



PREDICTING THE PERMEABILITY OF PERVIOUS CONCRETE BASED ON A DATA-DRIVEN APPROACH

Vu Thai Son¹, Vu Viet Hung², Nguyen Tuan Cuong², Truong Dinh Thao Anh³,
Tran Bao Viet^{4*}

¹Department of Bridges and Highways Engineering, Hanoi University of Civil Engineering, 55 Giai Phong, Hai Ba Trung, Hanoi, Vietnam

²Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications, No. 450-451 Le Van Viet Street, Tang Nhon Phu A Ward, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam

³ Faculty of Civil Engineering, Saigon Technology University, No. 180 Cao Lo Street, Ward 4, District 8, Ho Chi Minh City, Vietnam

⁴University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 15/12/2021

Revised: 18/01/2022

Accepted: 07/02/2022

Published online: 15/02/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.2.7>

* *Corresponding author*

Email: viettb@utc.edu.vn; Tel: +84911451080

Abstract. To increase the permeable capability of surface layers, the permeability should be considered when defining a pervious concrete (PC) mixture proportion. Due to the complexity of the PC structure, the available models in the literature are not enough to predict exactly the permeability coefficient. Therefore, this paper aims to develop a simple analytical model to predict the permeability of the PC from its compositions. In order to achieve this purpose, the two main parts of this study were proposed as follow: (1) A close form solution of the Kozeny – Carman equation-type was carried out to evaluate the relationship permeability-porosity of the pervious concrete structure; (2) A relevant dataset of 195 pervious concrete samples with different mix proportion ratios was built from a large amount of data sources collected from the reputable and open international literature to refine the free parameters of the theoretical model proposed. Then, the present models' predicting permeability of the PC structure from its compositions was compared to independent experimental observation to show the reliability and accuracy of the proposed approach.

Keywords: permeability, porosity, prediction, data, pervious concrete, theoretical model.



XÂY DỰNG CÔNG THỨC DỰ BÁO HỆ SỐ THẨM CỦA BÊ TÔNG RỖNG DỰA TRÊN ĐỊNH HƯỚNG DỮ LIỆU

Vũ Thái Sơn¹, Vũ Việt Hưng², Nguyễn Tuấn Cường², Trương Đình Thảo Anh³,
Trần Bảo Việt^{4*}

¹Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Số 55 Giải Phóng, Hà Nội, Việt Nam

²Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 450-451 Lê Văn Việt, phường Tăng Nhơn Phú A, thành phố Thủ Đức, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Khoa Kỹ thuật Công trình, Trường Đại học Công nghệ Sài Gòn, Số 180 Cao Lỗ, phường 4, quận 8, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁴Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 15/12/2021

Ngày nhận bài sửa: 18/01/2022

Ngày chấp nhận đăng: 07/02/2022

Ngày xuất bản Online: 15/02/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.2.7>

* Tác giả liên hệ

Email: viettb@utc.edu.vn; Tel: +84911451080

Tóm tắt. Việc xác định hệ số thẩm đóng vai trò quan trọng trong quá trình thiết kế thành phần của bê tông xi măng rỗng nhằm đảm bảo khả năng thoát nước của lớp mặt phủ. Do sự phức tạp của cấu trúc bê tông rỗng, các mô hình dự báo hệ số thẩm cho vật liệu này chưa thực sự hiệu quả. Vì vậy, bài báo có mục tiêu thiết lập một mô hình giải tích đơn giản nhằm dự báo hệ số thẩm của bê tông xi măng rỗng. Để thực hiện mục tiêu này, hai nội dung chính của nghiên cứu đã được triển khai như sau: (1) thiết lập dạng xấp xỉ của phương trình thẩm Kozeny– Carman cho vật liệu bê tông xi măng rỗng; (2) xây dựng tập dữ liệu gồm 195 mẫu bê tông rỗng với các tỷ lệ hỗn hợp khác nhau được tổng hợp từ các tài liệu quốc tế mở và có uy tín để chuẩn hóa các tham số của phương trình. Thông qua các ví dụ cho các kết quả thí nghiệm độc lập, mô hình đề xuất chứng tỏ được hiệu quả trong việc dự báo hệ số thẩm của bê tông xi măng rỗng dựa vào tỉ lệ thành phần vật liệu.

Từ khóa: hệ số thẩm, độ rỗng, dự báo, dữ liệu, bê tông rỗng, mô hình lý thuyết.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống thoát nước đô thị bền vững (Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS) đã được nghiên cứu rộng rãi trong vài thập kỷ qua nhằm giải quyết các vấn đề thoát nước đô thị do quá trình đô thị hóa (do tăng diện tích bề mặt không thấm nước như bê tông hóa đường giao thông, bãi đậu xe và các công trình xây dựng) và mối đe dọa ngày càng tăng của sự nóng lên toàn cầu (lượng mưa đột xuất lớn hơn). Dựa trên ý tưởng của hệ thống thoát nước tự nhiên, SUDS trực tiếp và nhanh chóng thoát lượng nước mặt do mưa trong lớp móng hoặc cung cấp nước mưa cho quá trình thấm một phần hay toàn bộ nước mặt xuống tầng nước ngầm. Ngoài ra, phương pháp này kiểm soát về thời gian quá trình thoát nước mưa đến một vị trí khác (các điểm xả, v.v). Nhiều hệ thống thoát nước đô thị bền vững đã được thiết kế cho các khu vực địa lý cụ thể khác nhau trên thế giới, tùy thuộc vào loại mặt đường thấm (bê tông rỗng, gạch tự chèn, v.v) và các đặc tính của dòng chảy mặt [1].

