

Nghiên cứu ứng dụng máy siêu âm bê tông để xác định chiều dày cho lớp BTN mặt đường

Trần Trung Việt^{1*}

¹ Khoa xây dựng Cầu Đường, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng

TỪ KHOÁ

Không phá hủy NDT
Bê tông nhựa
Phương pháp siêu âm
Độ ổn định masshal

TÓM TẮT

Hiện nay, phương pháp không phá hủy NDT (NonDestructive Testing) được sử dụng phổ biến trong việc đánh giá, xác định các khuyết tật cũng như chỉ tiêu cơ lý của vật liệu. Nghiên cứu này tập trung vào việc sử dụng máy siêu âm bê tông hiện hành (Matest Ultrasonics) để xác định chiều dày lớp BTN mặt đường tại hiện trường. Kết quả được thiết lập dựa trên 3 cấp phối khác nhau của BTN C12.5, với các chiều dày thay đổi từ 5-7cm. Kết quả nghiên cứu đề xuất mô hình tương quan giữa độ rỗng còn dư, độ rỗng khung cốt liệu, độ ổn định Masshal, chỉ số dẻo Masshal của BTN cùng thời gian truyền sóng siêu âm (T) từ thiết bị máy siêu âm Matest với chiều dày của lớp BTN.

KEYWORDS

NDT
Asphalt concrete
Ultrasonic method
Masshal stability

ABSTRACT

Nowadays, NonDestructive Testing (NDT) is commonly used in the assessment and identification of defects as well as properties of materials. This study focuses on the use of concrete ultrasonic machines to determine the thickness of asphalt pavement layers at the site. The result is based on 3 different gradations of asphalt concrete C12.5, with a thicknesses vary from 5 to 7cm. The results of the study proposed the correlation model between the residual porosity, aggregate porosity, Masshal stability, Masshal plasticity index of the asphalt concrete and ultrasonic frequency from the device Matest Ultrasonic with the thickness of the asphalt concrete layer.

1. Đặt vấn đề

Phương pháp thí nghiệm không phá hủy NDT đã và đang được sử dụng rất phổ biến trên thế giới để xác định các khuyết tật, các chỉ tiêu cơ lý, cường độ, cũng như kích thước hình học của cấu kiện và vật liệu xây dựng. Trong đó, phương pháp dung sóng siêu âm (ultrasonics) thường được sử dụng để xác định chiều dày, chỉ tiêu cường độ vật liệu: xác định mô đun đàn hồi [Rho et al., 1993; Töyräs et al., 2001; Freitas et al., 2010; Moradian and Behnia, 2009; Hu and Wang, 2016], hay mô đun đàn hồi động của BTN [Pezhouhan et al., 2017; Li et al., 2019], chiều dày của mặt đường BTN, BTXM [Erwards and Bell, 2016]. Trong các nghiên cứu trên, đều đánh giá hiệu quả về kỹ thuật cũng như kinh tế khi sử dụng phương pháp NDT để xác định các chỉ tiêu cường độ vật liệu.

Tuy nhiên, trong hầu hết các nghiên cứu đều sử dụng sóng siêu âm để xác định chủ yếu mô đun đàn hồi (tĩnh và động) của vật liệu, còn về chiều dày thì thường sử dụng cho vật liệu có tính đồng nhất cao là BTXM. Theo nghiên cứu của Erwards and Bell, 2016 thì khi sử dụng phương pháp sóng siêu âm để xác định chiều dày lớp mặt đường BTXM cho độ chính xác cao hơn mặt đường BTN. Trong nghiên cứu của Erwards, kết quả thí nghiệm được xác định trực tiếp từ trị số thời gian truyền thu được từ thiết bị đo, chưa xét đến ảnh hưởng các yếu tố khác của vật liệu đặc biệt là BTN như: độ rỗng, hàm

lượng nhựa, ổn định mashall... trong khi theo nghiên cứu của Asmani et al. 2001 chỉ ra các đặc trưng cơ lý của BTN ảnh hưởng khá lớn đến thời gian truyền của sóng siêu âm.

Trong nghiên cứu này, tập trung sử dụng phương pháp thí nghiệm NDT dựa trên sóng siêu âm của thiết bị siêu âm BTXM sẵn có Matest Ultrasonics để xác định chiều dày của lớp BTN. Các chỉ tiêu cơ lý của BTN bao gồm: độ rỗng dư (r_d), độ rỗng khung cốt liệu (V_a), độ ổn định Mashall (S) và chỉ số dẻo Mashall (F) được xem xét phân tích ảnh hưởng đến thời gian truyền của sóng siêu âm của thiết bị Matest Ultrasonics. Một phương trình tương quan được xây dựng nhằm hiệu chuẩn để sử dụng kết quả từ Matest Ultrasonics xác định chiều dày mặt đường BTN.

2. Vật liệu và mô hình thí nghiệm

2.1. Vật liệu sử dụng

Trong nghiên cứu này, BTN C 12.5 được lựa chọn để phân tích với 3 cấp phối tương ứng với cận trên (CP1), cận dưới (CP3) và đường trung bình (CP2) và theo TCVN 8819:2011.

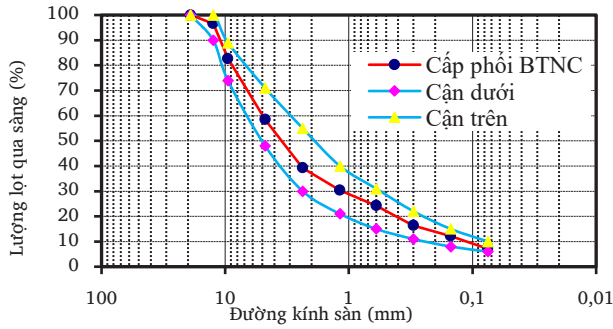
Các chỉ tiêu cơ lý của cốt liệu đạt theo TCVN 7572:2006, TCVN 7504:2005, TCVN 7495:2005, TCVN 7497:2005, TCVN 8860:2011.

Với 4 thông số cơ lý: độ rỗng dư (r_d), độ rỗng khung cốt liệu (V_a), độ ổn định Mashall (S) và chỉ số dẻo Mashall (F), nghiên cứu sẽ tiến hành chế tạo 30 tổ mẫu (90 mẫu) với chiều dày thay đổi $H = 5 \div 7$ (cm).

