

## PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA LỰC LIÊN KẾT TRONG KHỐI VẬT LIỆU SẠT TRƯỢT BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ RỜI RẠC

### DISCRETE ELEMENT ANALYSIS OF INTERPARTICLE COHESION EFFECTS ON THE COLLAPSE OF GRANULAR COLUMNS COMPOSED OF PENTAGONAL PARTICLES

NGUYỄN THANH HẢI<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Khoa Xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

\*Tác giả đại diện: Email: nthai@dut.udn.vn

Ngày nhận 20/12/2025, Ngày sửa 28/12/2025, Chấp nhận 30/12/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol4-7>

**Tóm tắt:** Lực liên kết giữa các phần tử trong khối vật liệu đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá ổn định và mất ổn định của nó trong tự nhiên. Nghiên cứu này thực hiện khảo sát tác động của lực liên kết giữa các phần tử đa giác trong khối vật liệu thông qua chỉ số Bond đến quá trình sạt trượt trên mặt phẳng nằm ngang bằng phương pháp phần tử rời rạc. Kết quả cho thấy khi Bond ( $Bo$ ) lớn hơn 65 thì lực liên kết đủ lớn đảm bảo cho khối ổn định, ngược lại khối bị mất ổn định khi  $Bo$  nhỏ hơn. Khi  $Bo$  tăng từ 0 đến 25 thì thấy rõ chiều dài lớn nhất khối sạt giảm lớn, biến thiên thể năng, động năng lớn, trong khi  $Bo$  tăng từ 25 đến 55 thì ít thấy sự khác biệt. Khi hình dạng của vật liệu kèm theo lực liên kết đủ lớn đảm bảo cho khối vật liệu ổn định và ngược lại. Kết quả nghiên cứu này cung cấp những hiểu biết sâu thêm trong việc đánh giá sự ổn định và mất ổn định của khối vật liệu trong tự nhiên.

**Từ khóa:** Phương pháp phần tử rời rạc, lực liên kết, số Bond, khối vật liệu sạt trượt

**Abstract:** Interparticle cohesion within granular assemblies plays a crucial role in assessing their stability and instability in natural environments. This study investigates the influence of cohesive interactions between polygonal particles on the sliding behavior of a granular mass resting on a horizontal plane, using the Discrete Element Method (DEM). The effect of cohesion is characterized by the Bond number ( $Bo$ ). The results indicate that when the Bond number exceeds 65, the cohesive forces are sufficiently strong to keep the granular mass stable, whereas the mass becomes unstable at lower  $Bo$  values. As  $Bo$  increases from 0 to 25, a rapid reduction in the maximum runout distance is observed, accompanied by significant variations in potential and kinetic energies. In contrast, an increase in  $Bo$  from 25 to 55 leads to much smaller changes in these quantities. The results further

demonstrate that the combined effects of particle shape and sufficiently strong interparticle cohesion promote a stable granular mass, whereas weaker cohesion results in an unstable response. Overall, this study provides deeper insights into the mechanisms governing stable and unstable behaviors of granular materials in natural systems.

**Key words:** Discrete element method, interparticle cohesion, Bond number, granular material column collapse

#### 1. Đặt vấn đề

Hiện tượng sạt trượt đất đá đang có xu hướng gia tăng cả về tần suất lẫn mức độ tàn phá tại Việt Nam cũng như nhiều khu vực trên thế giới. Các yếu tố tự nhiên như mưa lớn kéo dài, phong hóa và xói mòn chân dốc, cùng với các tác động nhân sinh như phá rừng, mở đường miền núi, đào – đắp taluy hay khai thác vật liệu, đều góp phần làm suy giảm hoặc phá vỡ liên kết giữa các phần tử cấu thành khối đất đá. Các tác động này làm suy giảm hoặc phá vỡ liên kết giữa các phần tử trong khối vật liệu, dẫn đến sự mất ổn định và kích hoạt quá trình sạt trượt. Trận sạt ở núi Hùng Sơn, thành phố Đà Nẵng xảy ra ngày 14 tháng 11 năm 2025, khi khối đất đá bất ngờ đổ ập xuống trong thời tiết nắng ráo dù khu vực đã ngừng mưa liên tục 3 ngày. Vụ sạt lở đã vùi lấp 3 người dân, chôn lấp hàng trăm mét đường giao thông và buộc chính quyền địa phương phải khẩn cấp di dời gần 700 cư dân khỏi khu vực nguy hiểm. Hậu quả của các hiện tượng sạt trượt đất đá thường rất nghiêm trọng, gây thiệt hại lớn về con người, tài sản và cơ sở hạ tầng ở khu vực hạ lưu khối sạt [1–4]. Do đó, việc nghiên cứu cơ chế ổn định và mất ổn định của khối vật liệu rời rạc có ý nghĩa quan trọng trong lĩnh vực địa kỹ thuật và xây dựng nói chung.