Bê tông xi măng rỗng thoát nước (BTR) đóng một vai trò quan trọng trong SUDS, phục vụ với mục đích kép vừa là công cụ quản lý nước mưa, đồng thời cũng là bề mặt chịu tải trọng khai thác nhẹ/trung bình (đường nội bộ, đường đi bộ và xe đạp, bãi đỗ xe, vỉa hè, v.v). BTR là một loại bê tông đặc biệt được đặc trưng bởi cấu trúc lỗ rỗng liên kết và có độ rỗng cao, thường dao động từ 15 ÷ 35% theo thể tích, tương ứng với khả năng thấm hiệu quả lên đến 6 mm/s. Các lớp phủ mặt được chế tạo từ BTR có nhiều ưu điểm so với bê tông thông thường như: giảm nguy cơ ngập lụt, tiếng ồn giao thông, nhiệt độ bề mặt, cải thiện mực nước ngầm, chi phí thấp, v.v. Tuy nhiên, một số đánh giá cũng thảo luận về những khó khăn chính của việc sử dụng BTR trong thực tế, bao gồm hiện tượng tắc nghẽn, độ bền lâu dài và thiết kế tỷ lệ hỗn hợp tối ưu [2].

Để xác định tỷ lệ hỗn hợp BTR, thông thường cần dựa trên giá trị mục tiêu của độ rỗng thiết kế. Sau đó, hai tính chất cơ bản của BTR là cường độ và độ thấm được xác định hoặc thông qua công việc thực nghiệm hoặc ước tính dựa trên một số mô hình dự báo. Nhìn chung do ảnh hưởng của cấu trúc không gian ngẫu nhiên của BTR, nên việc dự báo các tính chất cơ lý và thủy lực của BTR là khá khó khăn, và vẫn đang là chủ đề thu hút được nhiều sự quan tâm thông qua các công bố quốc tế gần đây. Hướng tiếp cận đơn giản nhất trong việc dự báo độ thấm của BTR là dựa trên hàm thực nghiệm. Do mối liên hệ tự nhiên giữa độ thấm và độ rỗng (độ rỗng càng cao thì độ thấm càng lớn, và ngược lại) nên các hàm thực nghiệm thường có dạng hàm mũ / lũy thừa / đa thức của độ rỗng kết hợp với một số thông số ảnh hưởng khác. Một danh sách 34 mô hình thực nghiệm được liệt kê bởi Ahmed và các cộng sự [3]. Các hàm giải tích thực nghiệm này chỉ đại diện cho tập dữ liệu thí nghiệm có sẵn và ít mang giá trị dự báo thực sự.

Một hướng tiếp cận giải tích chi tiết hơn là dựa trên phương trình lý thuyết xây dựng từ việc giải bài toán Darcy cho không gian hình học đơn giản hóa. Từ các kết quả được công bố trước đây, mô hình Kozeny – Carman có nhiều ưu thế trong hướng tiếp cận này. Mô hình này cho phép xác định hệ số thấm dựa vào độ rỗng, độ rỗng, diện tích khối bề mặt và một vài thông số khác. Tuy vậy, việc xác định độ rỗng và diện tích khối bề mặt là thách thức rất lớn. Hướng tiếp cận nói chung trong khoảng một thập kỷ trở lại đây từ các nghiên cứu của Neithalar và cộng sự [4] là sử dụng công nghệ XRT (X-Ray tomography) để xác định trực tiếp hoặc đưa ra các luật phân bố xác suất cho các thông số trên. Do kỹ thuật khá phức tạp nên việc áp dụng thực tế các mô hình theo hướng này cũng là thách thức.

Theo hướng tiếp cận số cũng có một số nghiên cứu thực hiện. Do cấu trúc hạt của BTR, Peralisia và các cộng sự [5] phát triển mô hình phần tử rời rạc (DEM). Nhược điểm lớn nhất

của DEM là có quá nhiều thông số cần điều chỉnh để có thể mô tả chính xác kết cấu vật liệu. Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) cũng được sử dụng để mô hình bài toán thông qua nghiên cứu của Akand và các cộng sự [6], tuy nhiên việc sử dụng phần tử hữu hạn để mô hình cấu trúc hạt của BTR là câu hỏi cần được tranh luận tiếp và chưa có nhiều các công bố theo hướng này. Một nghiên cứu khác khá chi tiết kết hợp XRT với kỹ thuật xử lý hình ảnh và mô hình thể tích hữu hạn (finite-volume computational fluid dynamics permeability simulation) đã được thực hiện gần đây bởi Ong và các cộng sự [7]. Mô hình số này cho phép giải các bài toán dòng chảy phức tạp, và tính toán tác nghẽn.

Trước các khó khăn từ các mô hình truyền thống, hai mô hình tính toán thông minh (Computational Intelligence) hay trí tuệ nhân tạo để dự đoán hệ số thấm của BTR cũng đã được đề xuất. Mô hình thứ nhất của Sun và các cộng sự [8] đã chuẩn bị 90 mẫu BTR với ba biến đầu vào, đó là tỷ lệ nước / xi măng (từ 0,25 ÷ 0,5), tỷ lệ cốt liệu / xi măng (từ 2,5 ÷ 4,5) và kích cỡ cốt liệu (3,75 mm; 7,5 mm, và 13 mm) với cùng một điều kiện chế tạo bê tông. Tuy vậy, các câu hỏi từ nghiên cứu này là độ rỗng vật liệu không được xem xét như một thông số đầu vào và sự không đa dạng nguồn dữ liệu. Nghiên cứu thứ hai là của Huang và các cộng sự [9] với số lượng mẫu ít và không đa dạng cũng là câu hỏi tương tự đặt ra cho nghiên cứu này.

Như vậy, theo đánh giá ngắn ở trên, mô hình dự báo hệ số thấm cho BTR trong cả hai trường hợp mô hình thí nghiệm chi tiết cũng như công thức đại trà sử dụng cấp độ kỹ sư đều là những thách thức chưa được giải quyết triệt để. Nội dung chính bài báo này là hướng tới công thức giải tích đơn giản, hiệu quả cho phép ước lượng ban đầu hệ số thấm của vật liệu BTR. Để thực hiện nhiệm vụ không đơn giản này, chiến lược nghiên cứu được đề ra là: (1) xây dựng lại hàm giải tích cơ bản; (2) xây dựng tập dữ liệu phù hợp; (3) xây dựng hàm hồi quy xấp xỉ một số thông số từ hàm giải tích dựa trên định hướng dữ liệu. Kết quả đạt được sẽ là công thức giải tích đơn giản để xác định hệ số thấm từ thông tin cơ bản của cấp phối vật liệu, đồng thời là cơ sở để xây dựng mô hình phức tạp hơn trong tương lai.