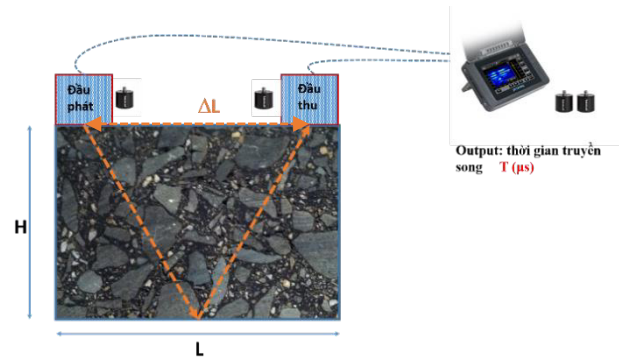
*Liên hệ tác giả: ttviet@dut.udn.vn

Nhận ngày 22/05/2024, sửa xong ngày 19/06/2024, chấp nhận đăng ngày 20/06/2024

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2024.743>



Hình 1. Đường TPH cho 3 cấp phối nghiên cứu.



Hình 3. Sơ đồ xác định chiều dày BTN bằng thiết bị Matest Ultrasonics.

2.2. Xác định các chỉ tiêu cơ lý của mẫu BTN

Các chỉ tiêu cơ lý của BTNC12.5 được xác định theo TCVN hiện hành, thể hiện như trong Bảng 1 và Hình 2.

Bảng 1. Bảng thống kê chỉ tiêu thí nghiệm.

Chỉ tiêu thí nghiệm	Tiêu chuẩn thí nghiệm
Độ ổn định, độ dẻo Marshall	TCVN 8860-1:2011
Tỉ trọng khối, khối lượng thể tích của BTN đã đầm nén	TCVN 8860 - 5:2011
Tỉ trọng lớn nhất, khối lượng riêng BTN ở trạng thái rời	TCVN 8860 - 4:2011
Độ rỗng dư (V_v)	TCVN 8860 - 9:2011
Độ rỗng cốt liệu (VMA)	TCVN 8860 - 10:2011

Thiết bị thí nghiệm bộ 4 chỉ tiêu cơ lý trên



Hình 2. Thiết bị thí nghiệm Mashall và cân xác định độ rỗng.

Kết quả thí nghiệm thể hiện như trong Bảng 2.

2.3. Mô hình thí nghiệm xác định thời gian truyền sóng T

Để đo chiều dày mẫu BTN, nghiên cứu sử dụng thiết bị siêu âm BTXM Matest PL200. Ở đây, kết quả thu được trực tiếp từ thiết bị là thời gian truyền sóng ($T - \mu s$). Và phương pháp đo không trực tiếp được sử dụng. Mô hình thí nghiệm như trong Hình 3.

Để tiến hành đo chiều dày bằng thiết bị Matest Ultrasonics, nghiên cứu đề xuất khoảng cách giữa 2 đầu phát và thu tín hiệu $\Delta L = 80\text{mm}$, khoảng cách bao hai đầu đo $L = 100\text{ mm}$. Kết quả đo đặc như trong Bảng 2.



Hình 4. Xác định thời gian truyền sóng trên mẫu BTN.

2.4. Xác định chiều dày mẫu H

Để đánh giá kết quả đo và xây dựng mối quan hệ, chiều dày các mẫu BTN ban đầu sẽ được xác định bằng thước kẹp với sai số 0.1mm (Hình 5). Kết quả như trong Bảng 2.



Hình 5. Xác định chiều dày mẫu bằng thước kẹp.

2.5. Kết quả thí nghiệm BTNC 12.5.

Sau khi tiến hành các thí nghiệm như đã nêu cho 30 tổ mẫu, kết quả thể hiện như trong Bảng 2.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả thí nghiệm cho 3 cấp phối.

STT Mẫu	H (mm)	r_d (%)	Va (%)	S (KN)	F (mm)	T (μ s)
1.1	52,6	4,06	18,08	8,76	3,40	37,6
1.2	52,4	3,30	17,42	7,56	2,16	34,8
1.3	51,5	3,32	17,44	7,71	2,35	33,4
1.4	55,8	6,25	19,95	5,62	2,99	34,3
1.5	54,5	4,22	18,22	7,64	2,77	34,0
1.6	54,8	3,89	17,93	7,23	2,83	33,4
1.7	60,5	7,68	21,17	8,97	2,62	40,5
1.8	58,5	7,21	20,77	10,91	3,03	36,2
1.9	61,0	8,12	21,55	9,02	3,96	26,3
1.10	64,6	8,86	22,18	12,41	3,47	28,3
1.11	64,1	8,58	21,94	11,03	2,86	26,3
1.12	65,2	8,31	21,70	9,22	3,97	32,7
1.13	69,5	8,70	22,04	5,48	2,70	47,6
1.14	69,1	8,35	21,74	9,18	3,46	50,5
1.15	71,4	8,96	22,26	8,17	4,20	50,5
1.16	53,3	3,46	17,89	9,46	2,72	32,2
1.17	52,3	2,73	17,27	11,38	2,64	30,0
1.18	50,4	1,59	16,31	12,38	2,60	27,9
1.19	54,6	4,56	18,83	9,19	3,13	34,4
1.20	56,5	4,71	18,96	6,54	2,82	38,5
1.21	54,5	1,27	16,03	8,68	3,49	36,3
1.22	60,5	5,30	19,46	8,46	3,51	51,0
1.23	60,1	4,60	18,87	9,40	3,27	63,2
1.24	61,6	5,21	19,38	7,48	3,20	46,8
1.25	66,5	5,83	19,91	10,03	3,13	43,5
1.26	66,2	5,48	19,61	11,03	3,78	45,5
1.27	66,6	5,82	19,90	8,38	3,40	49,0
1.28	70,4	6,88	20,80	8,06	3,69	48,0
1.29	70,2	6,77	20,71	8,47	2,67	47,7
1.30	71,2	7,18	21,06	7,58	4,16	49,3
Cấp phối 2						
2.1	52,6	4,28	19,82	6,46	2,86	48,4
2.2	52,3	3,82	19,43	6,34	2,97	48,9
2.3	50,9	3,21	18,91	8,80	3,2	45,7
2.4	54,1	1,98	17,89	8,82	3,1	46,8
2.5	55,4	4,78	20,23	8,44	3,31	48,2
2.6	57,0	5,90	21,17	7,33	2,29	54,4
2.7	59,2	5,14	20,53	8,30	3,66	53,0
2.8	59,1	6,18	21,41	7,97	2,99	55,0
2.9	59,6	5,18	20,57	7,83	3,9	51,7
2.10	65,6	6,31	21,52	9,30	3,76	51,9
2.11	65,5	6,11	21,35	8,85	3,5	56,0
2.12	65,9	6,67	21,82	8,74	3,47	59,0
2.13	69,7	9,20	23,93	7,91	3,35	47,7
2.14	69,7	7,60	22,60	8,93	2,77	61,2
2.15	70,0	8,26	23,15	7,70	3,68	67,2