Thông qua các mô hình thực nghiệm đơn giản, Lajeunesse và cộng sự, cũng như Lube và cộng sự,

đã tiến hành khảo sát hiện tượng sạt đổ và sạt trượt của các cột vật liệu rời rạc trên mặt phẳng nằm ngang với nhiều loại vật liệu và kích thước khối khác nhau [5,6]. Các nghiên cứu này tập trung phân tích hình thái khối vật liệu sau sạt trượt, đặc biệt là chiều dài lan truyền và chiều cao cuối cùng của khối vật liệu sau khi quá trình sạt được kích hoạt. Những kết quả thực nghiệm cơ bản này đã chỉ ra vai trò quan trọng của hình học ban đầu của khối sạt và trở thành nền tảng cho nhiều nghiên cứu tiếp theo trong việc phát triển các mô hình số và mô hình liên tục nhằm mô tả hành vi sạt trượt của vật liệu hạt. Trong quá trình sạt đổ của khối vật liệu, kích thước hình học ban đầu của khối sạt đóng vai trò then chốt. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng khi tỷ lệ giữa chiều cao và chiều dài ban đầu của khối sạt  $a = h_0/l_0$  nhỏ (thường nhỏ hơn khoảng 0,7), động lực học của quá trình sạt trượt chủ yếu chịu chi phối bởi trọng lực và tương tác tiếp xúc giữa các phần tử. Ngược lại, khi tỷ lệ  $a$  lớn hơn ngưỡng này, ảnh hưởng của thế năng tích trữ trong khối vật liệu trở nên đáng kể, dẫn đến sự thay đổi rõ rệt trong cơ chế chuyển động và hình thái lắng đọng của khối sạt [6–9].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung khảo sát hiện tượng sạt trượt của các cột vật liệu khô rời rạc, có và không xét đến lực liên kết giữa các phần tử. Đối với vật liệu khô không dính, chiều dài lan truyền lớn nhất của khối vật liệu sau sạt trượt thường được sử dụng như một chỉ tiêu quan trọng để đánh giá mức độ ảnh hưởng của khối sạt đến khu vực hạ lưu. Các nghiên cứu này được thực hiện bằng cả mô hình số và thực nghiệm, trong không gian hai chiều (2D) và ba chiều (3D), với nhiều dạng hạt vật liệu khác nhau như hạt tròn, hạt cầu và các dạng đa giác [10–17]. Khi xét đến lực liên kết giữa các phần tử, phần lớn các nghiên cứu hiện có tập trung vào mô hình hai chiều với dạng hạt tròn, hoặc hạt dạng cầu trong đó lực dính thường được tạo ra thông qua các mô hình thực nghiệm hoặc các luật tiếp xúc đơn giản [18–22]. Trong nhóm nghiên cứu này, các công trình của Abramian và cộng sự cũng như Sharma và cộng sự đã khảo sát ảnh hưởng của lực liên kết giữa các phần tử thông qua chỉ số Bond ( $Bo$ ) bằng mô hình phần tử rời rạc hai chiều với các hạt tròn trong khối vật liệu có tỉ số  $a$  nhỏ [18,21]. Tuy nhiên, hạt tròn có xu hướng dễ lăn và trượt trên bề mặt tiếp xúc, dẫn đến phạm vi dịch chuyển lớn

của khối sạt cũng như giá trị động năng lớn và thế năng giảm mạnh sau khi khối vật liệu bị kích hoạt. Mặc dù tương tác giữa các hạt tròn thuận lợi cho việc mô phỏng số, nhưng dạng hạt này chưa phản ánh đầy đủ đặc điểm hình dạng của vật liệu đất đá tự nhiên luôn có tính chất gồ ghề và nhiều góc cạnh.

Xuất phát từ những hạn chế nêu trên, nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử rời rạc để mô phỏng bài toán sạt trượt hai chiều của khối vật liệu có xét đến lực liên kết giữa các phần tử. Khối vật liệu được cấu thành từ các phần tử ngũ giác đều nội tiếp đường tròn bán kính  $R$ , có kích thước tỉ lệ  $a = h_0/l_0 = 0,5$  cho phép mô phỏng tốt hơn hiệu ứng hình dạng hạt, hiện tượng then cài lẫn nhau trong quá trình va chạm (interlocking), và tác động của lực liên kết giữa các phần tử so với các mô hình sử dụng hạt tròn. Lực liên kết giữa các phần tử được thông qua chỉ số Bond ( $Bo$ ) với giá trị thay đổi từ 0 đến 100, trong đó  $Bo = 0$  tương ứng với trường hợp vật liệu khô rời rạc truyền thống. Cách tiếp cận này cho phép đối sánh trực tiếp với các nghiên cứu trước đây, đồng thời làm nổi bật ảnh hưởng của lực liên kết khi giá trị  $Bo$  tăng lên và dạng hình học của phần tử trong khối vật liệu.