2. XÂY DỰNG CƠ SỞ DỮ LIỆU

Để chuẩn bị cơ sở dữ liệu thử nghiệm, 195 mẫu BTR với các tỷ lệ hỗn hợp khác nhau đã được xem xét và tổng hợp từ các tài liệu quốc tế mở, có uy tín [10–20]. Các nghiên cứu trước đây đã công nhận rộng rãi rằng độ thấm của BTR chủ yếu phụ thuộc vào đặc tính của lỗ rỗng (như giá trị độ rỗng, kích thước lỗ rỗng, sự liên kết / liên thông của các lỗ rỗng,...) và đặc điểm của dòng chảy trong hệ thống các lỗ rỗng này, do đó phụ thuộc nhiều vào thành phần cấp phối thiết kế của vật liệu. Trong nghiên cứu này, một tập dữ liệu BTR được lấy từ nhiều nguồn mẫu BTR khác nhau, được sản xuất với nhiều tỷ lệ khối lượng cốt liệu trên xi măng hay chất kết dính (AC), kích thước cỡ hạt lớn nhất danh định (MS) của cốt liệu thô, tỷ lệ khối lượng nước trên xi măng hay chất kết dính (WC) và hai thông số quan trọng của loại vật liệu này là độ rỗng hữu hiệu (ϕ) và hệ số thấm (K). Đặc tính thấm của BTR thường được điều tra trong phòng thí nghiệm bằng cách sử dụng thiết bị đo thấm với chiều cao cột nước thay đổi [10,11,14,16–20] và / hoặc thiết bị thấm với chiều cao cột nước không đổi [12,13,15]. Trong đó, giá trị độ thấm thu được bởi phương pháp đo với cột nước không đổi thường cho kết quả lớn hơn so với phương pháp sử dụng cột nước thay đổi [21]. Trong phạm vi cơ sở dữ liệu này, kết quả hệ số thấm của BTR thu được từ các nghiên cứu trước đây từ các mẫu BTR có kích thước khác nhau (trụ D100xH200 [13,15,20], D100xH100 [11], D100xH50 [12], D100xH150 [16], D150xH75 [17], D150xH150 [14], D75xH75 [18,19], lập phương 100x100x100 [10]), và gradient thủy lực khác nhau [10,20].

Bên cạnh đó, độ rỗng hữu hiệu của mỗi mẫu, còn được gọi là độ rỗng hở / liên kết, được đo bằng cách sử dụng phương pháp đo thể tích chiếm chỗ, dựa trên các khối lượng cân trong nước và khối lượng khô của mẫu bê tông được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C1754; thường được sử dụng trong thực tế do phương pháp đơn giản, đáng tin cậy và nhanh chóng. Nói chung, độ rỗng trong mẫu BTR có thể được phân loại thành hai loại: độ rỗng liên kết / hở và độ rỗng không liên kết / cô lập. Do đó, tổng độ rỗng của loại bê tông này là tổng của hai thành phần: độ rỗng hở và độ rỗng cô lập. Khác với độ rỗng hữu hiệu, độ rỗng tổng thường được xác định dựa trên phương pháp phân tích hình ảnh (chụp cắt lớp). Theo kết quả tổng quan tài liệu của nhóm tác giả, giá trị độ rỗng tổng thường lớn hơn nhưng không đáng kể so với độ rỗng hữu hiệu [12,22,23]. Điều này là do một số lỗ rỗng cô lập bên trong mẫu không được tính đến khi dựa trên phương pháp xác định khối lượng của mẫu đo trong nước, tuy nhiên chúng có thể được xác định thông qua quá trình chụp và xử lý ảnh. Ngoài ra, việc xác định độ rỗng tổng của BTR rất phức tạp, tốn nhiều thời gian và yêu cầu các thiết bị / chương trình đặc biệt [12,23]. Cần lưu ý rằng, độ rỗng tổng được coi là ảnh hưởng chủ yếu đến cường độ của BTR, cụ thể như bê tông càng rỗng thì cường độ càng giảm và ngược lại. Trong khi đó, độ thấm, một trong những đặc điểm nổi bật của vật liệu thân thiện môi trường này, chủ yếu phụ thuộc vào đặc tính của lỗ rỗng liên kết/hở. Do đó, độ rỗng hữu hiệu đã được sử dụng trong nghiên cứu này.

Cơ sở dữ liệu thu được chứa thông tin bao gồm AC, WC, MS, độ rỗng hữu hiệu (ϕ) và hệ số thấm thủy lực (K) của BTR. Cần lưu ý rằng hệ số thấm và độ rỗng của BTR trong tập dữ liệu này thay đổi từ 0,1 đến 32,7 mm/s, và 10 đến 40%, trong khi hệ số thấm điển hình của BTR có thể dao động từ 1,4 đến 12,2 mm/s với độ rỗng thông thường là 15 đến 35 % [24]. Các thông số thống kê của cơ sở dữ liệu được thể hiện chi tiết trong Bảng 1.

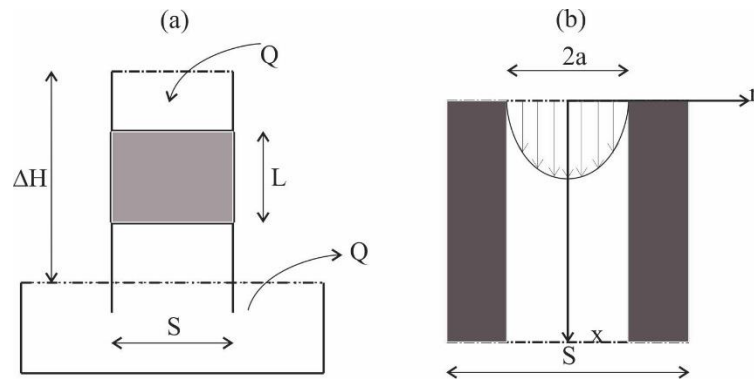
Bảng 1. Các thông số thống kê của cơ sở dữ liệu thu thập.

