

## MÔ PHỎNG SỐ ỨNG DỤNG CỦA TẤM BÊ TÔNG DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA TIA NƯỚC TỐC ĐỘ CAO

### NUMERICAL SIMULATION OF CONCRETE SLAB BEHAVIOR UNDER HIGH-SPEED WATER JET IMPACT

NGUYỄN XUÂN BÀNG<sup>a,\*</sup>, MAI VIỆT CHINH<sup>a</sup>, PHẠM ĐỨC TIỆP<sup>a</sup>, NGUYỄN HOÀNG LONG<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Viện Kỹ thuật CTĐB, Học viện Kỹ thuật Quân sự

\*Tác giả đại diện: Email: nxb@lqdtu.edu.vn

Ngày nhận 16/2/2025, Ngày sửa 07/3/2025, Chấp nhận 12/3/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol1-2>

**Tóm tắt:** Công nghệ sử dụng tia nước áp lực cao đã được ứng dụng rộng rãi trong ngành Xây dựng. Tuy nhiên, việc hiểu rõ các tương tác phức tạp giữa tia nước tốc độ cao và bề mặt bê tông vẫn là một thách thức lớn do tính chất động học của quá trình này. Bài báo sử dụng phương pháp mô phỏng số với kỹ thuật Eulerian-Lagrangian kết hợp để phân tích ứng xử của tấm bê tông dưới tác động của tia nước tốc độ cao, tập trung vào phân bố áp suất tại vùng va chạm và đặc tính biến dạng của bê tông dưới các vận tốc tia nước từ 100 m/s - 1000 m/s. Kết quả chỉ ra rằng áp suất lớn nhất tại vùng va chạm dao động từ 0,13 GPa đến 1,6 GPa, tập trung tại tâm và giảm dần ra xung quanh. So sánh giữa mô phỏng số và công thức thực nghiệm cho thấy sự tương đồng cao. Các kết quả nghiên cứu cung cấp dữ liệu quan trọng cho ứng dụng thực tế trong sửa chữa, phục hồi, và thiết kế các kết cấu bê tông chịu tác động của tia nước tốc độ cao.

**Từ khóa:** Bê tông; mô phỏng; CEL; tia nước tốc độ cao; áp suất; va chạm

**Abstract:** The high-pressure water jet technology has been widely applied in the construction industry. However, understanding the complicated interactions between high-velocity water jets and concrete surfaces remains a significant challenge. This paper employs a numerical simulation method using the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) technique to analyze the behavior of concrete slabs under the impact of high-velocity water jets. The study focuses on the pressure distribution at the impact zone and the deformation characteristics of concrete under water jet velocities ranging from 100 m/s to 1000 m/s. The results indicate that the maximum pressure at the impact zone ranges from 0.13 GPa to 1.6 GPa, concentrated at the center and gradually decreasing outward. The findings provide critical data for practical applications in the concrete structures subjected to high-velocity water jet impacts.

**Keywords:** Concrete; simulation; CEL method; high-speed water jet; pressure; impact

#### 1. Giới thiệu

Bê tông được coi là loại vật liệu xây dựng quan trọng, được sử dụng rộng rãi trong xây dựng cơ sở hạ tầng, giao thông và các ứng dụng công nghiệp khác [1]. Theo thời gian, việc bảo trì và cải tạo các kết cấu bê tông trở nên cần thiết do các vấn đề như hư hỏng bề mặt, nứt hoặc xuống cấp của vật liệu. Các phương pháp cơ học truyền thống thường được sử dụng nhưng dẫn đến những bất cập như tiếng ồn quá mức, rung động, hiệu ứng nhiệt và hư hỏng thứ cấp cho các kết cấu. Những hạn chế này đã thúc đẩy sự phát triển của các công nghệ thay thế, chẳng hạn như tia nước tốc độ cao, để xử lý bề mặt bê tông [2, 3].

Công nghệ tia nước tốc độ cao (áp lực cao) sử dụng nước có áp suất để đạt được sự phân rã vật liệu thông qua các cơ chế như tác động trực tiếp, tạo áp suất vết nứt và tạo lỗ rỗng [4-6]. Phương pháp này có một số ưu điểm: không bụi, không tạo ra nhiệt đáng kể và giảm thiểu nguy cơ xuất hiện các vết nứt nhỏ trong kết cấu. Hơn nữa, công nghệ tia nước có thể loại bỏ một cách có chọn lọc các lớp bị hư hỏng trong khi vẫn bảo quản được vật liệu gia cố, khiến nó trở thành lựa chọn ưu tiên cho các ứng dụng chính xác trong xây dựng và sửa chữa. Một số nghiên cứu đã khám phá ứng dụng của tia nước tốc độ cao trong xử lý bề mặt bê tông. Sitek và cộng sự (2013) [7] phát hiện ra rằng áp suất nước tăng và tốc độ di chuyển của vòi phun giảm làm tăng đáng kể hiệu quả loại bỏ vật liệu cũ trên bề mặt kết cấu. Liu và cộng sự (2017) [8] đã tiến hành mô phỏng số để làm sáng tỏ sự phân bố ứng suất và cơ chế hư hỏng trong bê tông dưới tia nước áp suất cao. Những phát hiện này làm nổi bật tiềm năng của các phương pháp số để bổ sung cho các nghiên cứu

thực nghiệm bằng cách cung cấp thông tin chi tiết về sự tương tác giữa tia nước và bê tông. Nghiên cứu thực nghiệm khác của Liu (2021) [9] đã đánh giá ảnh hưởng của kết cấu bê tông có vết nứt trước dưới tác động của tia nước áp lực cao, thông qua máy ghi hình tốc độ cao. Ngoài ra, Bodnárová và cộng sự (2011) [10] đã nhấn mạnh những lợi thế của tia nước tốc độ cao, bao gồm cường độ lao động giảm và giảm ô nhiễm môi trường so với các phương pháp cơ học truyền thống.