2.16	52,3	3,99	19,57	7,50	3,57	51,1
2.17	52,0	3,77	19,38	8,11	2,45	47,4
2.18	50,8	1,30	17,31	10,37	2,8	47,6
2.19	55,5	5,38	20,73	7,78	3,27	50,8
2.20	55,5	3,89	19,49	7,78	3,39	51,3
2.21	54,5	4,37	19,89	9,79	2,39	48,5
2.22	60,9	6,05	21,30	7,93	3,27	55,6
2.23	60,2	5,78	21,07	8,73	3,4	53,0
2.24	59,1	5,14	20,53	9,32	3,37	54,5
2.25	65,0	5,86	21,14	7,80	3,51	55,7
2.26	64,8	6,36	21,55	9,27	3,4	57,2
2.27	64,0	5,70	21,00	9,57	3,94	57,4
2.28	67,8	7,42	22,45	9,88	4,87	60,2
2.29	68,7	8,42	23,28	8,20	4,07	63,3
2.30	69,1	7,78	22,75	8,93	4,28	63,5
Cấp phối 3						
3.1	51,7	2,53	18,62	6,52	3,49	49,1
3.2	51,8	2,71	18,78	6,65	2,32	49,3
3.3	51,6	1,95	18,13	6,86	4,04	48,8
3.4	54,7	3,16	19,15	7,88	2,61	50,6
3.5	54,6	2,66	18,73	8,72	2,70	51,5
3.6	57,5	2,37	18,49	5,24	3,61	54,7
3.7	59,8	4,56	20,32	9,07	3,66	54,8
3.8	60,7	4,48	20,25	7,36	3,56	57,4
3.9	60,1	4,55	20,31	8,29	4,45	56,3
3.10	66,3	6,77	22,17	7,30	4,29	63,2
3.11	67,1	5,81	21,36	6,71	3,79	64,1
3.12	65,2	5,99	21,51	7,57	3,43	60,0
3.13	68,9	8,47	23,58	8,09	4,90	63,2
3.14	69,6	9,33	24,30	7,59	4,75	64,9
3.15	69,5	9,13	24,14	7,07	4,64	64,5
3.16	51,5	2,15	18,30	8,45	3,01	48,4
3.17	51,0	2,25	18,39	8,40	3,43	47,9
3.18	51,5	2,88	18,91	8,96	3,44	48,5
3.19	56,6	3,68	19,58	6,53	3,34	53,6
3.20	55,1	3,68	19,58	7,00	3,55	52,9
3.21	55,5	4,71	20,44	6,30	3,25	53,7
3.22	61,0	3,59	19,51	6,79	3,23	55,6
3.23	61,6	3,82	19,70	6,41	4,49	56,7
3.24	61,9	4,68	20,41	5,36	3,69	57,9
3.25	65,0	2,27	18,41	8,60	4,11	58,3
3.26	66,5	3,32	19,28	7,12	4,11	60,0
3.27	66,7	3,42	19,37	7,00	4,90	60,9
3.28	70,3	5,24	20,89	7,01	5,00	63,7
3.29	70,5	4,57	20,32	6,71	4,70	64,3
3.30	71,3	5,30	20,93	6,45	4,98	65,3

* lưu ý 1.20: số đầu chỉ cấp phối 1, số sau chỉ số tt mẫu TN

3. Xác định chiều dày H trực tiếp từ thời gian truyền sóng (T) của thiết bị Matest Ultrasonics

Từ kết quả thí nghiệm, kết hợp với các đề xuất của các nghiên cứu của Erwards, Hu [Erwards and Bell, 2016; Hu and Wang, 2016], chiều dày của lớp BTN sẽ được xác định trực tiếp từ số liệu đo của thiết bị đo (thời gian truyền sóng T). Để xây dựng tương quan giữa chiều dày H và T, nghiên cứu đề xuất 2 mô hình tuyến tính (linear) và bậc 2 (quadratic). Kết quả như trong Bảng 3 và Hình 6.

- Mô hình linear: $H = a_0 + a_1T$
- Mô hình quadratic: $H = a_0 + a_1T + a_2T^2$

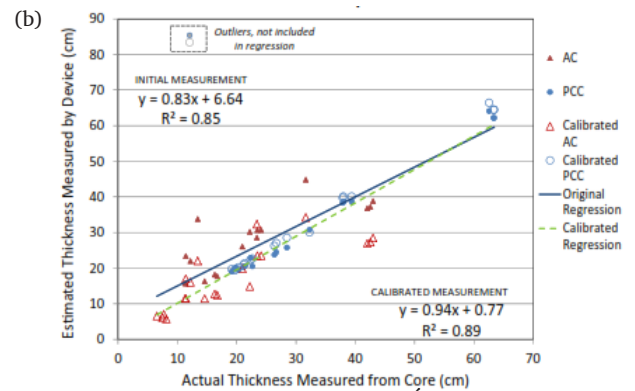
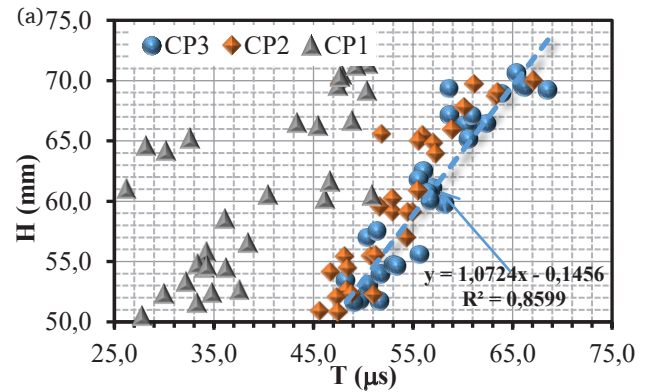
Bảng 3. Kết quả đánh giá mô hình.

