp đề xuất, tính toán chiều sâu LVBX và so sánh với chiều sâu LVBX thực tế đo được trên các tuyến đường thực tế tại Việt Nam, làm cơ sở đánh giá độ tin cậy của phương pháp đề xuất. Trên cơ sở đó, kiến nghị các giải pháp cấu tạo, giải pháp quản lý nhằm hạn chế khắc phục tình trạng xảy ra LVBX lớp BTN trên các tuyến đường trong điều kiện Việt Nam.

### **4.1. Ứng dụng tính toán LVBX một số tuyến đường thực tế tại Việt Nam**

#### **4.1.1 Áp dụng tính LVBX cho kết cấu áo đường QL.1 đoạn qua tỉnh Ninh Bình**

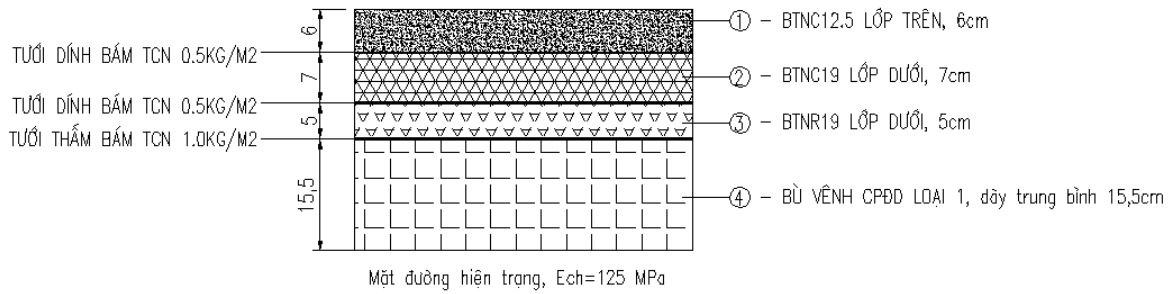
Đoạn khảo sát nằm trên tuyến QL1, đoạn đi qua TP Ninh Bình. Khảo sát do NCS thực hiện vào tháng 4 năm 2022. Làn xe mở rộng được xây dựng đưa vào khai thác cuối năm 2015. Lưu lượng khai thác năm đầu theo dự báo thiết kế 1.700 lượt/ ngày đêm/làn, tăng trưởng trung bình những năm đầu 8%, tính với trục xe tiêu chuẩn 10T, áp suất bánh xe 0,6MPa, vận tốc 60 ÷ 70 km/h. Sau gần 7 năm đưa vào khai thác đạt 3,87 triệu lượt trục tiêu chuẩn quy đổi /làn xe . Kết cấu tăng cường làn đường gồm: lớp mặt tăng cường BTNC12,5 dày 6cm, BTNC19 dày 7cm, BTNR19 dày 5cm, lớp móng CPĐD loại 1, dày 15,5cm, trên lớp kết cấu áo đường cũ, xem Hình 4.1.

Trên làn đường của đoạn tuyến khảo sát (km281+895), vào thời điểm 4/2022 đã xuất hiện biến dạng LVBX (xem Hình 4.3), chiều sâu LVBX đo được là  $RD = 3,5\text{cm}$ , chiều cao vết gờ trời 2 bên vết lún có độ lớn đo được bằng 1,15cm, xấp xỉ bằng  $RD/3$ . Căn cứ hình dạng và kích thước LVBX khảo sát nêu trên (xem hình 2.4) cho thấy, LVBX chỉ xảy ra ở lớp BTN.

Áp dụng công thức (3.19) tính được RD. Điều kiện địa lý tỉnh Ninh Bình: có vĩ độ  $20^{\circ}$ . Theo công thức (2.15) với mức nhiệt không khí nóng nhất 7 ngày liên tục  $39^{\circ}\text{C}$ , tính được nhiệt độ lớn nhất (2cm):  $T_{2\text{cm}} = 62,9^{\circ}\text{C}$ .

Với mức nhiệt không khí thấp nhất trong năm bằng  $8,5^{\circ}\text{C}$ , theo công thức (2.16) tính được nhiệt độ thấp nhất  $T_{\text{min}} = 9^{\circ}\text{C}$ .



**KẾT CẤU MẶT ĐƯỜNG****Hình 4.1: Kết cấu áo đường QL1 đoạn đi qua tỉnh Ninh Bình**

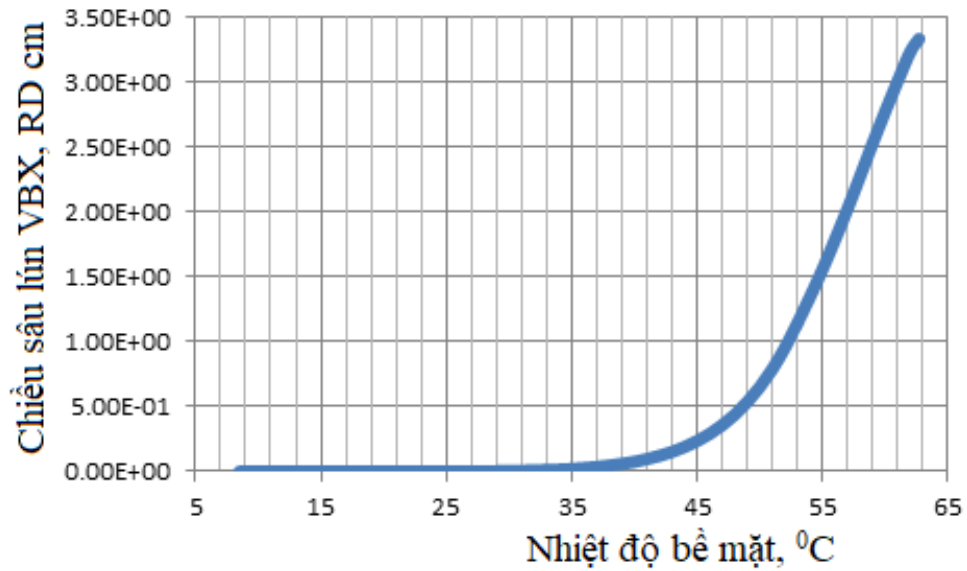
Áp dụng công thức (3.19) tính được RD. Trên Bảng 4.1 và Hình 4.2 thể hiện kết quả tính LVBX tuyến đường khảo sát.

**Bảng 4.1: Kết quả tính toán chiều sâu LVBX**

Mức nhiệt bề mặt, °C	Tần suất nhiệt độ P(T)	Mức RD theo tần suất nhiệt độ, cm	Cộng dồn RD, cm
9	0,0045	9,505E-07	1,64E-06
10	0,0063	1,801E-06	3,44E-06
11	0,0082	3,114E-06	6,55E-06
12	0,0100	5,102E-06	1,17E-05
13	0,0118	8,062E-06	1,97E-05
14	0,0136	1,241E-05	3,21E-05
15	0,0154	1,873E-05	5,09E-05
16	0,0172	2,783E-05	7,87E-05
17	0,0190	4,080E-05	1,19E-04
18	0,0208	5,915E-05	1,79E-04
19	0,0217	8,495E-05	2,64E-04
20	0,0217	1,083E-04	3,72E-04
21	0,0217	1,425E-04	5,14E-04
22	0,0217	1,869E-04	7,01E-04
23	0,0217	2,448E-04	9,46E-04
24	0,0217	3,198E-04	1,27E-03
25	0,0217	4,168E-04	1,68E-03
26	0,0217	5,419E-04	2,22E-03
27	0,0217	7,028E-04	2,93E-03
28	0,0217	8,930E-04	3,82E-03
29	0,0217	1,172E-03	4,99E-03
30	0,0217	1,508E-03	6,50E-03

<b>Mức nhiệt bề mặt, °C</b>	<b>Tần suất nhiệt độ P(T)</b>	<b>Mức RD theo tần suất nhiệt độ, cm</b>	<b>Cộng dồn RD, cm</b>
31	0,0217	1,933E-03	8,43E-03
32	0,0217	2,470E-03	1,09E-02
33	0,0217	3,147E-03	1,41E-02
34	0,0217	3,996E-03	1,80E-02
35	0,0217	5,055E-03	2,31E-02
36	0,0217	6,372E-03	2,95E-02
37	0,0217	8,003E-03	3,75E-02
38	0,0217	1,001E-02	4,75E-02
39	0,0217	1,247E-02	6,00E-02
40	0,0217	1,548E-02	7,54E-02
41	0,0217	1,913E-02	9,46E-02
42	0,0217	2,355E-02	1,18E-01
43	0,0217	2,887E-02	1,47E-01
44	0,0217	3,525E-02	1,82E-01
45	0,0217	4,286E-02	2,25E-01
46	0,0217	5,191E-02	2,77E-01
47	0,0217	6,264E-02	3,40E-01
48	0,0217	7,531E-02	4,15E-01
49	0,0217	9,024E-02	5,05E-01
50	0,0217	1,078E-01	6,13E-01
51	0,0217	1,284E-01	7,41E-01
52	0,0217	1,526E-01	8,94E-01
53	0,0208	1,795E-01	1,07E+00
54	0,0190	1,948E-01	1,27E+00
55	0,0172	2,093E-01	1,48E+00
56	0,0154	2,227E-01	1,70E+00
57	0,0136	2,340E-01	1,93E+00
58	0,0118	2,423E-01	2,18E+00
59	0,0100	2,463E-01	2,42E+00
60	0,0082	2,440E-01	2,67E+00
61	0,0063	2,329E-01	2,90E+00
62	0,0045	2,090E-01	3,11E+00
62,9	0,0036	1,721E-01	3,28E+00

Tổng chiều sâu LVBX tính toán lý thuyết đạt  $RD = 3,28$  cm. Trong khi chiều sâu thực tế đo được bằng 3,5 cm, sai lệch là 0,14 cm, mức sai lệch xấp xỉ 6,2%. Mức sai lệch không lớn, cho thấy giữa tính toán lý thuyết theo công thức (3.19) và thực tế đo chiều sâu LVBX có giá trị tương đương nhau.



**Hình 4.2: Cộng dồn chiều sâu LVBX theo mức nhiệt từ thấp đến cao**



**Hình 4.3: Đo đạc LVBX QL.1 (Km281+895), 4/2022**

#### 4.1.2 Áp dụng tính LVBX cho kết cấu áo đường QL.1 đoạn qua tỉnh Thanh Hóa

Tuyến QL.1 là tuyến đường huyết mạch cho trục giao thông Bắc - Nam của nước ta, đảm bảo lưu thông hàng hóa và nhu cầu đi lại của người dân giữa các vùng miền trong cả nước.

Đoạn tuyến QL.1 qua tỉnh Thanh Hóa được cải tạo nâng cấp mở rộng lên 4 làn xe từ năm 2003. Sau 10 năm đưa vào khai thác, theo [16], trên mặt đường nâng cấp đã xuất hiện các hư hỏng, trong đó có tình trạng hư hỏng LVBX lớp BTN (xem Hình 4.4, chụp 2012). Căn cứ hình dạng và kích thước LVBX khảo sát nêu trên, theo nhận xét nêu tại mục 2.1.3 ( xem hình 2.4) cho thấy LVBX chỉ xảy ra ở lớp BTN.