Thông số	Đơn vị	Trung bình	Min.	Max.	Khuyến nghị theo ACI 522R, 2010 [24]
AC	-	4,66	3,03	12,00	4,0-4,5
WC	-	0,3	0,22	0,40	0,27-0,34
MS	mm	11,0	4,5	19,0	9,5-19,0
ϕ	%	28,6	10,0	40,0	15-35
K	mm/s	13,1	0,1	32,7	1,4-12,2

3. PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH DỰ BÁO

Trong lĩnh vực địa kỹ thuật, hệ số thấm thủy lực hoặc / và hệ số thấm đặc trưng có thể được dự báo dựa trên các quan hệ thực nghiệm, mô hình xác suất hoặc các mô hình lý thuyết về dòng chảy. Khác với vật liệu chế tạo công nghiệp (ví dụ: composite) có cấu trúc vật liệu khá đồng nhất, vật liệu địa kỹ thuật nói chung (đất, đá, vật liệu gốc xi măng...) thường có cấu trúc không gian khá phức tạp, do đó các mô hình dự báo lý thuyết các tính chất cơ lý thường được phát triển từ các bài toán lý thuyết đơn giản, sau đó cải tiến dựa trên các xấp xỉ thực nghiệm để phản ánh tốt hơn các kết quả thực tế. Phương trình dự báo hệ số thấm Kozeny – Carman cũng được xây dựng theo xu hướng như vậy. Bắt đầu từ các nghiên cứu của Kozeny

1927 [25], của Carman 1937 [26], Carman 1956 [27] về dòng chảy tĩnh trong kênh hở, một số dạng khác nhau của phương trình Kozeny – Carman đã được đề xuất để xác định hệ số thấm thủy lực / thấm đặc trưng của vật liệu địa kỹ thuật. Trong phần này, đầu tiên nhóm tác giả thiết lập phương trình Kozeny – Carman một cách tóm lược nhất, sau đó đề xuất một số các dạng phương trình mới phù hợp với đặc điểm của vật liệu bê tông rỗng.



Hình 1. Mô tả lý thuyết: (a) thí nghiệm thấm Darcy; (b) dòng chảy 1 chiều Poiseuil.

Với bài toán 1 chiều dòng chảy tĩnh (Hình 1 (a)), phương trình cơ bản Darcy được viết dưới dạng như sau:

$$q = \frac{Q}{S} = K \frac{\Delta H}{L} \quad (1)$$

trong đó Q là lưu lượng (m^3/s) dòng chảy qua khối vật chất có mặt cắt ngang S (m^2), chiều cao L (m) được tạo bởi áp lực nước ΔH . Theo một hướng tiếp cận lý thuyết, khi xem xét một dòng chảy qua kênh trụ tròn có bán kính a , vận tốc dòng chảy sẽ phụ thuộc vào hệ số nhớt vật liệu, và gradient thủy lực bởi lời giải Poiseuil như sau (Hình 1 (b)):

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dx} (a^2 - r^2) \quad (2)$$

Lưu lượng dòng chảy lý thuyết qua mặt cắt ngang sẽ được xác định dựa trên phép tính tổng:

$$q = \frac{Q}{S} = -\frac{1}{\mu} \frac{\pi a^4}{8S} \frac{dP}{dx} = \frac{\rho g \pi a^4 \Delta H}{\mu 8S L} \quad (3)$$

Cân bằng 2 phương trình lý thuyết và thực nghiệm của dòng chảy tĩnh một chiều, ta thu được công thức xác định hệ số thấm thủy lực K (m/s) và hệ số thấm đặc trưng k (m^2):

$$K = \frac{\rho g \pi a^4}{\mu 8S} = \frac{\rho g}{\mu} k, \quad k = \frac{\pi a^4}{8S} \quad (4)$$

Cần nhấn mạnh rằng hệ số thấm đặc trưng là đại lượng chỉ phụ thuộc vào cấu trúc vật liệu trong khi hệ số thấm thủy lực phụ thuộc cả vào chất lỏng truyền qua và điều kiện môi trường. Trong hệ đơn vị SI, ở điều kiện thông thường đối với chất lỏng là nước, ta có thể chấp nhận rằng $K = 10^7 k$ ($g = 10m^2/s, \rho = 1000Kg/m^3, \mu = 10^{-3}N/m^2 \cdot s$).

Với dòng chảy trong môi trường rỗng, độ rỗng đóng vai trò quan trọng, thể hiện độ phức tạp của dòng chảy. Trong trường hợp đơn giản, hệ số rỗng τ được định nghĩa là tỉ số giữa chiều dài thực của dòng chảy với khoảng cách giữa 2 đầu (chiều dài khối vật liệu - trong bài toán này). Khi đó ta có thể thiết lập công thức tính độ rỗng của môi trường như sau:

$$\phi = \frac{\pi a^2 \tau}{S} \quad (5)$$

Ngoài ra, nếu gọi s là tỉ số khối bề mặt (diện tích lỗ rỗng trên đơn vị thể tích môi trường), ta có:

$$s = \frac{2\pi a L \tau}{SL} = \frac{2\phi}{a} \quad (6)$$

Thay (5, 6) vào (4), ta thu được dạng cơ bản của Phương trình Kozeny – Carman cho dòng chảy tĩnh trong ống trụ tròn:

$$K = \frac{\rho g}{\mu} \frac{\phi^3}{2s^2 \tau^2} \quad (7)$$

Dựa trên phương trình cơ bản này, một số công thức bán thực nghiệm đã được phát triển cho các dạng vật liệu khác nhau. Đối với vật liệu bê tông rỗng, đầu tiên chúng ta giả thiết là dạng vật liệu hạt gồm các hình cầu đường kính d , khi đó tỉ số khối bề mặt có thể được tính bởi:

$$s = \frac{6(1-\phi)}{d} \quad (8)$$

Thay vào phương trình cơ bản, ta thu được:

$$K = \frac{\rho g}{\mu} \frac{\phi^3 d^2}{72(1-\phi)^2 \tau^2} \quad (9)$$

Để tính đến cấu trúc tự nhiên của vật liệu bê tông rỗng và ngưỡng tắc, ta đưa vào phương trình trên hệ số tự do A và độ rỗng ϕ_p là giá trị tại đó hiện tượng thấm bắt đầu xảy ra. Cuối cùng, ta thu được phương trình bán thực nghiệm xác định hệ số thấm thủy lực của vật liệu bê tông rỗng:

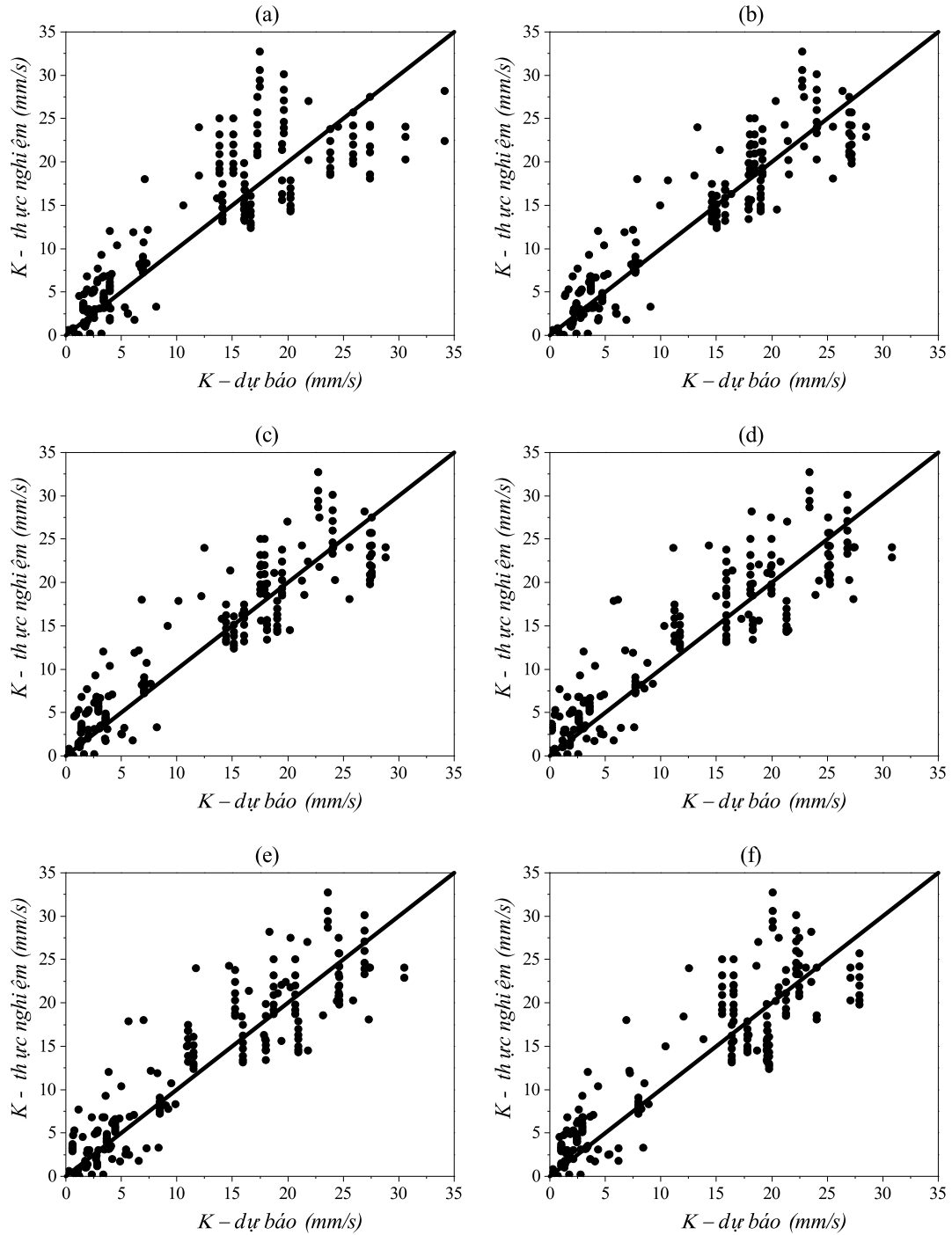
$$K = \frac{(\phi - \phi_p)^3 d^2}{(1 - \phi + \phi_p)^2} A, \text{ với } A = \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{72\tau^2}. \quad (10)$$

4. KẾT QUẢ VÀ ĐÁNH GIÁ PHÂN TÍCH

4.1. Đề xuất mô hình

Nhiệm vụ của phần này là dựa trên tập dữ liệu đã xây dựng, đánh giá khả năng sử dụng phương trình lý thuyết đã phát triển ở trên, từ đó đề xuất một số áp dụng cụ thể. Để đảm bảo khả năng dễ áp dụng thực tế của giải pháp nghiên cứu, chúng tôi sử dụng đơn vị hệ số thấm thủy lực là (mm/s), kích thước hạt cốt liệu d (mm). Dễ dàng nhận thấy, xét về mặt thứ nguyên vật lý phương trình (10) tương thích với hệ số thấm đặc trưng của vật liệu khi coi A là thông số không thứ nguyên. Trong trường hợp hệ số thấm thủy lực, có thể coi thứ nguyên của A là (1/mm.s) đến tự hệ số $(\rho g/\mu)$. Tuy vậy việc quy đổi này không ảnh hưởng tới quá trình ước tính hệ số của phương trình.