		Mô hình Linear	Mô hình Quadratic
CP1	R ²	0,31	0,29
	P-value	0,00086	0,00380
CP2	R ²	0,64	0,63
	P-value	7E-8	6E-7
CP3	R ²	0,86	0,87
	P-value	1,3E-7	4E-9

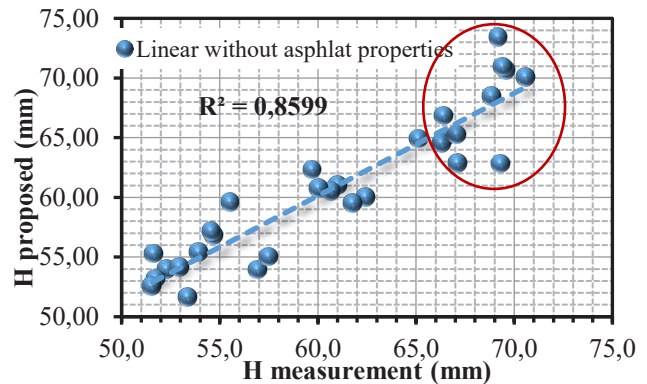
Từ kết quả phân tích, ta nhận thấy chỉ có CP3 là có thể sử dụng được trực tiếp kết quả từ thiết bị Matest Ultrasonics, hai CP còn lại cho hệ số tương quan quá bé, và kết quả này phù hợp với nhận xét của Erwards and Bell, 2016 (Hình 6b). Ở đây ta còn nhận thấy, với cấp phối 1 (CP có hàm lượng hạt mịn cao nhất) thì kết quả đo cho thấy rất nhạy: điều này cho thấy tính chất cơ lý của BTN có ảnh hưởng đến thời gian truyền sóng siêu âm (T).

Từ kết quả trên Hình 6, với CP3 mối tương quan giữa KQ từ mô hình đề xuất và số liệu đo được xác định như trong Hình 7. Từ kết quả Hình 7, ta nhận thấy khi chiều dày mẫu BTN lớn hơn 65 mm thì biên độ dao động sai số giữa mô hình và kết quả đo càng lớn (R²=0,86). Điều này có thể được giải thích do ảnh hưởng của các chỉ tiêu cơ lý của mẫu lớn sẽ nhạy hơn các mẫu có kích thước nhỏ, nên khi bỏ qua ảnh hưởng các yếu tố này kết quả cho trị số không chính xác. Phần kết quả này cũng phù hợp với nghiên cứu của Erwards and Bell, 2016 (Hình 6b).

Từ các kết quả này ta có thể thấy việc sử dụng trực tiếp giá trị từ phương pháp đo NDT từ sóng siêu âm của thiết bị Matest Ultrasonics để xác định chiều dày BTN cho kết quả chưa chính xác, độ sai số còn rất lớn. Vì vậy việc xét đến các yếu tố tính chất cơ lý của BTN trong mô hình là cần thiết.



Hình 6. Tương quan giữa H và T: (a)- Kết quả 3 CP; (b)- KQ của Erwards and Bell, 2016.



Hình 7. So sánh kết quả mô hình đề xuất và số liệu đo cho CP3.

4. Phân tích ảnh hưởng của các chỉ tiêu cơ lý đến thời gian truyền sóng T của thiết bị Matest Ultrasonics.

Để phân tích ảnh hưởng của các chỉ tiêu cơ lý BTNC 12.5 đến thời gian truyền sóng, nghiên cứu sử dụng hệ số tương quan ρ (coefficient correlation) được xác định theo công thức sau.

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sigma_x^2 \sigma_y^2}$$

trong đó:

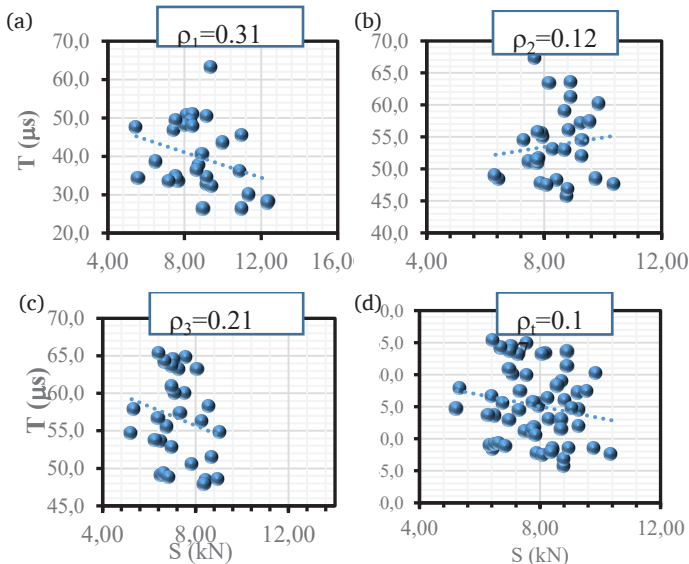
\bar{x} , \bar{y} là giá trị trung bình của 2 đại lượng X,Y.

σ_x^2 , σ_y^2 là độ lệch chuẩn bình phương 2 đại lượng X,Y.

Hệ số tương quan thay đổi trong khoản $-1 \leq \rho \leq 1$, hai đại lượng X, Y được xem là có ảnh hưởng phụ thuộc nhau khi $\rho \neq 0$, ngược lại thì xem như 2 đại lượng này là độc lập nhau. Trong phần này chỉ xét ảnh hưởng độc lập các yếu tố.

4.1. Phân tích ảnh hưởng của độ ổn định Marshall đến thời gian truyền sóng siêu âm

Từ kết quả ở Bảng 2, ta tiến hành xác định hệ số tương quan giữa độ ổn định Mashall (S) đến thời gian truyền sóng (T) cho 3 CP và tổ hợp 3 CP. Kết quả như trong Hình 8.



Hình 8. Biểu đồ tương quan giữa S và T: (a)-CP1, (b)-CP2, (c)-CP3, (d)-Tổ hợp 3 CP.