Kết cấu mặt đường cấp A1, với kết cấu điển hình tầng mặt gồm 2 lớp BTNC12,5 và BTNC19 có tổng chiều dày  $5+7=12\text{cm}$ , tầng móng với lớp móng trên CPDD loại 1 dày 30cm, trên lớp móng dưới CPDD loại 2 dày 30cm, trên lớp nền thượng đáy áo đường dày 30cm độ đầm chặt K98, trên nền đất tự nhiên có độ đầm chặt K95. Theo dự báo thiết kế năm đầu khai thác 1700 lượt trục xe tiêu chuẩn quy đổi / ngày đêm/làn, tăng trưởng 8% năm, vận tốc 60-70km/h, với tải trọng trục 10T, áp suất bánh 0,6MPa. Sau 10 năm khai thác đạt lưu lượng 6,3 triệu trục xe quy đổi/ làn.

Để tính toán tình trạng LVBX, áp dụng theo công thức (3.19).

Nhiệt độ tính toán khu vực TP. Thanh Hóa:

- + Nhiệt độ lớn nhất tại độ sâu 2cm: theo công thức (2.15): với vĩ độ  $19^{\circ}30'$ , tính được khu vực TP Thanh Hóa là  $T_{2\text{cm}} = 62,9^{\circ}\text{C}$ .
- + Tương tự, nhiệt độ tính toán nhỏ nhất tính theo (2.16):  $T_{\text{min}} = 9^{\circ}\text{C}$ .

Kết quả tính toán chiều sâu LVBX thể hiện trên bảng 4.2.

Áp dụng công thức (3.19) tính được RD thể hiện bảng 4.2. Trên Hình 4.5 thể hiện tổng chiều sâu LVBX theo từng mức nhiệt độ từ thấp nhất đến cao nhất trong suốt thời kỳ khai thác.

**Bảng 4.2: Kết quả tính toán chiều sâu LVBX**

Mức nhiệt bề mặt, °C	Tần suất nhiệt độ P(T)	Mức RD theo tần suất nhiệt độ, cm	Cộng dồn RD, cm
9	0,0045	1,212E-06	2,08E-06
10	0,0063	2,295E-06	4,38E-06
11	0,0082	3,970E-06	8,35E-06
12	0,0100	6,503E-06	1,49E-05
13	0,0118	1,028E-05	2,51E-05
14	0,0136	1,582E-05	4,10E-05
15	0,0154	2,388E-05	6,48E-05
16	0,0172	3,547E-05	1,00E-04
17	0,0190	5,200E-05	1,52E-04
18	0,0208	7,540E-05	2,28E-04
19	0,0217	1,083E-04	3,36E-04
20	0,0217	1,381E-04	4,74E-04
21	0,0217	1,816E-04	6,56E-04
22	0,0217	2,383E-04	8,94E-04
23	0,0217	3,120E-04	1,21E-03
24	0,0217	4,076E-04	1,61E-03
25	0,0217	5,313E-04	2,14E-03
26	0,0217	6,907E-04	2,84E-03
27	0,0217	8,958E-04	3,73E-03
28	0,0217	1,138E-03	4,87E-03
29	0,0217	1,494E-03	6,36E-03
30	0,0217	1,922E-03	8,29E-03
31	0,0217	2,464E-03	1,07E-02
32	0,0217	3,149E-03	1,39E-02
33	0,0217	4,012E-03	1,79E-02
34	0,0217	5,093E-03	2,30E-02
35	0,0217	6,444E-03	2,94E-02

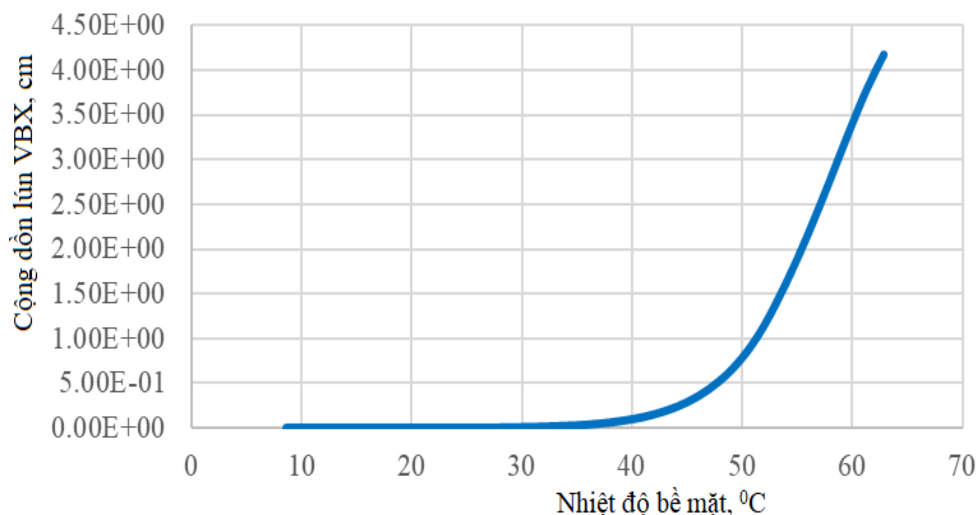
Mức nhiệt bề mặt, °C	Tần suất nhiệt độ P(T)	Mức RD theo tần suất nhiệt độ, cm	Cộng dồn RD, cm
36	0,0217	8,123E-03	3,76E-02
37	0,0217	1,020E-02	4,78E-02
38	0,0217	1,276E-02	6,05E-02
39	0,0217	1,590E-02	7,64E-02
40	0,0217	1,973E-02	9,62E-02
41	0,0217	2,439E-02	1,21E-01
42	0,0217	3,002E-02	1,51E-01
43	0,0217	3,680E-02	1,87E-01
44	0,0217	4,493E-02	2,32E-01
45	0,0217	5,463E-02	2,87E-01
46	0,0217	6,617E-02	3,53E-01
47	0,0217	7,984E-02	4,33E-01
48	0,0217	9,599E-02	5,29E-01
49	0,0217	1,150E-01	6,44E-01
50	0,0217	1,374E-01	7,81E-01
51	0,0217	1,637E-01	9,45E-01
52	0,0217	1,945E-01	1,14E+00
53	0,0208	2,288E-01	1,37E+00
54	0,0190	2,482E-01	1,62E+00
55	0,0172	2,668E-01	1,88E+00
56	0,0154	2,838E-01	2,17E+00
57	0,0136	2,983E-01	2,47E+00
58	0,0118	3,089E-01	2,77E+00
59	0,0100	3,139E-01	3,09E+00
60	0,0082	3,110E-01	3,40E+00
61	0,0063	2,968E-01	3,70E+00
62	0,0045	2,664E-01	3,96E+00
62,9	0,0036	2,193E-01	<b>4,18E+00</b>

Tổng RD =4,18cm.

So sánh chiều sâu LVBX tính toán theo công thức (3.19)  $RD=4,18\text{cm}$ , so với kết quả đo đạc thực tế (xem hình 4.4), điều đó cho thấy hai kết quả có giá trị tương đương nhau.



**Hình 4.4: LVBX lớp BTN thực tế trên tuyến QL1 [16] đoạn qua tỉnh Hà Nam – Thanh hóa (ảnh chụp năm 2012)**

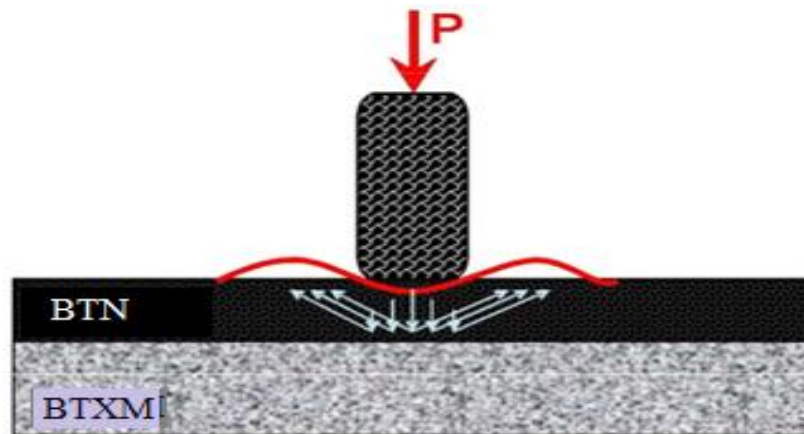


**Hình 4.5: Biểu đồ tổng LVBX theo mức nhiệt độ bề mặt**

#### **4.1.3 Khảo sát đánh giá ảnh hưởng của cường độ lớp móng và nền đến chiều sâu LVBX lớp BTN mặt đường**

Để đánh giá về mặt định lượng ảnh hưởng của cường độ lớp móng đến chiều sâu LVBX trong lớp BTN mặt đường, thực hiện bài toán khảo sát xét cho trường hợp mặt đường kết cấu tăng cường lớp BTN trên mặt đường BTXM, đối chứng với kết cấu áo đường mềm thông thường lớp BTN trên lớp móng CPĐĐ. Tính cho khu vực TP. Hà Nội.

Lớp BTN tăng cường trên mặt đường hiện hữu BTXM đường ô tô và sân bay thường được áp dụng trong thực tế, khi có nhu cầu nâng cấp mặt đường do lưu lượng trục xe khai thác dự kiến tăng lên. Đặc điểm làm việc của kết cấu tăng cường lớp BTN trên mặt đường BTXM hiện hữu là dưới tác dụng của tải trọng bánh xe, lớp BTN nằm trên lớp mặt đường BTXM có độ cứng kháng biến dạng lớn, nên trong lớp BTN sẽ xuất hiện ứng suất lớn, gây biến dạng lớn cho lớp BTN. Sơ đồ sự làm việc của kết cấu tăng cường lớp BTN trên mặt đường hiện hữu từ BTXM dưới tác dụng của tải trọng bánh xe được thể hiện trên Hình 4.6.