Mặc dù đã đạt được nhiều kết quả khả quan, vẫn còn nhiều khoảng trống trong việc phân tích ảnh hưởng của kết cấu bê tông dưới tia nước áp lực cao. Nghiên cứu này tích hợp các nguyên lý của cơ học chất lỏng và cơ học phá hủy, một mô hình mô phỏng ba chiều được phát triển để điều tra số chi tiết về hành vi của các tấm bê tông chịu tác động của tia nước tốc độ cao. Những phát hiện này dự kiến sẽ góp phần tối ưu hóa việc ứng dụng công nghệ tia nước tốc độ cao trong các hoạt động xây dựng.

## 2. Nền tảng lý thuyết

Phương pháp Eulerian-Lagrangian kết hợp (CEL) là một kỹ thuật tính toán được sử dụng rộng rãi trong các mô phỏng số để mô hình hóa các tương tác giữa chất lỏng và chất rắn. Bằng cách

biểu diễn miền chất lỏng (tia nước) trong theo phần tử Eulerian và miền chất rắn (bê tông) theo phần tử Lagrangian, phương pháp này cho phép theo dõi chính xác biến dạng vật liệu và sự lan truyền ứng suất trong khi vẫn xử lý được các biến dạng lớn của vật liệu [11].

Khi một tia nước tác động vào bề mặt một vật rắn, áp suất ban đầu  $P$  được xác định theo công thức [12, 13]:

$$P = \rho v c \quad (1)$$

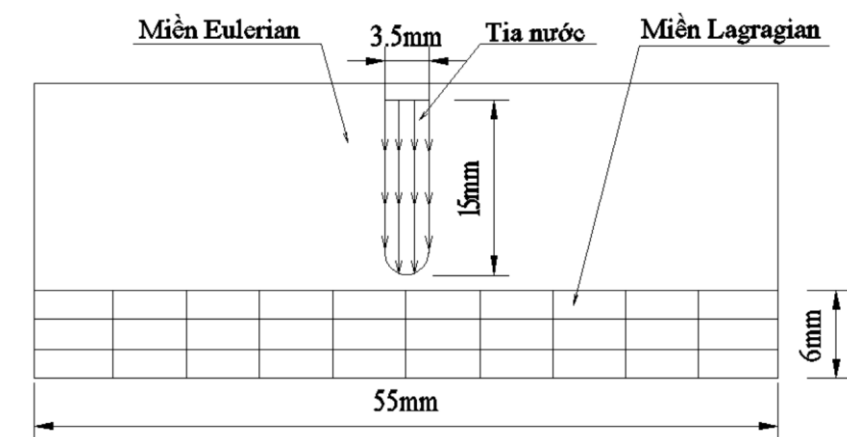
trong đó:  $\rho$  là mật độ chất lỏng,  $v$  là vận tốc va chạm và  $c$  là vận tốc truyền âm thanh trong chất lỏng. Áp suất cao ban đầu được đưa ra bởi công thức (1) giảm nhanh do sự giải phóng năng lượng lan truyền vào bề mặt tương tác. Nếu va chạm tiếp tục cho đến khi đạt trạng thái ổn định, áp suất sẽ tiến tới áp suất thủy động:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

Trong mô phỏng số, ABAQUS/Explicit cung cấp một kỹ thuật Eulerian-Lagrangian (CEL) [14, 15]. Phương pháp này đòi hỏi lắp ráp lưới Eulerian và lưới Lagrangian trong cùng một mô hình.

## 3. Xây dựng mô hình mô phỏng số

### 3.1 Mô hình hình học



Hình 1. Mô hình hình học của phân tích kết cấu tấm bê tông dưới áp lực tia nước

Hình 1 minh họa mô hình hình học và lưới phần tử hữu hạn được sử dụng trong phân tích kết cấu tấm bê tông chịu tác động của áp lực tia nước. Miền Eulerian là miền đại diện cho dòng nước từ tia nước, được mô tả bởi các mũi tên chỉ hướng dòng chảy. Tia nước có đường kính 3,5 mm và chiều dài vùng tác động 15 mm, được đặt cách bề mặt bê

tông một khoảng thích hợp để mô phỏng tác động thực tế. Tia nước được mô phỏng như một dòng chảy áp lực cao tác động trực tiếp lên tấm bê tông, đại diện cho hiện tượng thực tế trong các ứng dụng thủy lực. Miền Lagrangian là miền mô phỏng tấm bê tông, với chiều dày tổng cộng 6 mm và chiều dài 55 mm, được chia thành các phần tử lưới hình chữ

nhật để tăng độ chính xác trong việc phân tích biến dạng và ứng suất. Tia nước có vận tốc ban đầu là 450 m/s.