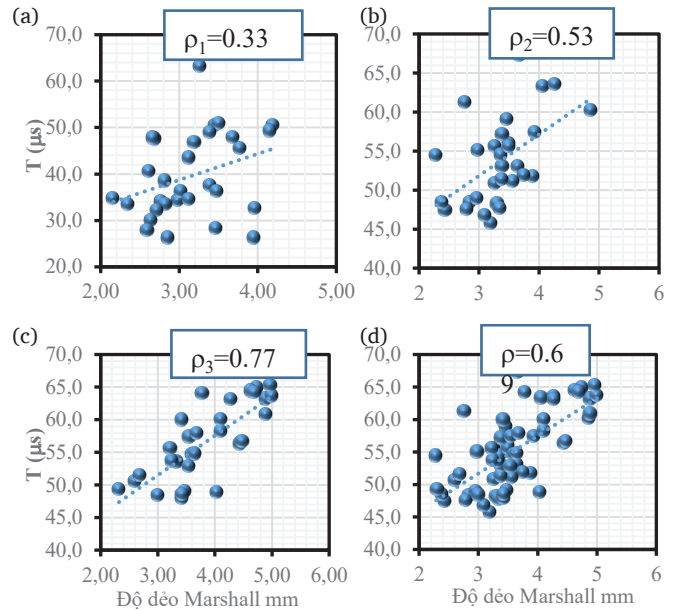
Kết quả phân tích trong 4 cấp phối cho thấy độ ổn định Marshall có hệ số tương quan với thời gian truyền tương ứng là $\rho_1 = -0,31$; $\rho_2 = 0,12$; $\rho_3 = 0,21$; $\rho_4 = 0,17$; điều này có nghĩa là trị số S có ảnh hưởng đến thời gian truyền sóng T. Tuy nhiên ở đây ta thấy trị số này không quá lớn ($< 0,4$) nên ảnh hưởng của chỉ tiêu này đến thời gian truyền trong mẫu là không quá lớn.

4.2. Ảnh hưởng của độ dẻo Marshall đến thời gian truyền sóng siêu âm

Từ kết quả ở Bảng 2, ta tiến hành xác định hệ số tương quan giữa chỉ số dẻo Mashall (F) đến thời gian truyền sóng (T) cho 3 CP và tổ hợp 3 CP. Kết quả như trong Hình 9.

Kết quả phân tích cho thấy hệ số tương quan giữa chỉ tiêu cơ lý độ dẻo Marshall với thời gian truyền trong mẫu BTN lớn ($\rho_1 = 0,33$; $\rho_2 = 0,53$; $\rho_3 = 0,77$; $\rho_4 = 0,69$) nên độ dẻo Marshall sẽ có sự ảnh hưởng lớn đến thời gian truyền sóng siêu âm.

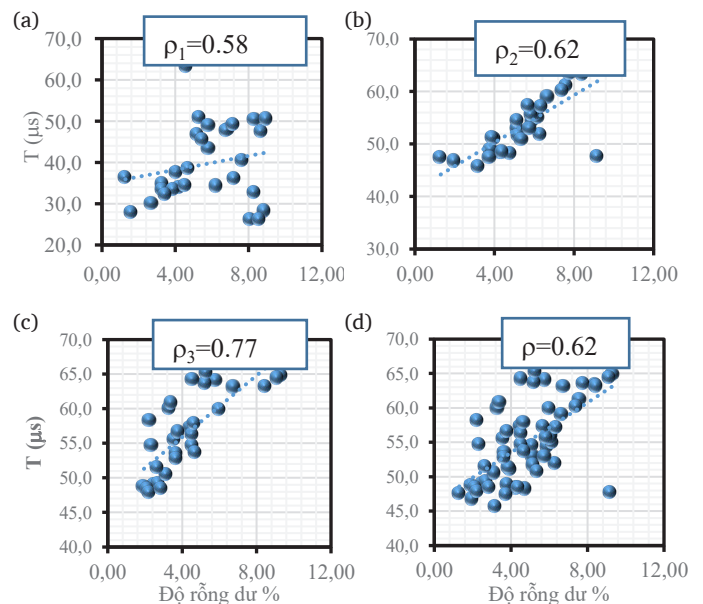
Ta có thể nhận thấy, độ dẻo Marshall càng lớn thì thời gian truyền sóng siêu âm càng lớn và ngược lại.



Hình 9. Biểu đồ tương quan giữa ε và T: (a)-CP1, (b)-CP2, (c)-CP3, (d)-Tổ hợp 3 CP.

4.3. Ảnh hưởng của độ rỗng dư đến thời gian truyền sóng siêu âm

Từ kết quả ở Bảng 2, ta tiến hành xác định hệ số tương quan giữa độ rỗng dư (r_d) đến thời gian truyền sóng (T) cho 3 CP và tổ hợp 3 CP. Kết quả như trong Hình 10.



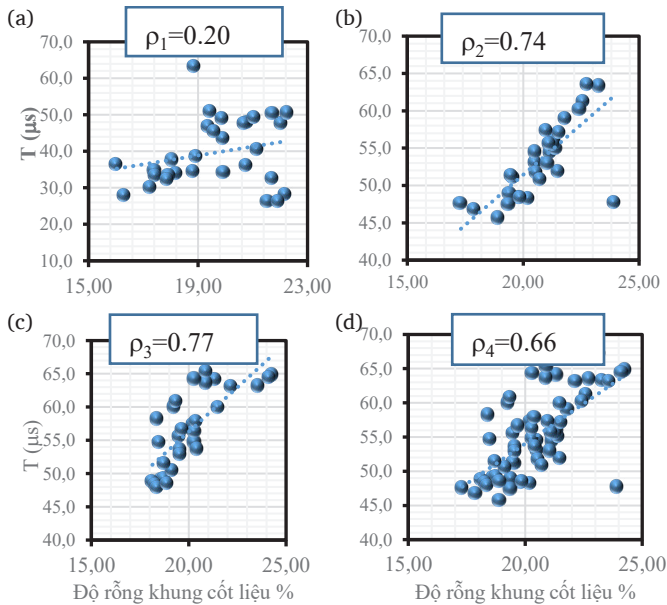
Hình 10. Biểu đồ tương quan giữa r_d và T: (a)-CP1, (b)-CP2, (c)-CP3, (d)-Tổ hợp 3 CP.