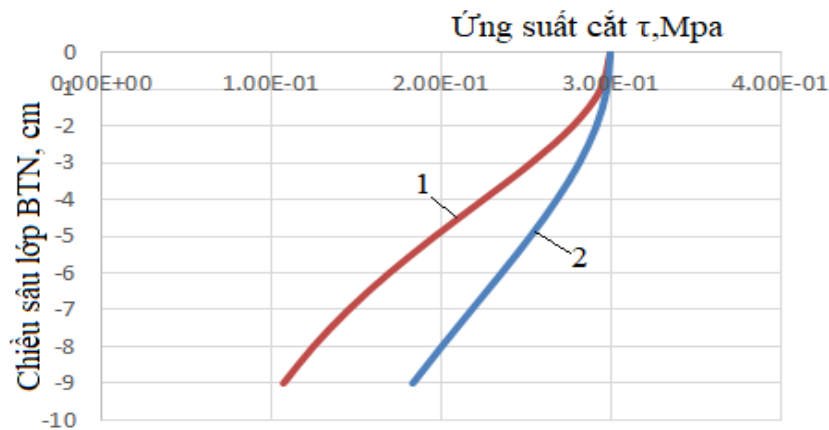
**Hình 4.6. Sự làm việc của lớp BTN tăng cường trên mặt đường BTXM chịu tải trọng bánh xe**

Để so sánh ảnh hưởng của cường độ lớp móng đến biến dạng LVBX, trong thí dụ tính toán cùng mức lưu lượng khai thác với hai trường hợp kết cấu có cấu tạo khác nhau: kết cấu tăng cường lớp BTN trên mặt đường BTXM hiện hữu (kết cấu 1) và kết cấu áo đường mềm thông thường (kết cấu 2). Kết cấu 1, mặt đường BTXM hiện hữu có lớp BTXM dày 23cm, trên lớp móng đá gia cố xi măng dày 20cm, trên lớp nền đường đầm chặt, có mô đun đàn hồi 45MPa, khai thác 2.000 trục xe ngày đêm, cần nâng cấp lên khai thác 3.000 trục xe / ngày đêm, mức tăng trưởng dự báo 7,5%. Dự kiến thảm lớp BTNC 12,5 dày 9cm. Kết cấu 2 là kết cấu đối chứng gồm lớp BTNC12,5 dày 9cm, trên lớp BTNC19 dày 12cm, lớp móng trên CPĐĐ loại 1 dày 50cm, trên lớp móng CPĐĐ loại 2 dày 60cm, trên lớp nền thượng K98, trên nền đất có mô đun đàn hồi 45Mpa (tương tự kết cấu áo đường cao tốc Hà Nội – Hải Phòng). Tính với trục xe 10T, áp suất bánh hơi 0,6MPa.



**Bảng 4.3: Ứng suất cắt theo chiều sâu lớp BTN phụ thuộc nhiệt độ**

Chiều sâu lớp BTN, cm	Nhiệt độ, °C	Ứng suất cắt ứng với các loại kết cấu, MPa	
		Kết cấu áo đường mềm	Kết cấu lớp BTN tăng cường
0	50	0,30	0,3
1	48,8	0,294	0,295
2	47,7	0,277	0,290
3	46,7	0,253	0,279
4	45,7	0,225	0,264
5	44,9	0,196	0,247
6	44,1	0,169	0,228
7	43,3	0,145	0,209
8	42,6	0,124	0,191
9	41,9	0,107	0,173



1 - Kết cấu áo đường mềm thông thường, 2 - Kết cấu tăng cường BTN/BTXM.

**Hình 4.7: Biểu đồ ứng suất cắt thay đổi theo chiều sâu trong lớp BTN**

Trên Bảng 4.3 và Hình 4.7 thể hiện sự thay đổi độ lớn ứng suất cắt ( $\tau_{tt}$ ) trong lớp BTN tính theo công thức (3.14), khi thay đổi giá trị mô đun đàn hồi chung lớp móng và nền dưới lớp BTN, xét cho trường hợp ADM thông thường và kết cấu lớp BTN tăng cường trên mặt đường BTXM hiện hữu của bài toán khảo sát (đều có lớp BTN phía trên dày 9cm). Xét cho trường hợp nhiệt độ lớp mặt BTN bằng 50°C.

Trên bảng 4.4 giới thiệu kết quả tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN theo công thức (3.19), tính được chiều sâu LVBX lớp BTN tăng cường trên

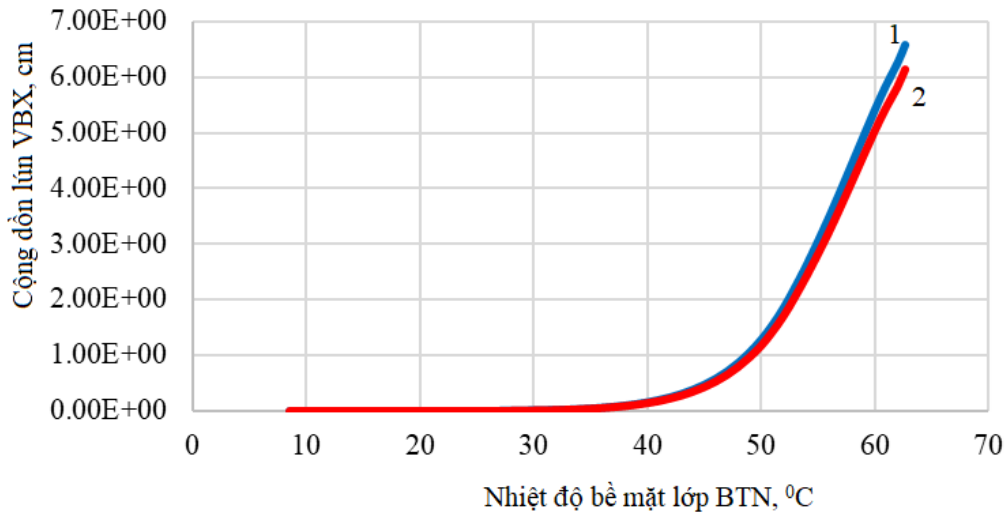
mặt đường BTXM hiện hữu và kết cấu áo đường mềm thông thường theo kết cấu loại 2. Kết quả tính tổng chiều sâu vệt lún trong suốt thời kỳ khai thác của 2 phương án cấu tạo thể hiện trên Bảng 4.4 và trên Hình 4.8.

**Bảng 4.4: Chiều sâu LVBX theo mức nhiệt độ bề mặt của 2 phương án cấu tạo**

Mức nhiệt độ bề mặt, °C	Tần suất nhiệt độ P(T)	Cộng dồn RD theo từng mức nhiệt độ, cm	
		Kết cấu tăng cường BTN/BTXM	Kết cấu BTN đối chứng
8,5	0,0036	1,57E-06	1,32E-06
9	0,0045	3,84E-06	3,23E-06
10	0,0063	8,07E-06	6,80E-06
11	0,0082	1,53E-05	1,29E-05
12	0,0100	2,71E-05	2,29E-05
13	0,0118	4,56E-05	3,87E-05
14	0,0136	7,40E-05	6,29E-05
15	0,0154	1,17E-04	9,94E-05
16	0,0172	1,80E-04	1,53E-04
17	0,0190	2,72E-04	2,33E-04
18	0,0208	4,05E-04	3,47E-04
19	0,0217	5,95E-04	5,05E-04
20	0,0217	8,35E-04	7,13E-04
21	0,0217	1,15E-03	9,87E-04
22	0,0217	1,56E-03	1,35E-03
23	0,0217	2,10E-03	1,82E-03
24	0,0217	2,80E-03	2,43E-03
25	0,02174	3,71E-03	3,23E-03
26	0,0217	4,89E-03	4,27E-03
27	0,0217	6,42E-03	5,62E-03
28	0,0217	8,35E-03	7,33E-03
29	0,0217	1,09E-02	9,57E-03
30	0,0217	1,41E-02	1,25E-02
31	0,0217	1,83E-02	1,62E-02
32	0,0217	2,36E-02	2,09E-02
33	0,0217	3,03E-02	2,69E-02

Mức nhiệt độ bề mặt, °C	Tần suất nhiệt độ P(T)	Cộng dồn RD theo từng mức nhiệt độ, cm	
		Kết cấu tăng cường BTN/BTXM	Kết cấu BTN đối chứng
34	0,0217	3,89E-02	3,46E-02
35	0,0217	4,96E-02	4,43E-02
36	0,0217	6,32E-02	5,65E-02
37	0,0217	8,01E-02	7,18E-02
38	0,0217	1,01E-01	9,10E-02
39	0,0217	1,28E-01	1,15E-01
40	0,0217	1,60E-01	1,45E-01
41	0,0217	2,01E-01	1,81E-01
42	0,0217	2,50E-01	2,26E-01
43	0,0217	3,11E-01	2,82E-01
44	0,0217	3,85E-01	3,49E-01
45	0,0217	4,74E-01	4,31E-01
46	0,0217	5,83E-01	5,30E-01
47	0,0217	7,13E-01	6,50E-01
48	0,0217	8,70E-01	7,94E-01
49	0,0217	1,06E+00	9,67E-01
50	0,0217	1,28E+00	1,17E+00
51	0,0217	1,55E+00	1,42E+00
52	0,0217	1,86E+00	1,71E+00
53	0,0208	2,23E+00	2,05E+00
54	0,0190	2,62E+00	2,42E+00
55	0,0172	3,05E+00	2,81E+00
56	0,0154	3,50E+00	3,22E+00
57	0,0136	3,96E+00	3,66E+00
58	0,0118	4,45E+00	4,11E+00
59	0,0100	4,93E+00	4,57E+00
60	0,0082	5,41E+00	5,02E+00
61	0,0063	5,86E+00	5,44E+00
62	0,0045	6,26E+00	5,81E+00
62,7	0,0036	6,6E+00	6,13E+00

Tổng chiều sâu LVBX kết cấu tăng cường RD=6,6cm, còn với kết cấu đối chứng RD=6,13cm.



1- Kết cấu tăng cường BTN/BTXM; 2- Kết cấu áo đường mềm thông thường.

#### Hình 4.8: Chiều sâu LVBX theo nhiệt bề mặt của 2 phương án cấu tạo

**Nhận xét:** Khác với kết cấu áo đường mềm thông thường, mặt đường BTXM hiện hữu ở kết cấu 1 có độ cứng kháng biến dạng lớn, có giá trị mô đun đàn hồi chung lớn, nên từ công thức tính ứng suất cắt theo công thức (3.14) sẽ cho mẫu số có giá trị nhỏ, đồng nghĩa với việc làm tăng giá trị ứng suất cắt. Mặt đường BTXM ít bị biến dạng, nên phản lực do lớp BTXM tác dụng ngược lên lớp đáy của lớp BTN có giá trị lớn. Do chịu áp lực nén từ bề mặt và từ đáy lớp BTN có giá trị lớn, nên ứng suất trong lớp BTN có giá trị lớn, làm tăng biến dạng trượt ngang của lớp BTN, làm gia tăng chiều sâu LVBX so với chiều sâu lún ở các kết cấu áo đường mềm thông thường. Trong thí dụ tính toán RD lớp BTN của kết cấu tăng cường tăng xấp xỉ 8,0% so với kết cấu áo đường mềm với cùng mức lưu lượng trục xe.