## 3.2 Mô hình vật liệu

### a. Chất lỏng

Phần mềm mô phỏng số ABAQUS/Explicit cung cấp mô hình phương trình trạng thái Us-UP

có thể mô phỏng dòng chảy nhớt và không nhớt không nén, được kiểm soát bởi phương trình chuyển động Navier-Stokes [16]. Trong mô phỏng chất lỏng (fluid), nước được giả thiết là một vật liệu không nén được. Nước được mô hình hóa bằng phần tử CPE4R (Four-node plane strain element). Các thông số của nước được minh họa trên Bảng 1 [13, 17].

**Bảng 1.** Các thông số của chất lỏng dùng trong mô phỏng [13, 17]

| Thông số | Mật độ                 | Trạng thái EOS | Mô đun cắt | Độ nhớt                  |
|----------|------------------------|----------------|------------|--------------------------|
| Giá trị  | 1000 kg/m <sup>3</sup> | Us-Up          | 3.1μm/s    | 13e <sup>-4</sup> Pa.sec |

### b. Vật liệu bê tông

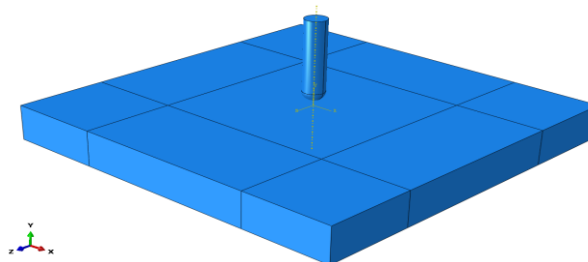
Mô hình Johnson-Holmsquist Concrete (JHC) [18, 19] là mô hình vật liệu cấu thành được thiết kế để mô phỏng ứng xử động của bê tông dưới tốc độ biến dạng cao, áp suất lớn và hư hỏng. Mô hình

HJC cũng bao gồm cơ chế phát triển của các hư hỏng, dựa trên sự tích lũy biến dạng dẻo. Mô hình này được sử dụng rộng rãi trong các mô phỏng số liên quan đến các tình huống va chạm. Thông số mô hình vật liệu bê tông được thể hiện trên Bảng 2.

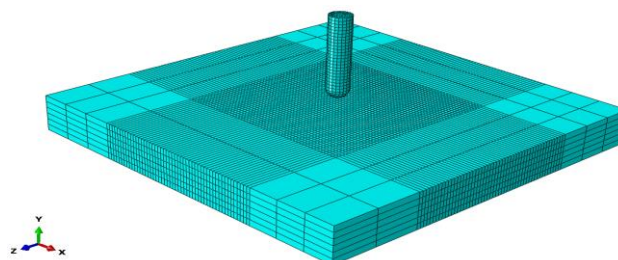
**Bảng 2.** Các thông số của bê tông dùng trong mô phỏng [20]

| $\rho(kg / m^3)$ | $G(GPa)$          | $A$        | $B$        | $n$                        | $C$                        |                 |
|------------------|-------------------|------------|------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| 2440             | 14.86             | 0.79       | 1.6        | 0                          | 0.007                      |                 |
| m                | $\varepsilon_0^*$ | $S_{max}$  | $T(GPa)$   | $\varepsilon_{fmin}^{-pl}$ | $\varepsilon_{fmax}^{-pl}$ | $P_{HEL} (MPa)$ |
| 0.61             | 1                 | 7          | 0.00354    | 0.001                      | 1                          | 48              |
| $D_1$            | $D_2$             | $K_1(GPa)$ | $K_2(GPa)$ | $K_3(GPa)$                 | $HEL(MPa)$                 |                 |
| 0.04             | 1                 | 85         | -171       | 208                        | 80                         |                 |

## 4. Kết quả và thảo luận



**Hình 2.** Mô hình 3D mô phỏng của tấm bê tông dưới áp lực tia nước



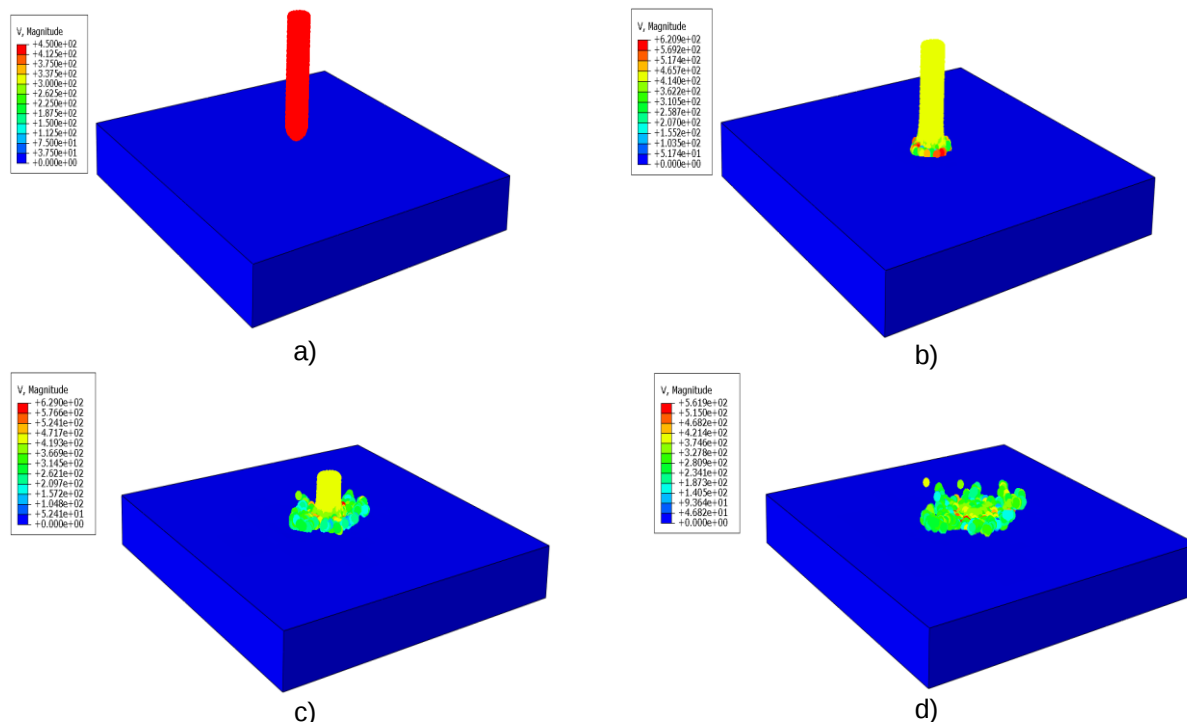
**Hình 3.** Mô hình chia lưới của mô phỏng số