Dựa vào dữ liệu xây dựng ở Mục 2, sáu dạng phương trình đã được đề xuất tại Bảng 2, kèm theo là các hệ số xác định R2 tương ứng. Tại Hình 2, các đồ thị tương quan giữa giá trị thí nghiệm và giá trị dự báo của các mô hình được giới thiệu. Ký hiệu (a-f) tương ứng với số mô hình từ (1-6).



Hình 2. So sánh kết quả dự báo và kết quả thực nghiệm của các mô hình đề xuất.

Cũng cần nhấn mạnh rằng, 06 dạng mô hình đề xuất này đã được nhóm nghiên cứu chọn lọc từ rất nhiều các phương án khác nhau thông qua việc tính toán và so sánh hệ số xác định R2 giữa tệp dữ liệu và kết quả dự báo. Quá trình tính toán được thực hiện trên các công cụ xử lý dữ liệu dạng bảng (Excel hoặc mô đun Pandas của ngôn ngữ PYTHON). Việc tính toán, lựa chọn không quá phức tạp nhưng cần thời gian tính. Ngoài ra, để lựa chọn dạng hàm phù hợp được hỗ trợ bởi mô đun “Statistics” của phần mềm MAPLE. Kết quả thu được cho thấy là tham số A phụ thuộc các thông số đầu vào WC, AC, MS dựa trên các hàm đa thức cho kết

quả tốt hơn là các hàm phi tuyến dạng lũy thừa phức tạp hay được sử dụng. Kết quả này khá trùng khớp với kết luận tính toán của Abdelhady và các cộng sự [3].

4.2. Đánh giá mô hình

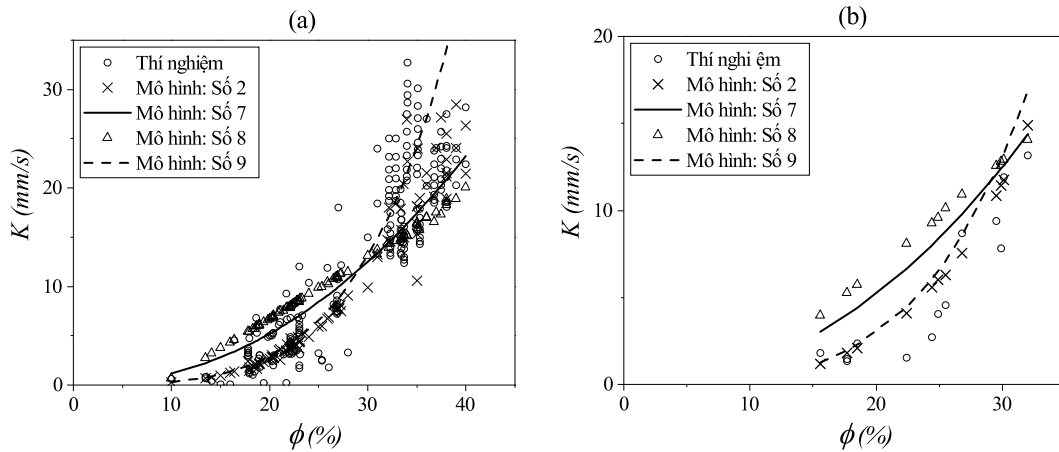
Bảng 2. Mô hình dự báo hệ số thấm thủy lực của bê tông rỗng.

(Ghi chú: CA=1/AC; ϕ tính theo giá trị %.)

Mô hình	Công thức	Hệ số xác định R2	
		Dữ liệu tổng hợp	Montes và cộng sự [28]
Số 1 – Đề xuất	$K = \frac{(\phi)^3}{(100-\phi)^2} 1,92$	0,73	-
Số 2 – Đề xuất	$K = \frac{(\phi)^3}{(100-\phi)^2} (-0,3WC + 0,093MS + 2,4CA + 43,5CA^2 - 126,18CA^3)$	0,86	0,81
Số 3 – Đề xuất	$K = \frac{(\phi-0,05)^3}{(100-\phi+0,05)^2} (0,98WC + 0,17MS - 8,53CA + 161,7CA^2 - 371,12CA^3)$	0,83	-
Số 4 – Đề xuất	$K = \frac{(\phi-0,05)^3 MS^2}{(100-\phi+0,05)^2} (0,086WC - 0,0037MS + 0,39CA - 0,71CA^2 + 0,061CA^3)$	0,8	-
Số 5 – Đề xuất	$K = \frac{(\phi)^3 MS^2}{(100-\phi)^2} (0,038WC - 0,0019MS + 0,26CA - 0,68CA^2 + 0,54CA^3)$	0,81	-
Số 6 – Đề xuất	$K = \frac{(\phi-0,05)^3}{(100-\phi+0,05)^2} (5,48WC - 7,43CA - 183,8CA^2 - 440,69CA^3)$	0,78	-
Số 7 – Abdelhady [3]	$K = 0,008\phi^{2,1621}$	0,75	0,34
Số 8 – Abdelhady [3]	$K = 0,603\phi + 0,1498AC + 2,051WC - 6,545$	0,65	-
Số 9 – Abdelhady [3]	$K = \frac{(\phi)^3}{(100-\phi)^2} 2,38$	0,56	0,61

Đối với các nghiên cứu xây dựng mô hình dựa trên định hướng dữ liệu, việc đánh giá kết quả thu được đóng vai trò quan trọng. Trong phần này, 06 mô hình đề xuất trong nghiên cứu này được so sánh với kết quả đề xuất gần đây bởi Abdelhady và các cộng sự [3]. Trong nghiên cứu này, Abdelhady và các cộng sự đã tổng hợp 504 dữ liệu (từ 2016 đến 2021) của hệ số thấm thủy lực của bê tông rỗng kèm theo thông số từ độ rỗng có hiệu, tỉ lệ nước / chất kết dính WC và tỉ lệ cốt liệu / chất kết dính AC. Đồng thời, nhóm nghiên cứu này đã tổng hợp và

giới thiệu 34 mô hình dự báo hệ số thấm của bê tông rỗng đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây. Theo nhận xét của nhóm tác giả, đây là nghiên cứu đầy đủ nhất cho đến nay về số liệu thí nghiệm và mô hình dự báo hệ số thấm của bê tông rỗng. Trên cơ sở tập dữ liệu này, nhóm nghiên cứu của Abdelhady đã đề xuất ba mô hình tốt nhất (mô hình Số 7, 8, 9 trong Bảng 2).