#### 4.2. Đề xuất áp dụng các giải pháp hạn chế LVBX lớp BTN trong điều kiện Việt Nam

Như đã nêu tại chương tổng quan, tình trạng hư hỏng LVBX hiện đang diễn ra khá phổ biến trên các tuyến giao thông ở Việt Nam, đặc biệt trên các tuyến đường cao tốc, tuyến quốc lộ, các trục đường chính có lưu lượng trục xe

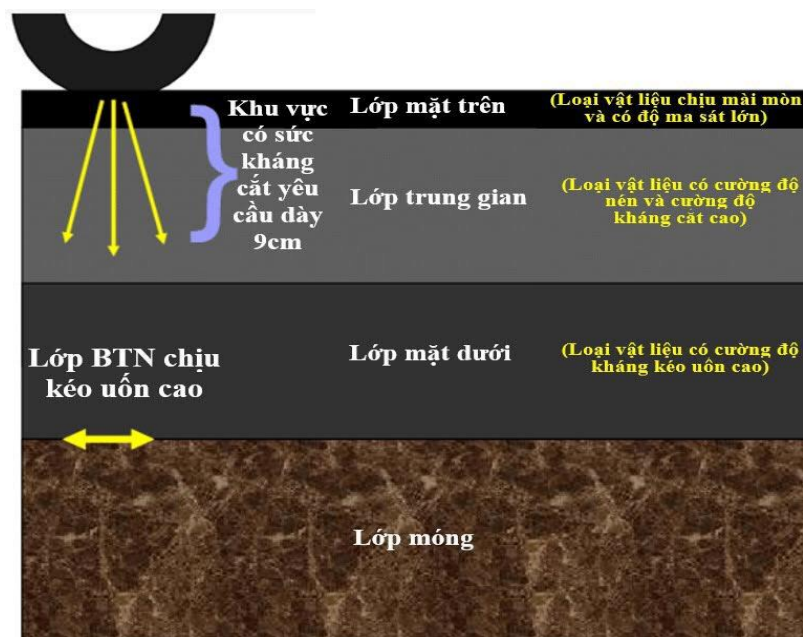
khai thác lớn. Dưới đây trình bày một số ý kiến về nguyên nhân và đề xuất các giải pháp hạn chế LVBX lớp BTN mặt đường.

#### 4.2.1 Giải pháp cấu tạo các lớp kết cấu áo đường

Trong trường hợp tính toán thiết kế mặt đường BTN nhiều lớp có chiều dày lớn, để đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo sơ đồ chịu lực của kết cấu áo đường theo Hình 1.2, lớp BTN trên cùng chủ yếu chịu ứng suất nén và ứng suất cắt trượt. Khi sử dụng lớp vật liệu BTN có hệ số nhớt thấp (hoặc có lực dính và hệ số nội ma sát nhỏ), ứng suất cắt do tải trọng gây ra khi lớn hơn cường độ kháng cắt của lớp BTN, sẽ xảy ra hiện tượng biến dạng LVBX.

Như vậy, để hạn chế xảy ra biến dạng LVBX trong điều kiện Việt nam, khi thiết kế cấu tạo kết cấu áo đường, lớp trên cùng cần được bố trí từ loại BTN có cường độ kháng hần lún cao (có hệ số nhớt cao hoặc có lực dính và hệ số nội ma sát lớn). chiều dày lớp BTN yêu cầu cần đạt 9cm như kết quả tính toán ở Chương 3. Lớp vật liệu BTN dưới đáy của tầng mặt, do chủ yếu chịu ứng suất kéo uốn do tải trọng gây ra, nên cần chọn loại BTN có cường độ kéo uốn cao để tăng sức kháng mỏi của lớp vật liệu, góp phần tăng tuổi thọ kết cấu áo đường (xem Hình 4.9).

Lớp móng lấy thông thường như cấu tạo hiện có.



Hình 4.9. Sơ đồ cấu tạo các lớp BTN áo đường

Từ phân tích trên cho thấy, lựa chọn giải pháp cấu tạo sử dụng hợp lý các lớp vật liệu theo đặc tính cường độ, góp phần làm giảm biến dạng LVBX, góp phần làm tăng tuổi thọ khai thác kết cấu áo đường.

#### ***4.2.2 Lựa chọn loại BTN có cường độ kháng hàn lún đáp ứng yêu cầu khai thác***

Như đã phân tích ở chương 2, đặc tính kháng biến dạng LVBX phụ thuộc hệ số nhót của BTN (độ nhót của nhựa bitum và thành phần cấp phối của cốt liệu). Vì vậy, khi sử dụng loại BTN có hệ số nhót thấp hoặc có lực dính và hệ số nội ma sát nhỏ, đều là nguyên nhân xảy ra biến dạng LVBX.

Ở Việt Nam đang sử dụng phổ biến 3 loại BTN: BTNC thông thường theo TCVN 8819:2011, BTNC thông thường theo TCVN 13567-1:2022 (phát triển từ QĐ 858/2014) và BTN polyme theo 22TCN 356-06 (nay là TCVN 13567-2:2022). Trong đó, hệ số nhót của BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011 đã được thí nghiệm xác định phụ thuộc nhiệt độ nêu ở Chương 2. Trong đó sử dụng nhựa bitum có độ kim lún 60/70, hàm lượng cốt liệu thô  $D \geq 4,75\text{mm}$  chiếm  $40 \div 50\%$ . Với loại nhựa bitum 60/70 có độ kim lún tương đối cao, và hàm lượng cốt liệu thô  $D \geq 4,75\text{mm}$  chiếm  $40 \div 50\%$  là tương đối thấp nên hỗn hợp BTN có hệ số nhót thấp.

Để tăng hệ số nhót của BTN, cần áp dụng các giải pháp làm tăng hệ số nhót của nhựa bitum hoặc giải pháp tăng lực dính và góc nội ma sát của BTN:

- Giải pháp tăng độ nhót của nhựa bitum: Sử dụng loại nhựa bitum có độ nhót quán cao (độ kim lún thấp 40/50 hoặc 50/60 thay vì 60/70 như đang sử dụng hiện nay), hoặc loại nhựa bitum PMBI, PMBII, PMBIII với nhiệt hóa mềm từ  $60 \div 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sử dụng các loại phụ gia làm tăng độ nhót, tăng khả năng chịu nhiệt của nhựa bitum. Ở Việt Nam hiện đang sử dụng phụ gia polyme thích hợp như phụ gia SBS (hàm lượng  $3 \div 6\%$ ) cho hiệu quả trong giảm LVBX. Cần nghiên cứu ứng dụng những loại phụ gia phù hợp điều kiện Việt Nam có khả năng làm tăng độ cứng của bi-tum, tăng khả năng làm việc ở nhiệt độ cao, bền lão hóa giúp giảm biến dạng LVBX. Ví dụ thí nghiệm trong phòng với BTNC12,5 sử dụng phụ gia Polyolefin HDPE hàm lượng 5% đã giảm 51% giá trị trung bình LVBX với mẫu đối chứng sử dụng bitum 60/70 thông thường, cần nghiên cứu bổ sung để ứng dụng trong thực tế.

- Giải pháp tăng hàm lượng cốt liệu thô: ở Việt Nam hiện đang quy định sử dụng BTN theo TCVN 13567-1:2022 (trước đây là QĐ 858/2014) có hàm lượng cốt liệu thô  $D \geq 4,75\text{mm}$  từ 50÷60%, trong đó tăng hàm lượng cốt liệu có kích cỡ lớn, do sử dụng hàm lượng cốt liệu thô cao và tăng hàm lượng hạt kích cỡ lớn, nên góp phần làm tăng khung cốt chịu lực, tăng cường độ nén của hỗn hợp, do vậy tăng được khả năng kháng hằn lún cho hỗn hợp BTN. Hiện nay trên thế giới, hỗn hợp Stone Mastic Asphalt với hàm lượng cốt liệu thô tới 70÷80%, sử dụng phụ gia cốt sợi phân tán được xem là hỗn hợp BTN có cường độ kháng hằn lún cao nhất [39,43]. Theo [10], đã thí nghiệm xác định hệ số nội ma sát của các loại BTN hiện có tại Việt Nam, cho thấy 2 loại BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011 và BTNP12,5 theo 22TCN 356-06 có hệ số nội ma sát  $tg\varphi = 0,81$ , với loại BTNC theo QĐ 858/2014 có hệ số nội ma sát  $tg\varphi = 0,91$ , còn với loại hỗn hợp Stone Mastic Asphalt có hệ số nội ma sát  $tg\varphi \geq 0,94$ . Hệ số nội ma sát tăng có tác dụng làm tăng giới hạn chảy dẻo của BTN, góp phần làm giảm ứng suất cắt trong miền biến dạng dẻo của hỗn hợp BTN (hệ số  $k_{\varphi}$  trong công thức (1.20), (1.31)), xem Bảng 4.5.

**Bảng 4.5: Quan hệ giữa hệ số nội ma sát  $tg\varphi$  với hệ số chiết giảm ứng suất cắt  $k_{\varphi}$**

Loại BTN	Hệ số nội ma sát $tg\varphi$	Hệ số chiết giảm ứng suất cắt, $k_{\varphi}$
BTNC12,5 theo TCVN 8819:2001	0,81	2,09
BTNP theo 22TCN 356-06	0,81	2,09
BTN theo QĐ 858/2014	0,91	2,26
Hỗn hợp Stone Mastic Asphalt	0,94	2,31

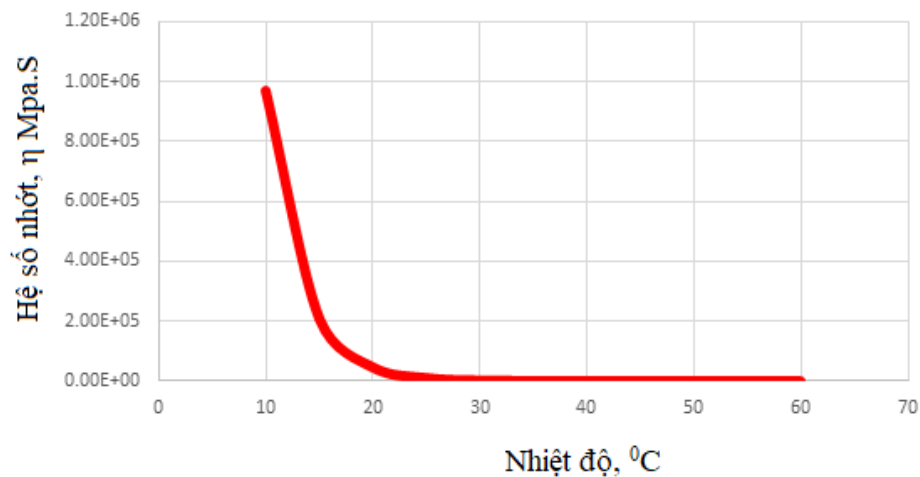
#### **4.2.3 Quản lý khai thác liên quan đến điều kiện khí hậu nắng nóng của Việt Nam**

Việt Nam nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới, có nhiệt độ không khí và lượng bức xạ mặt trời cao, nên vào những ngày hè nắng nóng, bề mặt lớp BTN mặt đường hấp thụ lượng nhiệt rất lớn. Khu vực miền Bắc, đại diện là khu vực TP. Hà Nội, nhiệt độ bề mặt theo [8] có thể đạt  $65 \div 66^{\circ}\text{C}$ . BTN là vật liệu có chất kết dính là nhựa bitum, ở mức nhiệt độ cao như vậy, nhựa

bitum bị hóa mềm, làm suy giảm đặc tính nhớt, dẫn đến làm suy giảm hệ số nhớt, giảm khả năng kháng biến dạng lún của BTN. Trong Bảng 4.6 và Hình 4.10 thể hiện quan hệ giữa đại lượng hệ số nhớt phụ thuộc nhiệt độ của loại BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011 được xây dựng trên cơ sở số liệu tính toán theo công thức (2.25).