Vì quá trình va chạm rất ngắn nên hiệu ứng của quá trình trao đổi nhiệt và sự bay hơi của nước không được xem xét trong nghiên cứu này. Hình 2 thể hiện mô hình 3D của mô phỏng, bao gồm bản bê tông và tia nước. Hình 3 là mô hình

chia lưới của phần tử. Phân tích hội tụ của lưới được thực hiện, trong đó vị trí va chạm gần tâm của bản, lưới mô hình được chia với kích thước 1mm. Các vị trí còn lại được chia với mật lưới kích thước 2mm. Việc chia mật lưới mịn tại khu

vực trung tâm và mắt lưới có kích thước to hơn tại các khu vực khác vừa đảm bảo độ tin cậy của

kết quả tính toán, vừa tiết kiệm thời gian phân tích mô hình.

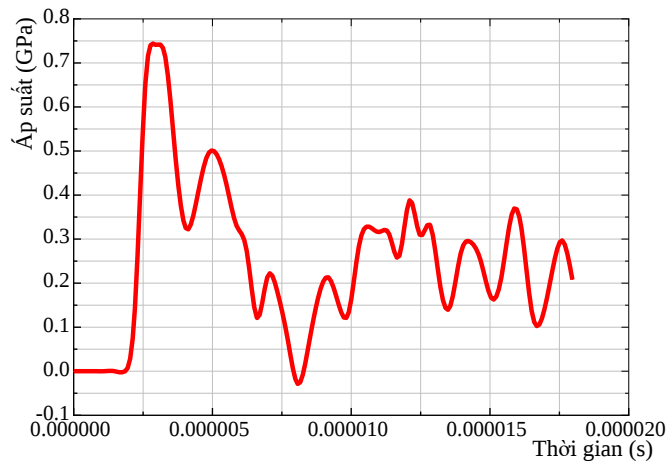


**Hình 4.** Quá trình động lực học của mô phỏng: (a) trước khi va chạm, (b) thời điểm va chạm, (c) trong khi va chạm và (d) giai đoạn cuối của va chạm

Hình 4 minh họa quá trình va chạm của tia nước vào bản bê tông, bao gồm 4 giai đoạn chính. Trước khi va chạm, tia nước được mô phỏng với vận tốc cao, được biểu diễn bằng vùng màu đỏ, di chuyển từ phía trên xuống gần bề mặt tấm bê tông. Tấm bê tông vẫn ở trạng thái ban đầu, chưa chịu bất kỳ tác động nào, với toàn bộ cấu trúc ổn định và không có biến dạng hoặc ứng suất xảy ra. Vận tốc của tia nước tại thời điểm này được duy trì ở giá trị tối đa, như thể hiện trên thang màu, với vận tốc cực đại ở phần lõi của tia. Thời điểm va chạm, tia nước bắt đầu tiếp xúc với bề mặt của tấm bê tông. Khi nước va chạm với bề mặt bê tông, hình thành 1 vành đai tác động có đường kính lớn gần gấp đôi đường kính của tia nước. Tại thời điểm này, năng lượng động học từ tia nước chuyển đổi thành ứng suất tác động lên bề mặt, bắt đầu gây ra biến dạng cục bộ. Khu vực tiếp xúc xuất hiện áp lực cao, được minh họa bằng màu vàng và đỏ, trong khi các vùng xung quanh vẫn giữ vận tốc thấp hơn. Đây là giai đoạn quan trọng xác định cơ chế hư hỏng ban đầu của bê tông do tác động tập trung. Trong khi va chạm, giai đoạn này ghi nhận sự tương tác mạnh mẽ giữa

tia nước và tấm bê tông với sự gia tăng biến dạng và ứng suất trong tấm bê tông. Vùng màu xanh lá và vàng trên bề mặt bê tông cho thấy sự phân tán áp lực ra các khu vực lân cận. Tia nước tiếp tục xâm nhập, gây xói mòn ảnh hưởng đến bề mặt bê tông tại vùng tiếp xúc. Các hạt bê tông nhỏ bị tách ra, minh họa cho quá trình phá hủy vật liệu. Giai đoạn cuối của va chạm, tia nước giảm dần vận tốc sau khi truyền toàn bộ năng lượng vào tấm bê tông. Hư hỏng trên bề mặt bê tông trở nên rõ rệt, với sự hình thành một vùng biến dạng rõ ràng (chi tiết sẽ được thảo luận ở phần sau). Màu sắc biểu thị vận tốc (vùng xanh lam) cho thấy tia nước đã mất phần lớn động năng, trong khi bề mặt bê tông vẫn còn hư hỏng cục bộ. Quá trình này kết thúc với sự ổn định của cả tia nước và tấm bê tông.