Kết quả phân tích cho thấy độ rỗng dư có sự ảnh hưởng lớn đến thời gian truyền của sóng siêu âm trong mẫu BTN với 4 hệ số tương quan tương ứng là $\rho_1 = 0,58$; $\rho_2 = 0,62$; $\rho_3 = 0,77$; $\rho_4 = 0,62$.

Từ kết quả phân tích ta có thể thấy, độ rỗng dư càng lớn thì thời gian truyền càng lớn và ngược lại.

4.4. Phân tích ảnh hưởng của độ rỗng khung cốt liệu đến thời gian truyền sóng siêu âm

Từ kết quả ở Bảng 2, ta tiến hành xác định hệ số tương quan giữa độ rỗng khung cốt liệu (VMA) đến thời gian truyền sóng (T) cho 3 CP và tổ hợp 3 CP. Kết quả như trong Hình 11.



Hình 11. Biểu đồ tương quan giữa Va và T: (a)-CP1, (b)-CP2, (c)-CP3, (d)-Tổ hợp 3 CP.

Kết quả phân tích cho thấy độ rỗng khung cốt liệu có sự ảnh hưởng lớn đến thời gian truyền của sóng siêu âm trong mẫu BTN với 4 hệ số tương quan tương ứng là $\rho_1 = 0,20$; $\rho_2 = 0,74$; $\rho_3 = 0,77$; $\rho_4 = 0,66$.

Từ kết quả phân tích ta có thể thấy, độ rỗng khung cốt càng lớn thì thời gian truyền càng lớn và ngược lại.

4.5. Nhận xét

Qua các biểu đồ trên thì ta thấy các chỉ tiêu cơ lý ảnh hưởng nhiều đến thời gian truyền. Đặc biệt là độ rỗng cầu khung cốt liệu cũng như độ rỗng dư và chỉ số dẻo Mashall. Với BTN C12.5, khi có độ rỗng và chỉ số dẻo Mashall càng bé thì thời gian truyền sóng càng bé: điều này được giải thích vì tốc độ truyền sóng siêu âm trong không khí nhỏ hơn rất nhiều so với vật liệu như dầu mỡ, polyme.

Như vậy, để xác định được chính xác hơn chiều dày của lớp BTN thì cần phải xét đến ảnh hưởng của 4 nhân tố cơ lý: độ rỗng dư (r_d), độ rỗng khung cốt liệu (V_a), độ ổn định Mashall (S) và chỉ số dẻo Mashall (F).

5. Xây dựng mô hình hiệu chuẩn xác định chiều dày lớp BTN từ kết quả đo của máy Matest Ultrasonics

Để xây dựng mô hình tương quan giữa các yếu tố (r_d, V_a, S, F, T) đến chiều dày lớp BTN C12.5 (H), nghiên cứu sử dụng phương pháp hồi quy đa biến và phân tích thống kê. Trong phân tích này, 3 mô hình tương quan được đề xuất: tuyến tính (linear), interactions, và mô hình bậc 2 (quadratic) (Bảng 4). Tính tương hợp của các mô hình được đánh giá thông qua 3 giá trị: R^2 , p-value (probability value), và tổng sai số bình phương ($\sum Er$).

Để mô hình có ý nghĩa thì $p \leq 0,05$; $R^2 > 0,85$.

$$Y = H; X1 = r_d; X2 = V_a; X3 = S; X4 = F; X5 = T$$

Bảng 4. Các mô hình tương quan đề xuất.

Mô hình	Mô tả
Linear	$Y = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i$
Interactions	$Y = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^5 a_{5+i+j} X_i X_j$
Quadratic	$Y = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^5 a_{5+i+j} X_i X_j + \sum_{i=1}^5 a_{15+i} X_i^2$

Để phân tích mô hình, nghiên cứu sử dụng công cụ fitlm (Fitting linear regression model) trong Matlab để xác định các thông số đánh giá nêu trên cùng các hệ số tương quan (ρ) của các mô hình. Kết quả được thể hiện trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả phân tích các mô hình.

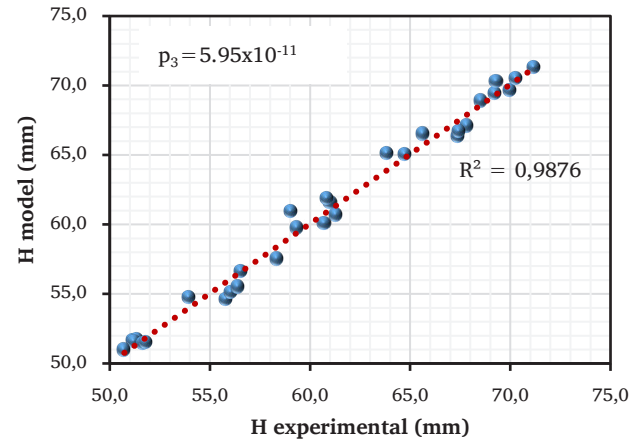
		Linear	Interactions	Quadratic
CP1	R^2	0,871	0,966	0,972
	p-value	6,52E-10	1,32E-7	1,37E-5
	($\sum Er$).	2,70	1,84	1,73
CP2	R^2	0,921	0,956	0,945
	p-value	1,93E-12	6,22E-7	2,15E-4
	($\sum Er$).	2,01	1,95	2,12
CP3	R^2	0,981	0,989	0,966
	p-value	8,82E-21	5,95E-11	1,4E-6
	($\sum Er$).	0,952	1,06	1,27
Tổ hợp	R^2	0,817	0,960	0,890
	p-value	1,57E-29	9,57E-26	1,7E-25
	($\sum Er$).	2,93	1,53	2,52

Từ kết quả phân tích trong Bảng 5, ta nhận thấy mô hình *Interactions* là phù hợp nhất: sai số nhỏ, phương trình không quá phức tạp và tất cả các CP đều đảm bảo. Vì vậy, nghiên cứu đề xuất sử dụng mô hình *Interaction* để xây dựng tương quan hiệu chỉnh xác định chiều dày lớp BTN từ thiết bị Matest Ultrasonics. Kết quả phân tích được thể hiện trong Bảng 6.