Hình 3. Đánh giá mô hình.

Trên Hình 3, mối quan hệ giữa hệ số thấm thủy lực và độ rỗng được thể hiện cho các tập dữ liệu tổng hợp (Hình 3 (a)) và tập dữ liệu kiểm chứng độc lập của Montes và cộng sự [28] (Hình 3 (b)). Tại Hình 3, mô hình Số 2 được so sánh với các mô hình Số 7, 8, 9.

4.3. Phân tích kết quả

Dựa trên kết quả thu được, một số nhận xét được rút ra như sau:

Dạng phương trình Kozeny – Carman cơ bản với một tham số tự do A (được áp dụng gần đây bởi [20]) đem lại hiệu quả không thực sự tốt (mô hình Số 1 và Số 9). Việc thêm các thông tin đầu vào là hướng phát triển phù hợp trong hướng nghiên cứu này. Tuy nhiên, việc đưa thêm ngưỡng ϕ_p trong phương trình Kozeny – Carman như đề xuất của [29] cho vật liệu địa kỹ thuật nói chung là không cần thiết với bê tông rỗng. Mặt khác, vai trò của kích thước hạt cốt liệu là cần thiết trong mô hình dự báo. Trong nghiên cứu này, kích thước hạt lớn nhất được sử dụng, và là thông số dễ xác định nhất khi tập hợp dữ liệu. Kết quả thu được cho thấy vai trò của MS trong công thức xác định hệ số tỉ lệ A (mô hình Số 6 có kết quả thấp nhất khi so với mô hình Số 2-5). Tuy vậy, khi thay MS cho kích thước hạt trung bình trong phương trình Kozeny – Carman, kết quả không thực sự tốt (mô hình Số 3, 4). Điều đó chứng tỏ kích thước hạt có tương quan với độ rỗng, nhưng không có tương quan với kích thước qui đổi trung bình của vật liệu trong phương trình lý thuyết. Đánh giá một cách tổng thể về kết quả so sánh trên tập dữ liệu và phân tích lý thuyết, mô hình Số 2 có ưu thế đối với 5 mô hình còn lại. Nghiên cứu đề xuất sử dụng mô hình Số 2 như là cơ sở để cho các tính toán tiếp theo.

Việc so sánh với kết quả thực nghiệm độc lập của Montes và cộng sự [28] chứng tỏ khả năng của mô hình. Cần nhấn mạnh thêm rằng, số liệu của [28] nằm ngoài hai tập dữ liệu của nghiên cứu này và của Abdelhady và các cộng sự [3]. Từ Hình 3, dễ dàng nhận thấy khi có tập dữ liệu càng dày việc dự báo hệ số thấm chỉ dựa trên duy nhất hệ số rỗng (mô hình Số 7) không thể hiện ưu thế. Điều này ngược lại với kết luận của Abdelhady khi đề xuất sử dụng mô

hình lũy thừa cho việc dự báo hệ số thấm. Thêm nữa, các mô hình từ gốc phương trình lý thuyết cho phép thỏa mãn các điều kiện vật lý cơ bản của bài toán, trong khi mô hình thực nghiệm thuần túy như trong đề xuất của Abdelhady và các cộng sự [3] sẽ không thỏa mãn. Cụ thể như, hệ số xác định của mô hình Số 7, 8, 9 với tập dữ liệu mới được xây dựng bởi nghiên cứu này khá đồng nhất với kết quả trong công bố gốc. Điều đó chứng tỏ hiệu quả nhất định của các mô hình Số 7, 8, 9. Ở đây cần nhấn mạnh 2 điểm: (1) dữ liệu của nghiên cứu này và của Abdelhady và các cộng sự [3] là độc lập; (2) dữ liệu của Abdelhady và các cộng sự không được công khai vì vậy nhóm nghiên cứu chưa có điều kiện kiểm tra chéo lại hiệu quả của mô hình đề xuất (mô hình Số 2). Do đó, dù thể hiện tốt hơn qua các kết quả đối chứng, được thiết lập từ phương trình lý thuyết và thêm các tham số đầu vào, chưa thể khẳng định hoàn toàn mô hình đề xuất bởi nghiên cứu này tốt hơn so với các mô hình đã đề xuất. Một cách tổng thể, kết quả nghiên cứu tại Abdelhady và các cộng sự [3] và nghiên cứu này vẫn có thể được hoàn thiện thêm thông qua một tập dữ liệu đầy đủ hơn, và các phương pháp tính toán hiện đại hơn.