**Bảng 4.6: Quan hệ giữa hệ số nhớt với nhiệt độ, của BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011**

Mức nhiệt độ bề mặt, T <sup>0</sup> C	Hệ số nhớt $\eta$ , MPa.s
10	9,7E+05
15	2,1E+05
20	4,7E+04
25	1,1E+04
30	2,8E+03
35	7,7E+02
40	2,4E+02
45	8,1E+01
50	3,1E+01
55	1,2E+01
60	4,7E+00



**Hình 4.10: Quan hệ giữa hệ số nhớt với nhiệt độ**



Từ số liệu Bảng 4.6 và Hình 4.10 cho thấy, ở các mức nhiệt độ cao từ  $50^{\circ}\text{C}$  trở lên, giá trị hệ số nhớt nhỏ làm tăng nhanh tổng mức RD so với các mức nhiệt độ thấp hơn. Nhiệt độ bề mặt lớp BTN tại Việt Nam thay đổi phụ thuộc từng vùng, từng địa phương. Tính toán theo công thức (2.15) nhận được khu vực miền Bắc, đại diện TP. Hà Nội có mức nhiệt bề mặt lớp BTN lớn nhất là  $62,5^{\circ}\text{C}$ , khu vực miền Trung, đại diện TP. Đà Nẵng có mức nhiệt bề mặt lớp BTN là  $63,5^{\circ}\text{C}$  và khu vực miền Nam, đại diện TP Hồ Chí Minh có mức nhiệt bề mặt lớp BTN là  $61^{\circ}\text{C}$ . Với mức nhiệt độ cao như vậy, đã làm suy giảm đáng kể độ lớn hệ số nhớt của BTN, dẫn đến lớp BTN bị biến dạng không hồi phục, gây LVBX cho lớp BTN mặt đường. Theo kết quả nghiên cứu trong [45], biến dạng LVBX chủ yếu chỉ xảy ra khi nhiệt độ lớp BTN đạt từ  $40^{\circ}\text{C}$  trở lên, khi nhiệt độ từ  $30 \div 40^{\circ}\text{C}$ , LVBX xảy ra là không đáng kể.

Theo [65,69,78,81], để khắc phục tình trạng biến dạng LVBX xảy ra vào những ngày nắng nóng, tại vùng khí hậu nắng nóng (vùng khí hậu IV của Nga) mức nhiệt bề mặt lớp BTN có thể đạt tới  $60 \div 62^{\circ}\text{C}$  đã quy định hạn chế phương tiện có tải trọng trục 11,5T và 13T lưu hành vào các giờ từ 12h00 đến 15h00.

Trong điều kiện khí hậu Việt Nam, nhiệt độ bề mặt lớp BTN vào những ngày nắng nóng theo [8] có thể đạt  $65 \div 66^{\circ}\text{C}$ . Với điều kiện thực tế như vậy, kiến nghị nên có các giải pháp hạn chế các loại phương tiện có tải trọng trục lớn trên các tuyến đường vào các giờ nắng nóng từ 12h00 ÷ 15h00, tránh gây ra hư hỏng LVBX lớp BTN.

#### ***4.2.4 Áp dụng quy định kiểm soát tải trọng trục các phương tiện***

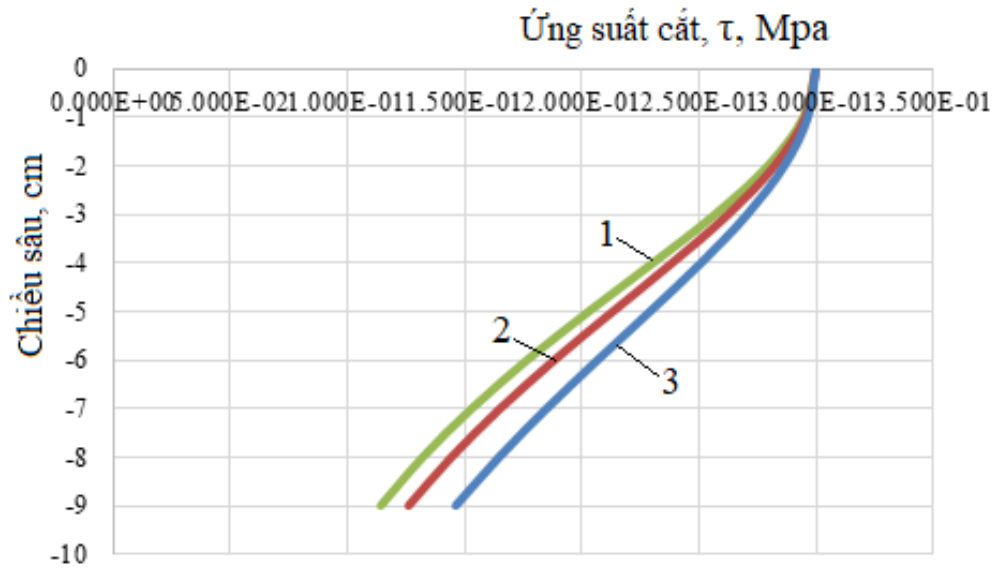
Hiện tượng các phương tiện giao thông tăng tải trọng trục xe khi lưu hành trên đường xảy ra khá phổ biến trên các tuyến cao tốc, quốc lộ và tỉnh lộ ở Việt Nam những năm gần đây, đây là nguyên nhân chính gây ra các hư hỏng kết cấu mặt đường, gia tăng hư hỏng LVBX. Ứng suất cắt gây biến dạng dẻo theo công thức (1.20).

Từ công thức (1.20) cho thấy: khi tăng tải trọng trục xe, đường kính vệt bánh quy đổi  $D$  sẽ tăng, dẫn đến làm giảm giá trị mẫu số trong công thức

(1.20), từ đó gia tăng trị số ứng suất cắt ( $\tau_z$ ) gây biến dạng không hồi phục trong lớp BTN, làm tăng chiều sâu LVBX. Bảng 4.7 thể hiện kết quả thí dụ tính toán tăng tải trọng trực lên 150% và 200%, với giả thiết áp lực bánh hơi không đổi, tương đương làm tăng đường kính vệt bánh xe quy đổi lên 1,22 và 1,41 lần so với đường kính bánh xe thực tiêu chuẩn, làm tăng ứng suất cắt gây biến dạng hằn lún lớp BTN. Tính ở mức nhiệt bề mặt lớp BTN là 50<sup>0</sup>C.

**Bảng 4.7: Quan hệ ứng suất cắt với trực tải trọng**

Chiều sâu lớp BTN	Ứng suất cắt ở các mức tải trọng trực xe, $\tau$ MPa		
	trực tiêu chuẩn	tăng 150%	tăng 200%
0	3,000E-01	3,000E-01	0,3
1	2,947E-01	2,955E-01	0,296569
2	2,796E-01	2,824E-01	0,286498
3	2,572E-01	2,626E-01	0,270821
4	2,306E-01	2,386E-01	0,251125
5	2,032E-01	2,132E-01	0,229356
6	1,771E-01	1,882E-01	0,207006
7	1,533E-01	1,650E-01	0,18532
8	1,325E-01	1,441E-01	0,165017
9	1,146E-01	1,259E-01	0,146623



1- trục tiêu chuẩn; 2- vượt tải trọng 150%; 3- vượt tải trọng 200%.

**Hình 4.11: Biểu đồ quan hệ ứng suất cắt với trục tải trọng,  $\tau$  MPa**

Kết quả tính toán chiều sâu LVBX ứng với các mức tăng tải trọng trục xe khai thác 150% và 200% so với trục tiêu chuẩn. Thí dụ tính cho kết cấu tương tự bài toán ở mục 3.3.1.1, lưu lượng trục xe khai thác 3000 trục/ lần/ ngày đêm:

**Bảng 4.8: Mức tăng tải trọng làm tăng chiều sâu LVBX**

Chiều sâu LVBX	Mức tăng tải trọng		
	Trục tiêu chuẩn	Mức tăng 150%	Mức tăng 200%
RD,cm	6,65	7,51	8,16
Tăng %	-	13%	23%

Nhận xét: Kết quả tính toán trên Hình 4.11 và Bảng 4.8 cho thấy, khi tăng tải trọng trục xe làm tăng đường kính vệt bánh xe quy đổi, tính theo công thức (1.20) làm tăng đáng kể ứng suất cắt theo chiều sâu lớp BTN, tính theo công thức (2.10) làm tăng thời gian tác dụng của tải trọng, dẫn đến làm gia tăng chiều sâu LVBX. Tăng tải trọng lên 150% so với trục tiêu chuẩn làm tăng 13% tổng chiều sâu LVBX, tăng 200% tải trọng làm tăng tới 23% tổng chiều sâu LVBX.

Giải pháp kiểm soát tải trọng trục phương tiện theo thông tư 06/2017/TT-BGTVT về xử phạt vi phạm hành chính trong lĩnh vực giao thông đường bộ trong điều kiện khí hậu nắng nóng của Việt Nam là rất cần thiết, góp phần hạn chế tối đa hư hỏng LVBX.

#### **4.2.5 Tăng cường quản lý chất lượng thi công lớp BTN mặt đường**

Hiện nay qua khai thác các tuyến đường sau khi thi công, đã có tình trạng xuất hiện hư hỏng sớm LVBX ngay thời gian đầu mới đưa vào khai thác, thậm chí trên cùng dự án nhưng có nhiều nhà thầu cùng tham gia thi công xuất hiện tình trạng có đoạn tuyến không xảy ra hiện tượng LVBX hoặc mức độ LVBX nhỏ, trên đoạn tuyến khác do nhà thầu khác thi công lại xảy ra hư hỏng LVBX với mức độ cao. Ví dụ như trên dự án Mở rộng QL.1 từ Thanh Hóa đến Quảng Bình, sau khi đưa vào khai thác sử dụng chưa đến 1 năm, tháng 6/2015 đã xuất hiện hiện tượng LVBX cao trên 2,5cm, các đoạn này có chiều dài từ 0,35km đến 8,86 km.

Nguyên nhân dẫn đến tình trạng hư hỏng LVBX sớm như nêu trên có thể do các lý do sau:

##### **4.2.5.1 Tại trạm trộn**

- Các hạt cốt liệu không đảm bảo độ sạch, làm giảm lực dính bám giữa các hạt, dẫn đến làm suy giảm lực dính bám giữa các hạt, làm giảm khả năng kháng cắt trượt của hỗn hợp;

- Khâu cân đong cốt liệu không đảm bảo hàm lượng các thành phần hạt cấp phối theo đúng quy định, sẽ gây ra độ rỗng dư cốt liệu lớn, gây suy giảm cường độ của hỗn hợp, trong đó có cường độ kháng cắt trượt của BTN;

- Thành phần cốt liệu thô thấp hơn quy định sẽ ảnh hưởng đến sự hình thành khung cốt chịu lực của hỗn hợp, làm giảm cường độ nén của hỗn hợp, dẫn đến giảm hệ số nhót của hỗn hợp (theo công thức (2.20), chương 2),

##### **4.2.5.2 Tại hiện trường thi công:**

Hiện tượng lu lèn không đảm bảo độ chặt theo yêu cầu, khi đưa vào khai thác phương tiện lưu thông sẽ gây ra tái lu lèn lún thứ cấp, làm xuất hiện LVBX trên mặt đường.