Áp suất lớn nhất ban đầu  $P_{max}$  tại thời điểm tia nước va chạm với bản bê tông được xác định theo công thức 1, 2 đã đề cập ở trên [12, 13]. Trong đó  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$  là mật độ của nước,  $v= 450 \text{ m/s}$  là vận tốc tia nước,  $c = 1480 \text{ m/s}$  là vận tốc truyền âm trong chất lỏng. Thay số vào ta được  $P_{max} = 0,66 \text{ GPa}$ .  $P_2 = 0,1 \text{ GPa}$ .



Hình 5. Áp suất lớn nhất của tia nước tác động vào tấm bê tông với vận tốc ban đầu 450 m/s

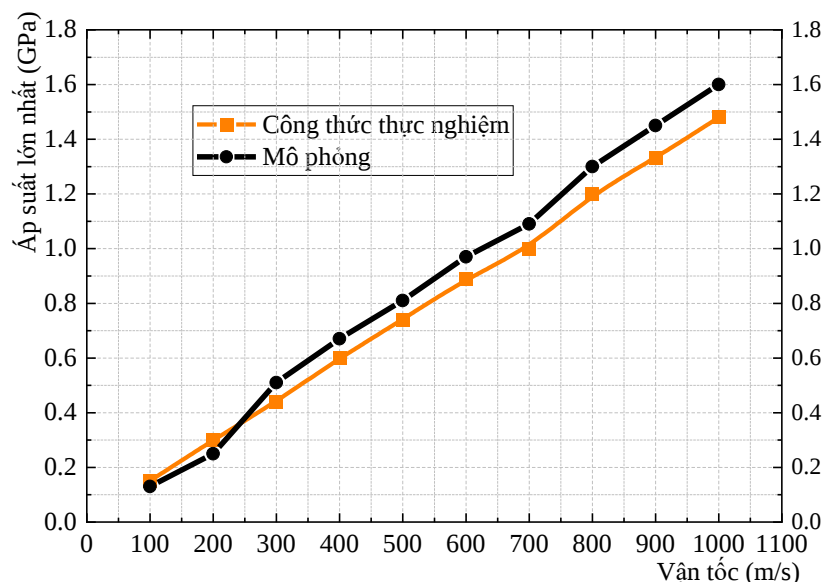
Hình 5 minh họa áp suất lớn nhất của tia nước tác động vào bề mặt tấm bê tông theo mô phỏng. Tại thời điểm bắt đầu, áp suất trên bề mặt tấm bê tông bằng 0 do tia nước chưa tác động. Khi tia nước bắt đầu va chạm, áp suất tăng đột ngột và đạt giá trị cực đại khoảng 0,74 GPa trong khoảng thời gian rất ngắn, dưới  $5\mu\text{s}$  giây. Đây là giai đoạn áp lực tập trung cao nhất, được gây ra bởi động năng lớn của tia nước chuyển đổi thành năng lượng tác động tại điểm tiếp xúc với bề mặt bê tông. Giai đoạn giảm dần ( $5\mu\text{s}$  -  $10\mu\text{s}$ ), sau khi đạt đỉnh, áp suất giảm nhanh chóng do sự phân tán năng lượng từ tia nước qua bề mặt tấm bê tông và sự lan truyền sóng áp lực trong vật liệu. Áp suất giảm xuống mức khoảng 0,2 GPa, cho thấy tia nước bắt đầu mất một phần năng lượng ban đầu thông qua cơ chế tác động và xói mòn trên bề mặt bê tông. Giai đoạn dao động ( $10\mu\text{s}$  -  $20\mu\text{s}$ ), trong giai đoạn này, áp suất tiếp tục dao động quanh mức trung bình 0,2 – 0,3 GPa. Sự dao động này phản ánh các quá trình phức tạp như: sóng áp lực lan truyền và phản xạ trong vật liệu bê tông, sự biến dạng cục bộ của bề mặt bê tông và tác động không đồng đều từ tia nước. Các đỉnh và đáy áp suất nhỏ hơn xuất hiện tuần hoàn, cho thấy sự tương tác liên tục giữa dòng tia nước và cấu trúc bề mặt của tấm bê tông. Giá trị áp suất

lớn nhất theo mô phỏng là 0,74 GPa, chênh lệch so với giá trị áp suất  $P_{\text{max}}$  tính được từ công thức thực nghiệm là 12%.