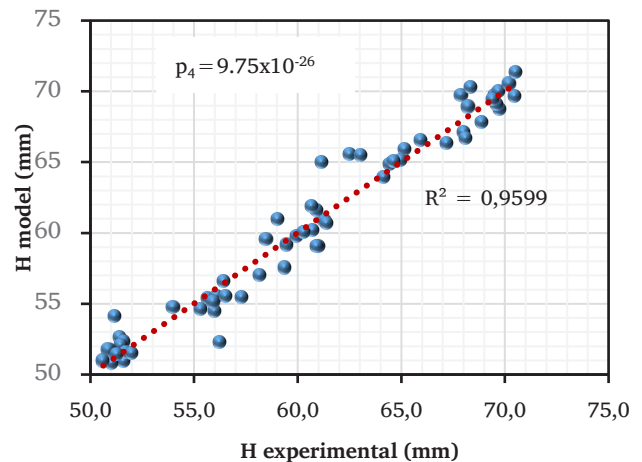
Bảng 6. Phương trình tương quan hiệu chỉnh đề xuất.

Mô hình	Phương trình tương quan
M1 (CP1)	$Y = 1774 + 77,83X_1 - 111,5X_2 - 67,58X_3 + 30,37X_4 - 38,99X_5 + 0,34X_1 \cdot X_2 - 3,17X_1 \cdot X_3 + 1,00X_1 \cdot X_4 - 1,89X_1 \cdot X_5 + 4,24X_2 \cdot X_3 - 1,97X_2 \cdot X_4 + 2,55X_2 \cdot X_5 + 0,78X_3 \cdot X_4 + 0,003X_3 \cdot X_5 - 0,07X_4 \cdot X_5$
M2 (CP2)	$Y = -15493,5 - 804,70X_1 - 952,56X_2 + 865,56X_3 - 160,47X_4 + 429,10X_5 + 0,43X_1 \cdot X_2 + 44,87X_1 \cdot X_3 - 268,31X_1 \cdot X_4 + 22,07X_1 \cdot X_5 - 3,24X_2 \cdot X_3 + 319,35X_2 \cdot X_4 - 26,38X_2 \cdot X_5 - 0,68X_3 \cdot X_4 + 0,013X_3 \cdot X_5 - 0,20X_4 \cdot X_5$
M3 (CP3)	$Y = 3239,34 + 164,90X_1 - 197,64X_2 - 709,19X_3 + 966,11X_4 - 32,82X_5 + 0,22X_1 \cdot X_2 - 35,89X_1 \cdot X_3 + 48,90X_1 \cdot X_4 - 1,83X_1 \cdot X_5 + 43,09X_2 \cdot X_3 - 58,65X_2 \cdot X_4 + 2,07X_2 \cdot X_5 - 0,34X_3 \cdot X_4 - 0,014X_3 \cdot X_5 + 0,095X_4 \cdot X_5$
M4 (Tổ hợp)	$Y = 488,18 + 23,81X_1 - 32,41X_2 - 8,08X_3 + 200,38X_4 - 18,07X_5 + 0,44X_1 \cdot X_2 - 0,25X_1 \cdot X_3 + 9,42X_1 \cdot X_4 - 1,13X_1 \cdot X_5 + 0,81X_2 \cdot X_3 - 12,29X_2 \cdot X_4 + 1,20X_2 \cdot X_5 - 0,39X_3 \cdot X_4 - 0,09X_3 \cdot X_5 + 0,16X_4 \cdot X_5$

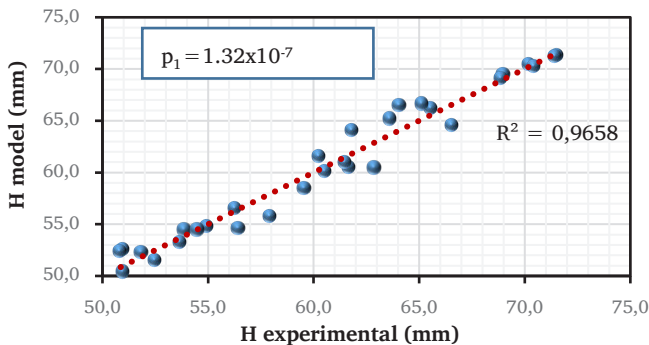
Từ các phương trình trên, ta có kết quả so sánh giữa số liệu đo mẫu thực tế và kết quả xác định từ mô hình đề xuất như trong Hình 12-15.



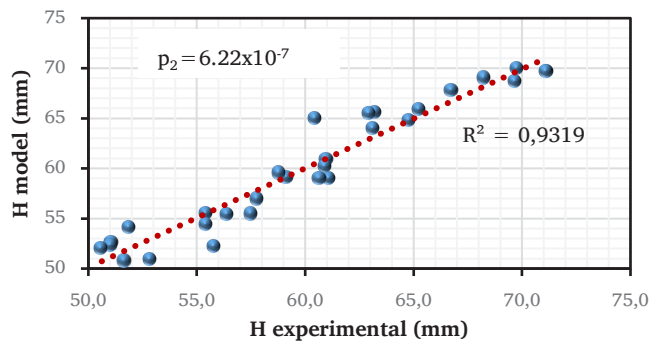
Hình 14. So sánh kết quả giữa mô hình đề xuất và số liệu thực nghiệm cho CP3.



Hình 15. So sánh kết quả giữa mô hình đề xuất và số liệu thực nghiệm cho tổ hợp CP1 + CP2 + CP3.



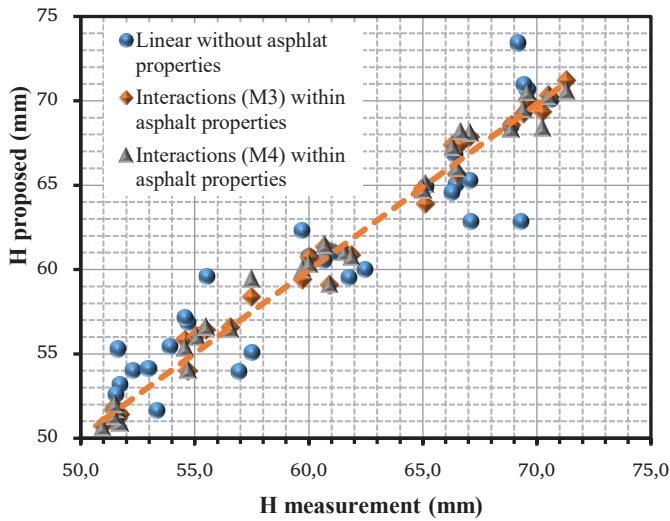
Hình 12. So sánh kết quả giữa mô hình đề xuất và số liệu thực nghiệm cho CP1.