Để tránh biến dạng LVBX xảy ra sớm như nêu trên, đề nghị các chủ đầu tư, tư vấn giám sát cần có biện pháp quản lý chất lượng chặt chẽ hơn nữa ở tất cả các công đoạn, từ khâu sản xuất chế tạo hỗn hợp tại trạm trộn đến chất lượng thi công lớp BTN ngoài hiện trường.

#### ***4.2.6 Kiến nghị áp dụng quy định tính toán chiều sâu LVBX trong tính toán thiết kế kết cấu áo đường có sử dụng lớp BTN***

Trong quy trình tính toán thiết kế áo đường mềm ở Việt Nam hiện nay [6] chưa có quy định kiểm toán chỉ tiêu biến dạng hằn lún lớp BTN, nên trong các hồ sơ thiết kế các dự án, tư vấn thiết kế chưa có bước tính toán lựa chọn loại BTN có cường độ kháng LVBX phù hợp với yêu cầu khai thác.

Từ các kết quả nghiên cứu nêu trên cho thấy, ứng xử của lớp BTN dưới tác dụng của tải trọng trục xe cần kiểm toán theo các chỉ tiêu: lún kết cấu mặt đường (thông qua đại lượng mô đun đàn hồi chung kết cấu), nứt mỏi lớp BTN do trùng phục tải trọng (thông qua cường độ kéo uốn BTN) và biến dạng LVBX (thông qua tham số hệ số nhót hoặc tham số lực dính, góc nội ma sát của hỗn hợp BTN, tùy theo phương pháp tính toán) là hoàn toàn khác nhau. Trong quy trình thiết kế áo đường mềm TCCS 38:2022/TCĐBVN đã đưa ra các quy định kiểm toán chỉ tiêu độ võng mặt đường và chỉ tiêu ứng suất kéo uốn trong lớp BTN. Để giảm độ lún kết cấu mặt đường hoặc giảm ứng suất kéo uốn lớp BTN chỉ cần tăng chiều dày lớp BTN, tuy nhiên với chỉ tiêu LVBX, do ứng suất cắt có độ lớn ngay trên bề mặt lớp BTN, nên việc tăng chiều dày lớp BTN sẽ không có ý nghĩa, mà cần chọn loại BTN có cường độ kháng cắt cao, phù hợp với loại trục xe và lưu lượng trục xe khai thác.

Vì vậy, để hạn chế xảy ra hư hỏng biến dạng LVBX lớp BTN mặt đường, trong quy trình thiết kế kết cấu áo đường mềm của Việt Nam cần bổ sung thêm chỉ tiêu bắt buộc kiểm toán chiều sâu LVBX không vượt quá giới hạn cho phép, làm cơ sở tính toán lựa chọn loại BTN có cường độ kháng hằn lún phù hợp ngay từ bước thiết kế dự án, tương tự các quy định của các nước trên thế giới trong tính toán thiết kế kết cấu áo đường mềm hiện nay.

Có thể áp dụng phương pháp tính toán nêu trong chương 3, theo công thức (3.19).

**Các bước tính toán:**

Tương tự mục 3.2.1.2, thực hiện như sau:

**Bước 1:** Tính toán nhiệt độ tính toán lớn nhất và nhỏ nhất tại bề mặt lớp BTN

Tính toán lớn nhất trên bề mặt  $T_{\max}$  theo (2.15), nhiệt độ thấp nhất tính theo (2.16).

**Bước 2:** Tính toán nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN.

Tính toán nhiệt độ theo chiều sâu lớp BTN theo (2.17).

**Bước 3:** Tính toán độ lớn mô đun đàn hồi thay đổi theo nhiệt độ và thời gian tác dụng của tải trọng

Để tính toán ứng suất cắt, cần biết độ lớn mô đun đàn hồi động phụ thuộc nhiệt độ và thời gian tác dụng của tải trọng.

**Mô đun đàn hồi theo chiều sâu phụ thuộc nhiệt độ:**

Mô đun đàn hồi động của BTN, với thời gian tác dụng của tải trọng  $t=0,1s$ , phụ thuộc mức nhiệt độ  $T^{\circ}C$ , được xác định theo công thức (2.13).

**Mô đun đàn hồi động phụ thuộc thời gian tác dụng của tải trọng:**

Thời gian tác dụng tính toán tính theo (2.10). Áp dụng tính mô đun đàn hồi theo công thức (2.11) để tính được mô đun đàn hồi động phụ thuộc thời gian tác dụng của tải trọng.

**Bước 4:** Tổng lưu lượng trục xe tính toán N

Được xác định theo công thức (3.11). Hệ số xác suất trùng phục vết bánh qua 1 điểm, theo [66,88] lấy  $k_p=0,7$ . Tổng thời gian tác dụng của tải trọng theo (3.12).

**Bước 5:** Tính toán theo công thức đề xuất

1) Xác định mô đun đàn hồi chung lớp móng và nền dưới lớp BTN, làm căn cứ tính toán ứng suất cắt thay đổi theo chiều sâu lớp BTN trong công thức (1.20).

2) Tính tích phân xác định chiều sâu LVBX lớp BTN tại mỗi mức nhiệt độ bề mặt, là hàm tích phân theo chiều sâu  $h$  (biểu thức trong ngoặc vuông

trong công thức (3.19), theo chiều sâu từ bề mặt đến chiều sâu  $h$ , kí hiệu  $A_z$ , theo công thức (3.20):

$$A_z = \int_0^h \frac{\tau_z}{\eta_z} dz = \int_0^h \frac{q}{2 \cdot \eta_z \left[ 1 + \sqrt{2\pi} \left( \frac{z}{D} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{BTN}}{E_{ch,m}}} \right)^2 \cdot \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \right]} dz,$$

Các kí hiệu khác như đã nêu trên.

Tích phân (3.20) được xác định bằng phương pháp tích phân số, chia lớp BTN trong miền biến dạng có chiều sâu  $h$  thành các phân lớp, trong tính toán lấy phân lớp  $\Delta z = 1\text{cm}$ , theo công thức (3.21):

$$A_z = \sum_{i=1}^n \frac{q}{2 \cdot \eta_{z,i} \left[ 1 + \sqrt{2\pi} \left( \frac{z_i}{D} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{BTN}}{E_{ch,m}}} \right)^2 \cdot \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \right]} \cdot \Delta z_i$$

4) Tính biến dạng hần lún do tổng số trục xe khai thác gây ra theo (3.19), theo từng mức nhiệt độ từ  $T_{\min}$  đến  $T_{\max}$ , có xét xác suất phân bố từng mức nhiệt độ  $P(T)$  theo (3.16) ÷ (3.18). Hàm tích phân phân bố mức nhiệt độ  $P(T)$  được tính theo phương pháp tích phân số, với bước nhiệt độ  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ , theo công thức (3.22):

$$\begin{aligned} RD &= 1,5 \cdot k \cdot N \cdot t_p \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\sqrt{N \cdot t_p}}{N \cdot t_p}} \right) \cdot \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} \left\{ P(T) \cdot \left( \int_0^h \frac{\tau_z}{\eta_z} dz \right) \right\} \cdot dT = \\ &= 1,5 \cdot k \cdot N \cdot t_p \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\sqrt{N \cdot t_p}}{N \cdot t_p}} \right) \cdot \sum_{T_{\min}}^{T_{\max}} [P(T_i) A_z(T)] \cdot \Delta T. \end{aligned}$$

**Bước 6:** So sánh kết quả tính chiều sâu LVBX theo công thức (3.22) nêu trên với chiều sâu LVBX cho phép theo quy định. Nếu không thỏa mãn, cần thay đổi chọn loại BTN khác có hệ số nhớt cao hơn. Các bước tính toán tương tự nêu trên.

Để sử dụng công thức (3.19) trong tính toán chiều sâu LVBX trong điều kiện Việt nam, cần tiến hành nghiên cứu thí nghiệm xác định hệ số nhớt

của các loại BTN hiện có tại Việt Nam, tiến hành lựa chọn phương pháp thí nghiệm xác định hệ số nhót cho phù hợp với điều kiện Việt Nam.

#### **4.3.Kết luận chương 4**

Đã áp dụng phương pháp tính chiều sâu vệt lún lớp BTN đề xuất ở chương 3 để khảo sát lượng hóa chiều sâu LVBX trong lớp BTN cho các loại kết cấu khác nhau trên một số tuyến đường thực tế đang khai thác ở Việt Nam. Kết quả tính toán so sánh cho thấy, chiều sâu LVBX theo tính toán lý thuyết theo công thức (3.19) có giá trị tương tự với kết quả khảo sát hiện trường từ 2 dự án cho thấy, sự sai lệch không quá 6,2%.

Từ kết quả khảo sát cho thấy, ngoài yếu tố nhiệt độ ảnh hưởng đến chiều sâu lún, việc tăng trục xe quá tải cũng làm tăng chiều sâu LVBX lớp BTN mặt đường.

Đã nghiên cứu kiến nghị các giải pháp nhằm hạn chế phát triển chiều sâu LVBX lớp BTN trong điều kiện Việt Nam.



## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### 1. Những kết quả chính và đóng góp mới của luận án

1. Bước đầu đã nghiên cứu đề xuất phương pháp tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN mặt đường trên làn xe chạy theo phương pháp lý thuyết dựa trên nguyên lý cơ học môi trường liên tục. Phương pháp tính làm cơ sở để tính toán thiết kế lựa chọn loại BTN có cường độ kháng cắt phù hợp, đáp ứng yêu cầu khai thác của mặt đường, hạn chế xảy ra biến dạng lún lớp BTN của kết cấu áo đường, phù hợp với điều kiện Việt Nam, tính chiều sâu LVBX trên làn xe chạy theo công thức (3.19). Phương pháp tính cho phép:

- Xét được tổng lưu lượng trục xe với biến động nhiệt độ từ thấp nhất  $T_{\min}$  đến cao nhất  $T_{\max}$  trong suốt thời kỳ khai thác trong điều kiện khí hậu các vùng miền của Việt Nam;

- Tính được chiều sâu LVBX lớp BTN trong kết cấu áo đường với loại BTN bất kỳ hiện có của Việt Nam, thông qua hệ số nhót của BTN được xác định bằng thí nghiệm mẫu;

- Xét được mô đun đàn hồi BTN, độ lớn ứng suất cắt và độ lớn hệ số nhót thay đổi theo chiều sâu lớp BTN do nhiệt độ trong lớp BTN thay đổi;

- Tính toán được chiều sâu hần lún lớp BTN cho các loại kết cấu áo đường khác nhau, thông qua chiều dày và cường độ của các vật liệu móng và lớp nền tự nhiên;

2. Đã tính toán xác định được chiều sâu vùng biến dạng dẻo tính toán lớp BTN mặt đường ( $h_d$ ) bằng 9cm trong điều kiện khai thác và điều kiện khí hậu của Việt nam, phục vụ lựa chọn chiều dày lớp BTN bề mặt có cường độ kháng cắt phù hợp với yêu cầu khai thác của mặt đường thiết kế và phục vụ tính toán chiều sâu LVBX lớp BTN mặt đường theo công thức đề xuất.