Để hiểu rõ hơn về tác động của vận tốc va chạm lên áp suất va chạm, vận tốc va chạm đã thay đổi từ 100 m/s đến 1000 m/s. Sự thay đổi về áp suất va chạm đã được nghiên cứu và kết quả đã được so sánh với kết quả tính toán từ phương trình thực nghiệm. Kết quả được thể hiện trên Bảng 3 và Hình 6. Khi tính toán theo công thức thực nghiệm, các giá trị áp suất lớn nhất tăng tuyến tính với vận tốc tia nước. Giá trị áp suất bắt đầu từ 0,15 GPa ở vận tốc 100 m/s và tăng dần, đạt 1,48 GPa ở vận tốc 1000 m/s. Kết quả từ mô phỏng số cũng cho thấy xu hướng tăng tương tự, với áp suất lớn nhất tăng từ 0,13 GPa ở vận tốc 100 m/s đến 1,6 GPa ở vận tốc 1000 m/s. Có thể thấy, ở các giá trị vận tốc thấp, áp suất đỉnh của mô phỏng số có sự sai lệch lớn so với công thức thực nghiệm, trong khi ở các giá trị vận tốc cao hơn, giá trị này gần với công thức thực nghiệm hơn. Sự không ổn định của kết quả số có thể là do hạn chế của thuật toán tiếp xúc trong kỹ thuật CEL và nhiều dữ liệu không thể tránh khỏi khi sử dụng công cụ phân tích Dynamic Explicit. Tuy nhiên, sai số giữa hai phương pháp không đáng kể và kết quả mô phỏng vẫn đảm bảo độ tin cậy.

Bảng 3. So sánh áp suất lớn nhất của tia nước theo các vận tốc khác nhau

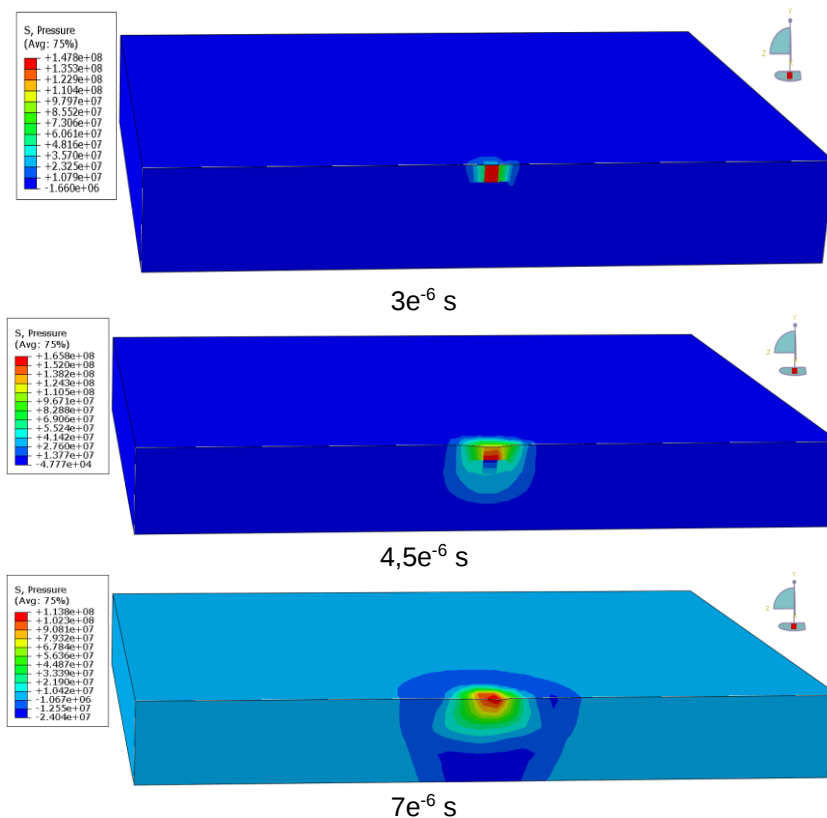
| PP tính<br>Vận tốc (m/s) | Công thức thực nghiệm<br>(1) | Mô phỏng số<br>(2) | Chênh lệch (1)/(2) |
|--------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| 100                      | 0,15                         | 0,13               | 1,15               |
| 200                      | 0,3                          | 0,25               | 1,20               |
| 300                      | 0,44                         | 0,51               | 0,86               |
| 400                      | 0,6                          | 0,67               | 0,90               |
| 500                      | 0,74                         | 0,81               | 0,91               |
| 600                      | 0,89                         | 0,97               | 0,92               |
| 700                      | 1,0                          | 1,09               | 0,92               |
| 800                      | 1,21                         | 1,3                | 0,92               |
| 900                      | 1,33                         | 1,45               | 0,92               |
| 1000                     | 1,48                         | 1,6                | 0,93               |



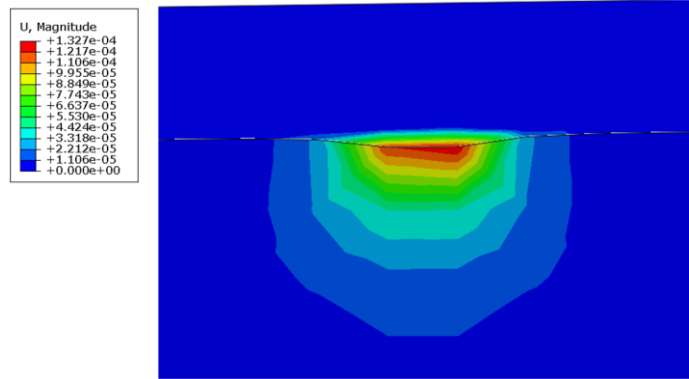
Hình 6. Áp suất lớn nhất của tia nước tác động vào tấm bê tông với các vận tốc khác nhau