5. KẾT LUẬN

Việc dự báo hệ số thấm của bê tông rỗng là công việc khó khăn. Cho tới hiện tại, một số hướng tiếp cận đã được triển khai, tuy vậy vẫn chưa thực sự hiệu quả vượt trội. Hướng tiếp cận trong việc xây dựng mô hình tại nghiên cứu này có hai điểm đặc biệt: (1) dựa trên phương trình lý thuyết, điều này cho phép kết quả thu được phù hợp các điều kiện vật lý căn bản; (2) có sự kết hợp với các thông số thực nghiệm đầu vào để tăng hiệu quả nghiên cứu. Kết quả chính đạt được của bài báo này là xây dựng được một công thức đơn giản cho phép dự báo hệ số thấm của vật liệu bê tông rỗng từ các thông tin cơ bản của cấp phối và độ rỗng. Đồng thời, kết quả thu được có sự đối chiếu với các kết quả lý thuyết và thực nghiệm khác đảm bảo độ tin cậy. Việc làm giàu thêm bộ dữ liệu từ đó đưa ra các kết quả thuyết phục hơn nữa, và kiểm chứng thực nghiệm là hướng nghiên cứu tiếp theo của bài báo này.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo Việt Nam trong đề tài mã số B2020-GHA-07.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. B. Ferguson, Porous Pavements, 0 ed., CRC Press, 2005.
- [2]. R. Zhong, Z. Leng, C. Poon, Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review, *Constr. Build. Mater.*, 183 (2018) 544–553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131>
- [3]. A. Abdelhady, L. Hui, H. Zhang, Comprehensive study to accurately predict the water permeability of pervious concrete using constant head method, *Constr. Build. Mater.*, 308 (2021) 125046. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125046>
- [4]. O. Deo, N. Neithalath, Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features, *Mater. Sci. Eng. A.*, 528 (2010) 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.024>
- [5]. R. Peralisi, S.H.P. Cavalaro, A. Aguado, Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete, *Cem. Concr. Res.*, 102 (2017) 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.009>
- [6]. L. Akand, M. Yang, Z. Gao, Characterization of pervious concrete through image based micromechanical modeling, *Constr. Build. Mater.*, 114 (2016) 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.005>

- [7]. G.P. Ong, A. Jagadeesh, Y.-M. Su, Effect of pore network characteristics on non-Darcy permeability of pervious concrete mixture, *Constr. Build. Mater.*, 259 (2020) 119859. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119859>
- [8]. J. Sun, J. Zhang, Y. Gu, Y. Huang, Y. Sun, G. Ma, Prediction of permeability and unconfined compressive strength of pervious concrete using evolved support vector regression, *Constr. Build. Mater.*, 207 (2019) 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.117>
- [9]. J. Huang, T. Duan, Y. Zhang, J. Liu, J. Zhang, Y. Lei, Predicting the Permeability of Pervious Concrete Based on the Beetle Antennae Search Algorithm and Random Forest Model, *Adv. Civ. Eng.*, 2020 (2020) 8863181. <https://doi.org/10.1155/2020/8863181>
- [10]. X. Yang, J. Liu, H. Li, Q. Ren, Performance and ITZ of pervious concrete modified by vinyl acetate and ethylene copolymer dispersible powder, *Constr. Build. Mater.*, 235 (2020) 117532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117532>
- [11]. A. Rezaei Lori, A. Bayat, A. Azimi, Influence of the replacement of fine copper slag aggregate on physical properties and abrasion resistance of pervious concrete, *Road Mater. Pavement Des.*, (2019) 1–17. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1648311>
- [12]. H. Zhou, H. Li, A. Abdelhady, X. Liang, H. Wang, B. Yang, Experimental investigation on the effect of pore characteristics on clogging risk of pervious concrete based on CT scanning, *Constr. Build. Mater.*, 212 (2019) 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.310>
- [13]. W. Yeih, J.J. Chang, The influences of cement type and curing condition on properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag as aggregates, *Constr. Build. Mater.*, 197 (2019) 813–820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.178>
- [14]. K.S. Elango, V. Revathi, Fal-G Binder Pervious Concrete, *Constr. Build. Mater.*, 140 (2017) 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.086>
- [15]. A. Ibrahim, E. Mahmoud, M. Yamin, V.C. Patibandla, Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties, *Constr. Build. Mater.*, 50 (2014) 524–529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>
- [16]. S. Asadi, M.M. Hassan, J.T. Keavern, T.D. Rupnow, Development of Photocatalytic Pervious Concrete Pavement for Air and Storm Water Improvements, *Transp. Res. Rec.*, 2290 (2012) 161–167. <https://doi.org/10.3141/2290-21>
- [17]. X. Shu, B. Huang, H. Wu, Q. Dong, E.G. Burdette, Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2011) 3187–3192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.002>
- [18]. J. Keavern, V. Schaefer, K. Wang, M. Suleiman, Pervious Concrete Mixture Proportions for Improved Freeze-Thaw Durability, *J. ASTM Int.*, 5 (2008) 1–12. <https://doi.org/10.1520/JAI101320>
- [19]. K. Wang, V. Schaefer, J. Keavern, Development of Mix Proportion for Functional and Durable Pervious Concrete, in: 2006.
- [20]. A.K. Chandrappa, K.P. Biligiri, Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach, *Constr. Build. Mater.*, 123 (2016) 627–637. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.035>
- [21]. Y. Qin, H. Yang, Z. Deng, J. He, Water Permeability of Pervious Concrete Is Dependent on the Applied Pressure and Testing Methods, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2015 (2015) 404136. <https://doi.org/10.1155/2015/404136>
- [22]. F. Yu, D. Sun, M. Hu, J. Wang, Study on the pores characteristics and permeability simulation of pervious concrete based on 2D/3D CT images, *Constr. Build. Mater.*, 200 (2019) 687–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.135>
- [23]. V.V. Hung, S.-Y. Seo, H.-W. Kim, G.-C. Lee, Permeability and Strength of Pervious Concrete According to Aggregate Size and Blocking Material, *Sustainability*, 13 (2021). <https://doi.org/10.3390/su13010426>

- [24]. ACI Committee 522, 522R-10: Report on Pervious Concrete, Tech. Doc, 2010.
- [25]. Kozeny, J., Uber kapillare Leitung des Wassers im Boden, R. Acad. Sci., Vienna Proc Cl. I., 136 (1927) 271–306.
- [26]. P.C. Carman, Fluid flow through granular beds, Chem. Eng. Res. Des., 75 (1997) S32–S48. [https://doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80003-2)
- [27]. P.Crosbie. Carman, Flow of gases through porous media., Academic Press, New York, 1956.
- [28]. F. Montes, L. Haselbach, Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete, Environ. Eng. Sci., 23 (2006) 960–969. <https://doi.org/10.1089/ees.2006.23.960>
- [29]. G. Mavko, A. Nur, The effect of a percolation threshold in the Kozeny- Carman relation, Geophysics., 62 (1997) 1480–1482. <https://doi.org/10.1190/1.1444251>