3. Đã nghiên cứu thí nghiệm xác định hệ số nhót của hỗn hợp BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011, phụ thuộc nhiệt độ, phục vụ tính toán dự báo chiều sâu LVBX lớp BTN trong kết cấu áo đường.

4. Đã nghiên cứu và đề xuất các kiến nghị, một số giải pháp góp phần giảm thiểu biến dạng LVBX lớp BTN trên mặt đường trong điều kiện Việt Nam.

## **2. Những tồn tại hạn chế của kết quả nghiên cứu**

Do điều kiện hạn chế, mới chỉ thực hiện thí nghiệm xác định hệ số nhớt của loại BTNC12,5 theo TCVN 8819:2011.

Mới chỉ xét biến dạng LVBX của lớp BTN, chưa xem xét biến dạng LVBX lớp móng và lớp nền tự nhiên.

## **3. Kiến nghị những nghiên cứu tiếp theo**

Đây chỉ là kết quả nghiên cứu đề xuất bước đầu, để áp dụng được trong điều kiện Việt Nam cần nghiên cứu lựa chọn xây dựng quy trình thí nghiệm mẫu, xác định hệ số nhớt của BTN trong điều kiện Việt Nam. Tiến hành nghiên cứu thí nghiệm mẫu, xác định hệ số nhớt của các loại BTN còn lại như BTN thông thường theo TCVN 13567-1:2022, BTN polyme theo TCVN 13567-2:2022 để phục vụ tính toán chiều sâu LVBX cho các loại mặt đường sử dụng các loại BTN khác nhau.

Tiến hành thử nghiệm đo đặc hiện trường, xác định chiều sâu LVBX trên một số tuyến đường thực tế, so sánh với tính toán theo phương pháp đề xuất để đánh giá độ tin cậy của phương pháp.

## DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

1. Lê Thanh Hải, Vũ Trung Hiếu, Phạm Cao Thăng, Nguyễn Hoàng Long (2017), “Xác định nguyên nhân và kiến nghị giải pháp sử dụng vật liệu khắc phục biến dạng không hồi phục và xô trượt lớp bê tông asphalt mặt đường trong điều kiện Việt Nam”, *Tạp chí Giao thông vận tải, Số đặc biệt - Hội thảo nhà khoa học trẻ ngành Giao thông vận tải năm 2016*, trang 97-101.
2. Vũ Trung Hiếu, Phạm Cao Thăng (2017), “Tính toán biến dạng hằn lún và đánh giá ảnh hưởng của yếu tố nhiệt độ đến độ ổn định cắt trượt lớp bê tông nhựa mặt đường trong điều kiện Việt Nam”, *Tạp chí Cầu đường Việt Nam số 9/2017*, trang 41-45;
3. Vũ Trung Hiếu, Phạm Cao Thăng (2017), “Nghiên cứu tính toán xác định chiều sâu vùng biến dạng dẻo lớp bê tông nhựa trong kết cấu mặt đường ô tô”, *Tạp chí Giao thông vận tải số 12/2017*, trang 90-93.
4. Phạm Cao Thăng, Nguyễn Hoàng Long, Trần Nam Hưng, Vũ Trung Hiếu (2018) “A Study On Calculation of Rutting Depth of Pavement Asphalt Concrete Layer In Under Vietnam Conditions”, *International Journal of Applied Engineering Research, Volume 13, Number 7*, pp.5452-5457;
5. Vũ Trung Hiếu, Lê Thanh Hải, Phạm Cao Thăng (2018), “Nghiên cứu xác định nguyên nhân xuất hiện vết hằn lún lớp bê tông nhựa trên mặt đường sân bay Việt Nam và kiến nghị giải pháp khắc phục”, *Tạp chí Giao thông vận tải số 12/2018*, trang 56-60.
6. Trần Ngọc Hưng, Vũ Thế Thuần, Vũ Trung Hiếu (2019), “Nghiên cứu sử dụng polyolefin cải thiện chất lượng bi-tum và bê tông asphalt nâng cao khả năng kháng hằn LVBX”, *Tạp chí Giao thông vận tải số 9/2021*, trang 58-63.
7. Vũ Trung Hiếu, Phạm Cao Thăng, Nguyễn Quang Phúc (2021), “Nghiên cứu xác định hệ số nhớt của Bê tông nhựa trong điều kiện Việt Nam”, *Tạp chí Giao thông vận tải số 4/2021*, trang 42-45.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### A. TIẾNG VIỆT

[1] Bộ Giao thông vận tải (2014), *Hướng dẫn áp dụng hệ thống các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành nhằm tăng cường quản lý chất lượng thiết kế và thi công mặt đường bê tông nhựa nóng đối với các tuyến đường ô tô có quy mô giao thông lớn*, Quyết định số 858/QĐ-BGTVT ngày 26/3/2014, Việt Nam.

[2] Bộ Giao thông vận tải (2014), *Ban hành quy định kỹ thuật về phương pháp thử độ sâu vết hằn bánh xe của bê tông nhựa xác định bằng thiết bị wheel tracking*, Quyết định số 1617/QĐ-BGTVT ngày 29/4/2014, Việt Nam.

[3] Bộ Giao thông vận tải (2017), *Quy định quy trình sử dụng phương tiện, thiết bị kỹ thuật nghiệp vụ và sử dụng kết quả thu được từ phương tiện, thiết bị kỹ thuật nghiệp vụ làm căn cứ để xác định vi phạm hành chính và xử phạt vi phạm hành chính trong lĩnh vực giao thông đường bộ*, Thông tư 06/2017/TT-BGTVT ngày 28/02/2017, Việt Nam.

[4] Bộ Khoa học công nghệ (2011), *TCVN 8819 : 2011 - Mặt đường bê tông nhựa nóng - yêu cầu thi công và nghiệm thu*. Tiêu chuẩn Việt Nam.

[5] Bộ Khoa học công nghệ (2022) – *TCVN 13567:2022 – Lớp mặt đường bằng hỗn hợp nhựa nóng – Thi công và nghiệm thu*. Tiêu chuẩn Việt Nam.

[6] Tổng cục đường bộ Việt Nam (2022), *TCCS 38:2022/TCĐBVN - Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế*, Tiêu chuẩn cơ sở ngành GTVT, Việt Nam.

[7] Đào Huy Bích (2004), *Lý thuyết dẻo và các ứng dụng*, NXB Xây dựng, Hà Nội - Việt Nam.

[8] Vũ Đức Chính (2015), *Nghiên cứu phân loại nhựa đường theo superpave (nhựa đường PG) và đề xuất áp dụng trong xây dựng đường bộ Việt Nam*, Đề tài NCKH mã số DT154015 cấp Bộ GTVT, Hà Nội.

[9] Phan Nguyên Di, Nguyễn Thế Hùng (1995), *Cơ học môi trường liên tục*, NXB Giáo dục, Hà Nội.

[10] Lê Thanh Hải (2020), *Nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu Stone Mastic Asphalt đến khả năng chống LVBX và chống nứt mặt đường bê tông asphalt trong điều kiện Việt Nam*, Luận án TSKT, Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội.

[11] Trần Ngọc Hưng, Lê Thanh Hải, Vũ Thế Thuận (2017), “Nghiên cứu phương pháp thử nghiệm và ảnh hưởng của một số yếu tố đến góc nội ma sát và lực dính của bê tông asphalt BTNC12.5”, *Tạp chí Giao thông vận tải* tháng 12 năm 2017, trang 54-60.

[12] Ngô Lâm, Bùi Phú Doanh, Hoàng Tùng, Khuông Hoàng Dương (2017), *Bước đầu nghiên cứu và đánh giá sức chống cắt trượt của BTNC12,5 đang dùng ở Việt Nam theo tiêu chuẩn thí nghiệm và thiết kế hỗn hợp của CHLB Nga*, *Tạp chí Giao thông vận tải* tháng 7 năm 2017, trang 51-55.

[13] Ngô Ngọc Quý (2021), *Nghiên cứu quan hệ giữa cường độ chống cắt và đặc tính biến dạng không hồi phục của hỗn hợp bê tông asphalt mặt đường*, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Trường Đại học GTVT, Hà Nội.

[14] Phạm Cao Thăng (2014), *Tính toán thiết kế các kết cấu mặt đường*, NXB Xây dựng, Hà Nội.

[15] Trường Đại học GTVT (2014), *Một số giải pháp tăng cường khả năng chống vệt hằn lún bánh xe cho bê tông nhựa*, Kỷ yếu hội thảo, Hà Nội.

## **B. TIẾNG ANH**

[16] Vũ Đức Chính, Bùi Ngọc Hưng (2013), *The rutting situation on the asphalt pavements of Vietnam*, Tokyo.

[17] Harold L. Von Quintus, Jagannath Mallela, Ramon Bonaquist, Charles W. Schwartz, Regis L. Carvalho (2012), *Calibration of rutting models for structural and mix design, Appendix A. Proposed Addendum to AASHTO Publication MEPDG-1: Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice*. NCHRP Report 719, National Academy of Sciences, Washington, DC.

[18] Y. Richard Kim, B. Underwood, M. Sakhaei Far, N. Jackson, and J. Puccinelli (2011), *LTPP Computed Parameter: Dynamic Modulus*, Report No FHWA-HRT-10-035, Federal Highway Administration, Washington, DC.

[19] T. F. Fwa; S. A. Tan; and L. Y. Zhu (2004), “Rutting Prediction of Asphalt Pavement Layer Using C- $\phi$  Model”. *Journal of Transportation Engineering* 130 (5), pp. 675-683.

[20] Rajib B. Mallick and Tahar El- Korchi (2013), *Pavement engineering- Principles and Practice*. Taylor & Francis Group.

[21] Natalia Afanasieva, Mario Álvarez and Mónica J. Ortiz (2002), *Rheological characterization of aged asphalts*, C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro 2 (3).

[22] ASTM D6433-07 (2007), *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*.

[23] Huang, Y. H. (2004), *Pavement analysis and design, Second edition*, Pearson Education, Inc.

[24] Zhang Qi-sen, Chen Yu-liang, Li Xue-lian (2009), *Rutting in Asphalt Pavement under Heavy Load and High Temperature*. GeoHunan International Conference, Hunan, China.

[25] Gerardo W. Flintsch, Ph.D., P.E., Imad L. Al-Qadi, Ph.D., P.E., Amara Loulizi, Ph.D., P.E., and David Mokarem, Ph.D (2005) - *Report No. VTRC 05-CR 22, Laboratory Tests for Hot-Mix Asphalt Characterization in Vigrina* -P.56.

[26] Clyne, T. R., Li, X., Marasteanu, M. O., & Skok, E. L. (2003), *Dynamic and resilient modulus of Mn/DOT asphalt mixtures (No. MN/RC-2003-09)*, University of Minnesota, USA.

[27] AASHTO (1993), *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

[28] Schwartz, C.W., Carvalho, R.L., (2007), *Implementation of the NCHRP 1-37A Design Guide, Volume 2: Evaluation of mechanistic-empirical design procedure*, Final Rep. to Maryland State Highway Administration

[29] Riaz Ahmad, Jose R. Menendez, and Nima Kargah-Ostadi (2017), *FHWA-HRT-17-010, Long – Term Pavement Performance Bind Online User Guide*. Federal Highway Administration.