Sự phân bố áp suất va chạm trên bề mặt tấm ở các khoảng thời gian khác nhau đã được nghiên cứu, như thể hiện trong Hình 7. Trong đó đường viền màu biểu thị cường độ áp suất trên vùng va chạm. Hình 7a cho thấy trạng thái ở  $3e^{-6}$  s, là thời điểm tia nước bắt đầu va chạm vào cấu trúc. Đầu của tia nước có hình cầu. Do đó, áp suất cao xảy ra trước tiên ở tâm

vùng va chạm rồi lan ra các khu vực xung quanh. Ở khoảng  $4,5e^{-6}$  s (Hình 7b), áp suất đạt đến giá trị đỉnh hơn 0,7 GPa. Áp suất cao này sau đó lan ra các khu vực xung quanh dưới dạng sóng. Trong giai đoạn tiếp theo, có sự phân bố hỗn loạn của áp suất (Hình 7c), có thể là do trạng thái thay đổi của dòng chảy trước khi đạt được sự ổn định.



Hình 7. Sự phân bố áp suất trên bề mặt tấm bê tông theo các giai đoạn khác nhau

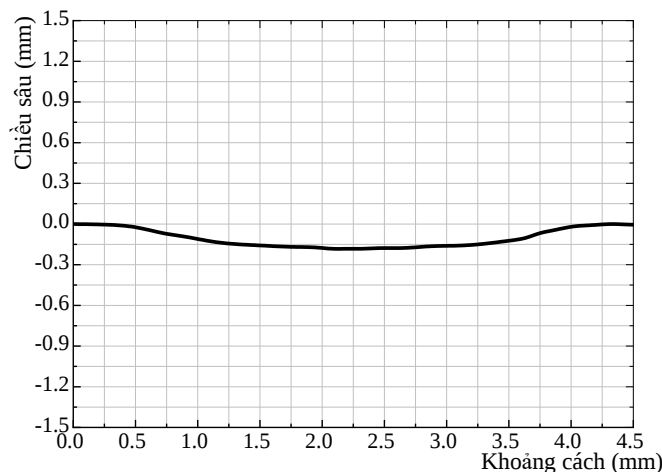


Hình 8. Hình ảnh biến dạng của tấm bê tông

Hình 8 cho thấy sự biến dạng của bề mặt tấm bê tông chịu tác động của tia nước. Các vùng màu sắc khác nhau đại diện cho độ lớn của biến dạng (theo đơn vị độ dịch chuyển – U, Magnitude), với thang màu hiển thị từ màu đỏ (biến dạng lớn nhất) đến màu xanh lam (biến dạng nhỏ nhất hoặc không có biến dạng). Biến dạng tạo thành một hình dạng lõm dần. Tại tâm vùng tác động, khu vực trung tâm có màu đỏ, đại diện cho độ biến dạng lớn nhất, nằm tại vị trí trực tiếp chịu áp lực từ tia nước. Điều này cho thấy áp lực tập trung tại vùng va chạm đã gây ra sự biến dạng mạnh mẽ của bề mặt bê tông. Sự phân bố biến dạng, từ vùng màu đỏ, biến dạng giảm dần ra các vùng xung quanh, chuyển từ màu cam,

vàng, xanh lá cây, và cuối cùng là màu xanh lam ở rìa xa. Sự phân bố này phản ánh sự lan truyền năng lượng tác động từ vùng trung tâm ra xung quanh bề mặt tấm bê tông.

Hình 9 cho thấy mặt cắt bề mặt của vùng tác động. Tia nước tạo ra một vết lõm có đường kính bằng với đầu tia nước với độ sâu là 0,18 mm. Tại các khoảng cách xa hơn (trên 4 mm), bề mặt trở về trạng thái gần như không có biến dạng (0 mm). Sau giai đoạn va chạm, bề mặt của tấm bê tông tạo thành một vết lõm hình đĩa nông với biến dạng lớn nhất nằm ở tâm vùng tác động. Điều này có nghĩa là diện tích bề mặt bị ảnh hưởng của bê tông bị tác động phụ thuộc vào đường kính tia nước tác động.



Hình 9. Sơ đồ biến dạng của tấm tại vị trí va chạm

## 5. Kết luận

Nghiên cứu đã trình bày một cách chi tiết về ứng xử của tấm bê tông dưới tác động của tia nước tốc độ cao thông qua phương pháp mô phỏng số, sử dụng kỹ thuật Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL). Dựa trên các kết quả đạt được, những kết luận quan trọng sau đây được rút ra:

- Áp suất lớn nhất tại vùng va chạm đạt đến giá trị từ 0,13 đến 1,6 GPa, với sự phân bố áp suất tập

trung cao tại tâm vùng tác động và giảm dần ra các khu vực xung quanh. Điều này phản ánh sự lan truyền năng lượng động học từ tia nước qua bề mặt bê tông. Sự so sánh giữa mô phỏng số và công thức thực nghiệm cho thấy xu hướng tăng tuyến tính của áp suất lớn nhất theo vận tốc tia nước, với độ sai lệch nhỏ giữa hai phương pháp, đảm bảo độ tin cậy của kết quả mô phỏng;