Hình 13. So sánh kết quả giữa mô hình đề xuất và số liệu thực nghiệm cho CP2.

Từ các kết quả trên Hình 12-15, ta nhận thấy kết quả của mô hình đề xuất (*interaction*) trong nghiên cứu cho kết quả phù hợp với số liệu thực nghiệm thực tế. Các hệ số tương quan (R^2) và chỉ số p -value đều chỉ ra mô hình đề xuất là phù hợp cho BTN C12.5 ($R^2 > 0,93$, p -value $< 6E-7$).

Ở đây, ta tiến hành so sánh kết quả của CP3 với mô hình linear đề xuất ở mục 3 (Hình 7- không xét ảnh hưởng của chỉ tiêu cơ lý BTN) với mô hình Interactions (M3, M4) đề xuất khi xét đến ảnh hưởng 4 chỉ tiêu cơ lý của BTN. Kết quả chỉ ra, mô hình Interactions cho kết quả chính xác hơn với mô hình linear, đặc biệt khắc phục được biên độ sai số khi chiều cao mẫu lớn ở mô hình linear: điều này có thể được giải thích, khi khoảng cách lớn thì thời gian nhận sóng càng bị ảnh hưởng của độ rỗng dư cũng như khung cốt liệu càng nhạy hơn, khi xét đến 4 chỉ tiêu cơ lý trên thì sẽ khử được sai số trên trong quá trình đo bằng thiết bị Matest Ultrasonics. Kết quả như trong Hình 16.



Hình 16. So sánh kết quả giữa mô hình linear (không xét 4 chỉ tiêu cơ lý BTN) và mô hình đề xuất M3, M4 cho CP3.

6. Kết luận và kiến nghị

Từ kết quả phân tích trên mô hình, nghiên cứu đã chỉ ra vai trò quan trọng trong việc xét đến ảnh hưởng của các chỉ tiêu cơ lý của BTN (độ rỗng dư $-r_d$, độ rỗng khung cốt liệu $-V_a$, độ ổn định Mashall $-S$ và chỉ số dẻo Mashall $-F$) đến việc sử dụng thiết bị siêu âm Matest Ultrasonics để xác định chiều dày lớp BTN C12.5.

Với 3 cấp phối đã thực hiện, nghiên cứu đã đề xuất 4 mô hình tương quan để xác định chiều dày lớp BTN từ kết quả đo thiết bị Matest tương ứng cho 3 CP1, CP2, CP3 và tổ hợp 3CP: M1, M2, M3, M4. Các mô hình đề xuất đều cho kết quả tương thích với số liệu thực nghiệm ($R^2 > 0,93$; $p\text{-value} < 6E-7$).

Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu chỉ phù hợp cho BTN C12.5 với hàm lượng nhựa 4,5 %, bột khoáng 8 % và sử dụng đá mỏ Hốc Khế, Bột Khoáng tại Đại Hiệp và chỉ xác định cho mặt đường có 1 lớp BTN.

Để sử dụng được thiết bị Matest Ultrasonic đi xác định chiều dày cho các loại mặt đường BTN khác nhau cần thực hiện thêm nghiên cứu với các hàm lượng nhựa khác nhau, BTN C19 và cho kết cấu mặt đường 2 lớp BTN.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Phạm Duy Hữu, Bê tông Asphalt, Nhà xuất bản Giao thông vận tải, 2008.
- [2]. TCVN 8819-2011, Mặt đường BTN nóng – Thi công và nghiệm thu.
- [3]. TCVN 8820-2011, Hỗn hợp BTN nóng – Thiết kế theo phương pháp Marshall.
- [4]. TCVN 8860-1(12):2011, Bê tông nhựa – Phương pháp thử.
- [5]. V. L. D. A. Freitas, V. H. C. D. Albuquerque, E. D. M. Silva, A. A. Silva, and J. M. R. S. Tavares, “Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, no. 16-17, pp. 4431–4437, 2010.
- [6]. Z. A. Moradian and M. Behnia, “Predicting the uniaxial compressive strength and static Young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test,” *International Journal of Geomechanics*, vol. 9, no. 1, pp. 14–19, 2009
- [7]. M. Asmani, C. Kermel, A. Leriche, and M. Ourak, “Influence of porosity on Young's modulus and poisson's ratio in alumina ceramics,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 21, no. 8, pp. 1081–1086, 2001
- [8]. Töyräs, T. Lyyra-Laitinen, M. Niinimäki et al., “Estimation of the Young's modulus of articular cartilage using an arthroscopic indentation instrument and ultrasonic measurement of tissue thickness,” *Journal of Biomechanics*, vol. 34, no. 2, pp. 251–256, 2001
- [9]. J. Y. Rho, R. B. Ashman, and H. Turner, “Young's modulus of trabecular and cortical bone material: ultrasonic and microtensile measurements,” *Journal of Biomechanics*, vol. 26, no. 2, pp. 111–119, 1993
- [10]. Eryi Hu and Wenjin Wang. The Elastic Constants Measurement of Metal Alloy by Using Ultrasonic Nondestructive Method at Different Temperature. *Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2016, Article ID 6762076, 7p.
- [11]. Pezhouhan T-K, Ilker B., Xuan C., and Mansour S. Application of Ultrasonic Pulse Velocity Testing of Asphalt Concrete Mixtures to Improve the Prediction Accuracy of Dynamic Modulus Master Curve. *ASCE International Conference on Highway Pavements and Airfields*, p.152-164, 2017
- [12]. L. Edwards, H.P. Bell. Comparative evaluation of Nondestructive devices for measuring pavement thickness in the field. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2016.
- [13]. L. Edwards, H.P. Bell,. Comparative evaluation of nondestructive devices for measuring pavement thickness in the field, *Int. J. Pavement Res. Technol.* (2016).
- [14]. S. Krishna Rao, P. Sravana, T. Chandrasekhara Rao, Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of Roller compacted concrete pavement containing Fly Ash and M-sand, *International Journal of Pavement Research and Technology* (2016).