[30] Asphalt Institute (1997), *Superpave Performance Graded Asphalt Binder specification and Testing* - Asphalt Institute Superpave.

[31] Forschungsgesellschaft für strassen - und verkehrswesen (2009) *Richlinien Fuer De Rechnerische Dimensionierung Des Oberbaus Von verkehrsflaechen Mit Asphaltdeckschicht (RDO – Asphalt 09)*, Deutschland.

[32] Warren Robertson (1997), *Determining the Winter Design Temperature for Asphalt Pavements*, Research and Development Council Transportation Association of Canada, Canada.

[33] Luis Picado –Santos, Silvino, Jorge C. Pais (2003), *Stiffness Modulus and Phase Angle Prediction Models for High Modulus Asphalt Concrete*, International Journal of Pavements Volume: 2 Issue Number: 3 pp. 37-49.

[34]. Monismith, C.L., Ogawa, L., and Freeme, C.R. (1975), *Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading*. Transportation Research Record, No. 537, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp. 1-17.

[35] SAMARIS Group (2004), *Document number: SAM-05-DE10, Work Package 5: Performance- Based Specifications, Selection and Evaluation of Models for Prediction of Permanent Deformations of Unbound Granular Materials in Road Pavement*. SAMARIS Group.

[36] Muhammad Karami, Ainalem Nega, Ahdyeh Mosadegh and Hamid Nikraz (2016), *Evaluation of Permanent Deformation of BRA Modified Asphalt Paving Mixtures Based on Dynamic Creep Test Analysis*. Advanced Engineering Forum (Volume 16), pp, 69-81.

[37] Alireza Bayat (2009). *Field and Numerical Investigation to Determine the IMPact of Environmental and Wheel Loads on Flexible Pavement*. University of Waterloo, Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Waterloo, Ontario, Canada.

[38] Sven Agardh (2005), *Rut Depth Prediction on Flexible Pavements - Calibration and Validation of Incremental - Recursive Models*, Department of Technology and Society, Lund University.

[39] Bernd Schneider (2013), *Stone Mastic Asphalt*. Schneider Regional Export Manager Road Construction Division J. Rettenmaier & Söhne Germany.

[40] R. Brown, A. Cross A (1992). *National study of rutting in hot mix asphalt (HMA) pavements* /NCAT Report 92-05, February 1992.

[41] NCHRP - Final report (2004), *Guide for mechanistic - Empirical design of new and reahabilitated pavement structures, part 3-Design analysis*, Chap 3, March 2004.

[42] Zaniewski, J. P., and G. Srinivasan (2004). *Evaluation of Indirect Tensile Strength to Identify Asphalt Concrete Rutting Potential*, Asphalt Technology Program, Department of Civil and Environmental Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV.

[43] National Asphalt Pavement Association (2002), *Designing and constructing SMA mixtures-state-of-the-practice*, quality improvement series 122. sl], National Asphalt Pavement Association.

[44] Taher Baghaee Moghaddam, Mohamed Rehan Karim and Mahrez Abdelaziz (2011), , *A Review on Fatigue and Rutting Perfomance of Asphalt*

*Mixes*, Scientific Research and Essays Vol. 6(4), pp. 670-682, 18 February, 2011.

[45] Sivaranjan Sivasubramaniam and John E. Haddock (2006), *Validation of Superpave Mixture Design and Analysis Procedures Using the NCAT Test Track*. Joint Transportation Research Program.

[46] Louw Kannemeyer (2003), *Modelling Rutting in Flexible Pavements in HDM4*.

[47] K. Su, L.J. Sun and Y. Hachiya (2008), *Rut Prediction for Semi-Rigid Asphalt Pavements*. First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices, pp. 486 – 491.

[48] Ghazi Al-Khateeb, Imad Basheer (2009), *A Three-Stage Rutting Model Utilizing Rutting Performance data from the Hamburg Wheel-Tracking Device (WTD)*, Road & Transport Research Vol 18 No 3 September 2009 pp, 12-25.

[49] Imran Hafeez (2009) *IMPact of Hot Mix Asphalt Properties on its Permanent Deformation Behaviour*, University of Engineering and Technology Taxila 05-UET/PhD-CE-22

[50] F. Schäfer (2009), *Asphaltbeanspruchung aus Beschleunigungsvorgängen*, Dissertation des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität , Hannover, Deutschland.

[51] Colorado Department of Transportation (2018), *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, A Manual of Practice*, Colorado Department of Transportation, Colorado, USA.

[52] Regis Luis Equal de Carvalho (2012), *Prediction of permanent deformation in asphalt concrete*, Dissertation Doctor of Philosophy in University of Maryland.

[53] Senthilmurugan thyagarajan (2009), *Improvements to strain computation and reliability analysis of flexible pavements in the mechanistic-empirical. Pavement design guide*. Dissertation doctor of Philosophy in Washington State University.

[54] G. Leonardi (2015), *Finite element analysis for airfield asphalt pavements rutting prediction*. The Polish Academy of Sciences technical sciences, Vol. 63, No. 2, pp.397-403.



[55] Finn F. I inni (1977). *The use of distress prediction subsystems for the design of pavement Structures*. Volume I of proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, pp. 3-38

[56] Ainalem Nega, Behzad Ghadimi, and Hamid Nikraz (2015), “*Developing Master Curves, Binder Viscosity and Predicting Dynamic Modulus of Polymer-Modified Asphalt Mixtures*”, *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 3, pp.190-197.

[57] Jian-Shiuh CHEN, M.K. CHANG, K.Y. LIN (2005), “Influence of Coarse Aggregate Shape on Strength of Asphalt Concrete mixtures”. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 1062 – 1075.

[58] .Wensel, A.Shalaby, M.Thiessen, V.Mah (2002), “Investigation of asphalt pavement rutting at two canadian airfields”, *4th Specialized Conference in Transportation Engineering of the Canadian Society for Civil Engineering*. Montreal/Québec/Canada.

[59] Marsaall Thompson, Kasthurirangan Gopalakrishnan (2004), *Rutting Study of NAPTE flexible Pavement Test Sections*. ASCE2004.

[60] Alaa H. Abed and Adel A. Al- Azzawi (2012), *Evaluation of Rutting in Flaxible Pavements Using Finite Element Analysis and Local Emprical Model*, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2012, 5 (2), pp.163-169.

[61] Li, L., Huang, X., Wang, L., & Li, C. (2013), *Integrated experimental and numerical study on permanent deformation of asphalt pavement at intersections*. *Journal of materials in civil engineering*, 25(7), 907-912.

[62] Dylla, H., & Hyman, R. (2018), *Boosting pavement resilience*. *Public Roads*, 82(3)

[63] Ankit Gupta, Praveen Kumar, Rajat Rastogi. *Critical Review of Flexible Pavement Performance Models*. *KSCE Journal of Civil Engineering* (2014) 18(1):142-148.

### **C. TIẾNG NGA**

[64] ВСН 46-83. *Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа*. Издательство Транспорт М. 1985.

[65] Богуславский А.М. *Основы реологии асфальтобетона*. Издательство Высшая школа М 1982.

- [66] Васильев А. П. *Проблемы разработки методов прогнозирования глубины колеи на автомобильных дорогах*. Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог в начале XXI века: Сб. науч. тр /МАДИ (ТУ). - М. 2000.
- [67] *Справочная энциклопедия дорожника*. Том II. Ремонт и содержание автомобильных дорог. Издательство Транспорт. М 2004.
- [68] Гезенцев Л.В. *Дорожный асфальтобетон*. Издательство Транспорт. М.1995.
- [69] № ОС556-р от 24 06 2002. *Рекомендации по выявлению и устранению колеи на нежестких дорожных одеждах*. Издательство Транспорт, М.2002.
- [70] Геадий Кирюхин (2014). *Устойчивость асфальтобетонных покрытий к колееобразованию*. Издательство Транспорт, М.2014.
- [71] Геадий Кирюхин. *Температурные ридимы работы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог*. Институт дорожных покрытий. Конт. информация: 8 (903) 233-51-33.
- [72] Лугов С.В. *Основные положения методики расчета глубины колеи на дорожных одеждах с асфальтобетонным покрытием*. Диссертация М. 2004.
- [73] Бабков В.Ф. *Проектирование автомобильных дорог*. Издательство Транспорт, М.1987.
- [74] Смирнов А.В. *Расчет дорожных и аэродромных конструкций на динамические воздействия*. Издательство СибАДИ, 2008.
- [75] Горелышев Н.В. *Рекомендации по повышению долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий в отношении образования пластических деформаций*. Сб. науч. тр /МАДИ (ТУ). М. 1998.
- [76] Ильин С. В. *Обеспечение сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий исходя из условий их эксплуатации*. Диссертация. М. 2004.
- [77] Иванов Н.Н. *Конструирование и расчет нежестких одежд*. Издательство Транспорт, М.1993.
- [78] Горячев М.Г. *Обзор по проблеме колееобразования на автомобильных и городских дорогах*. Конференция МАДИ "Строительство и эксплуатация дорог". М. 2001.

[79] Руденский А. В. *Причины колеи асфальтобетонного слоя покрытия*. Сб. науч. тр /МАДИ (ТУ). - М. 1998.

[80] Васильев А.П. *Методика расчета и прогнозирования глубины колеи*. Сб. науч. тр /МАДИ (ТУ). - М. 2004.

[81] СТО-ГК Трансстрой 007-2007 – *Асфальтобетон. Метод оценки устойчивости к образованию колеи пластинности*. Издательство Транспорт, М. 2007.

[82] Кельн. *Нормы и правила по стандартизации конструкций дорожных одежд*. Издательство Транспорт, М.2001.

[83] Морвин Сергей Сергеевич. *Совершенствование метода определения прочности нежестких дорожных одежд динамическим нагружением*. Сб. науч. тр /МАДИ (ТУ). - М. 2011.

[84] Дьяков К.А.Черсков Р.М. *Мировой опыт борьбы с колееобразованием на автомобильных дорогах*. Сб. науч. тр /МАДИ (ТУ). - М. 2008.

[85] RstO 01. *Нормы и правила по стандартизации конструкций дорожных одежд*. Кельн. 2001. *Реологические свойства битумоминеральных материалов*. М.: Высшая школа, 2001 -131с.

[86] Руденский А.В. *Реологические свойства битумоминеральных материалов*. М.: Высшая школа, 1991 -131с.

[87] ОДН 218.046-01. *Проектирование нежестких дорожных одежд*. Издательство Транспорт, М 2001.

[88] СТП 007-97. *Метод испытания асфальтобетона на устойчивость к колееобразованию*. Издательство Транспорт, М 1997.

[89] ТКП 45-3.03-112-2008. *Автомобильные дороги. Нежесткие дорожные одежды - Правила проектирования*. Издательство Транспорт, М. 2008.

[90] Ладыгин Б.И. *Прочность и долговечность асфальтобетона*. Издательство Наука и Техника. Минск 1992.

[91] Юлиус Мацкерле. *Современный экономичный автомобиль. Сопротивление качению*.