- Dưới tác động của tia nước, bề mặt bê tông xuất hiện biến dạng rõ rệt với tâm vùng tác động

hình thành vết lõm. Sự biến dạng giảm dần ra các khu vực xa hơn, tạo thành hình dạng lõm đối xứng với đường kính tương ứng với đầu tia nước. Kết quả cho thấy áp lực tập trung tại vùng va chạm là nguyên nhân chính gây ra sự phá hủy cục bộ và biến dạng của bề mặt bê tông;

- Khi vận tốc tăng từ 100 m/s đến 1000 m/s, giá trị áp suất lớn nhất và mức độ biến dạng bề mặt đều tăng đáng kể. Ở vận tốc cao hơn, kết quả mô phỏng tiệm cận với các giá trị thực nghiệm, phản ánh độ chính xác của phương pháp mô phỏng trong việc dự đoán áp lực và biến dạng;

- Các sai số nhỏ trong mô phỏng, đặc biệt ở vận tốc thấp, có thể là do hạn chế của thuật toán tiếp xúc trong kỹ thuật CEL và sự nhạy cảm của mô hình với các nhiễu dữ liệu. Tuy nhiên, kết quả đạt được cung cấp thông tin giá trị cho việc phân tích và dự đoán ứng xử của vật liệu bê tông dưới tác động của tia nước, mở ra triển vọng ứng dụng trong thiết kế các kết cấu chống xói mòn và chịu tác động động lực học.

#### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] Việt, T.T.B., et al. (2022), *Kỹ thuật sửa chữa, gia cố và bảo trì kết cấu bê tông cốt thép của công trình dân dụng và công nghiệp*. Tạp chí Xây dựng.
- [2] Hloch, S., et al.(2020), *Effect of pressure of pulsating water jet moving along stair trajectory on erosion depth, surface morphology and microhardness*. Wear. 452: p. 203278.
- [3] Raj, P., S. Chattopadhyaya, and A. Mondal (2020), *A review on continuous and pulsed water jet machining*. Materials Today: Proceedings, 2024, 2020. 27: p. 2596-2604.
- [4] Yang, Z., et al.(2016), *Application of high-pressure water jet technology and the theory of rock burst control in roadway*. International Journal of Mining Science, 26(5): p. 929-935.
- [5] Natarajan, Y., et al.(2020), *Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review*. Journal of Manufacturing Processes, 49: p. 271-322.
- [6] Huang, L.-Y. and Z.S. Chen (2022), *Effect of technological parameters on hydrodynamic performance of ultra-high-pressure water-jet nozzle*. Applied Ocean Research, 2022. 129: p. 103410.
- [7] Sitek, L., et al.(2013), *Effects of water jet on heat-affected concretes*. Procedia Engineering, Elsevier, 2013. 57: p. 1036-1044.
- [8] Liu, J., M. Wang, and D. Zhang (2017). *Numerical simulation of high pressure water jet impacting concrete*. in *AIP Conference Proceedings*. 2017. AIP Publishing.
- [9] Liu, J., et al.(2021), *Experimental study on broken area evolution characteristics and crack propagation rules of water jet impacting concrete with precracks*. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021. 35(1): p. 04020130.
- [10] Bodnárová, L., et al.(2011), *New potential of high-speed water jet technology for renovating concrete structures*. Slovak journal of civil engineering, 2011. 19(2): p. 1-7.
- [11] Masó, M., et al.(2022), *A Lagrangian–Eulerian procedure for the coupled solution of the Navier–Stokes and shallow water equations for landslide-generated waves*. Advanced Modeling Simulation in Engineering Sciences, 2022. 9(1): p. 15.
- [12] Cook, S.S. and P. Character (1928), *Erosion by water-hammer*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical, 1928. 119(783): p. 481-488.
- [13] Hsu, C.-Y., et al. (2013), *A numerical study on high-speed water jet impact*. Ocean engineering. 72: p. 98-106.
- [14] Zaid, M. and M. Rehan Sadique (2021), *A simple approximate simulation using coupled Eulerian–Lagrangian (CEL) simulation in investigating effects of internal blast in rock tunnel*. Indian Geotechnical Journal, 51(5): p. 1038-1055.
- [15] He, W., et al.(2021), *Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) characterization of slamming response and failure mechanism on corrugated sandwich structures*. Applied Ocean Research, 116: p. 102862.
- [16] Systèmes, D.(2016), *Abaqus/CAE User's Guide*.
- [17] George, H.F. and F. Qureshi (2013), *Newton's law of viscosity, Newtonian and non-Newtonian fluids*. Encyclopedia of tribology, p. 2416-2420.
- [18] Hohnquist, T., G. Johnson, and W. Cook (1993). *A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains*. in *High Strain Rates, High Pressures, Quebec City, Canada*. 1993.
- [19] Johnson, G. and T. Holmquist (1992), *A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates, and high pressures, in Shock wave and high-strain-rate phenomena in materials*. 1992, CRC Press. p. 1075-1082.
- [20] Oucif, C. and L.M. Mauludin (2019), *Numerical modeling of high velocity impact applied to reinforced concrete panel*. Underground Space, 2019. 4(1): p. 1-9.