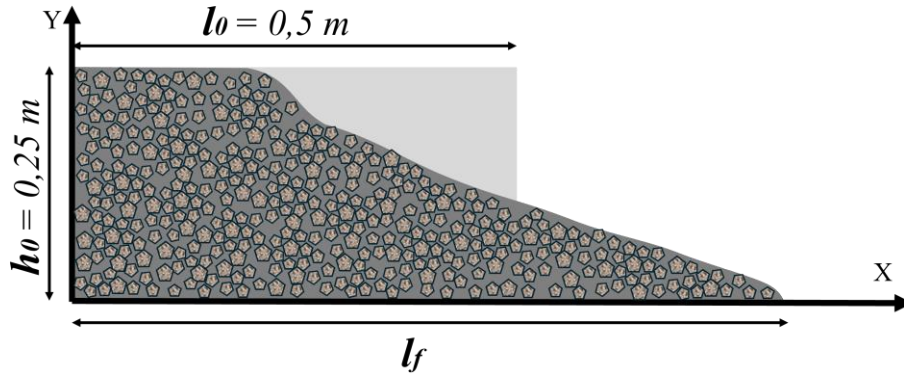
Bài báo trình bày chi tiết mô hình và phương pháp nghiên cứu tại Mục 2, phân tích và thảo luận các kết quả thu được tại Mục 3, bao gồm chiều dài lan truyền lớn nhất, vận tốc trung bình và sự biến thiên năng lượng của khối vật liệu trong suốt quá trình sạt trượt. Các kết luận chính của nghiên cứu được tổng hợp tại Mục 4.

## **2. Phương pháp số và mô hình nghiên cứu**

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử rời rạc (DEM) để thực hiện các mô phỏng về hiện tượng khối vật liệu bị sạt trượt trên mặt phẳng nằm ngang có xét đến ảnh hưởng của lực liên kết giữa các phần tử. Khối vật liệu được cấu thành từ các phần tử đa giác hoàn toàn cứng, không bị biến dạng trong suốt quá trình mô phỏng. Phần tử đa giác được khởi tạo là tập hợp các ngũ giác đều, nội tiếp đường tròn có bán kính là  $R$ . Việc lựa chọn hạt ngũ giác cho phép xem xét ảnh hưởng của hình dạng phi tròn, khắc phục hạn chế của các nghiên cứu trước đây chủ yếu sử dụng hạt tròn về tính linh động, sự tương tác bề mặt,... đồng thời tránh sự phức tạp quá mức do các dạng hạt có hình dạng không đều. Hơn nữa hình

dạng ngũ giác cũng được xem là đại diện hợp lý cho vật liệu hạt tự nhiên và nâng cao hiệu quả tính toán. Khối sạt có kích thước ban đầu là  $h_0$  và  $l_0$  tương ứng với chiều cao khối sạt và chiều dài khối sạt, được cấu thành từ hơn 6700 phần tử ngũ giác được đặt ở trạng thái ổn định trước khi thực hiện các mô phỏng, độ chặt mẫu đạt xấp xỉ khoảng 0,8. Các phần tử ngũ

giác nội tiếp đường tròn có kích thước đường kính từ 4 (mm) đến 6 (mm), đường kính trung bình là 5 (mm), các phần tử này được phân phối ngẫu nhiên kích thước từ nhỏ nhất đến lớn nhất như mô tả Hình 1. Kích thước phần tử được chọn tương ứng với nghiên cứu của Abramian và cộng sự để thực hiện đối sánh và kiểm chứng kết quả nghiên cứu.



**Hình 1.** Mô hình khối sạt dưới tác động của lực liên kết giữa các phần tử ngũ giác

Khi xét đến ảnh hưởng lực liên kết giữa các phần tử, nghiên cứu này đã sử dụng giá trị số Bond (*Bond number*)  $Bo = c/mg$  nhận các giá trị 0, 3, 8, 10, 15, 25, 40, 55, 65, 75, 100 tương ứng. Trong đó  $c$  là lực liên kết đơn vị giữa các phần tử ngũ giác (N),  $m$  là khối lượng trung bình của phần tử (kg),  $g$  là gia tốc trọng trường ( $m/s^2$ ). Dưới tác dụng của trọng lực, khối vật liệu bị đổ sụp xuống mặt phẳng nằm ngang phương X và đạt đến trạng thái ổn định cuối cùng với chiều dài khối sạt là  $l_f$  (như mô tả Hình 1 khối đậm). Các mô phỏng có giá trị  $Bo$  càng lớn, thì lực liên kết giữa các phần tử càng lớn nên chiều dài hay phạm vi sạt trượt lớn nhất có xu hướng giảm hơn so với các giá trị  $Bo$  nhỏ hơn. Trong nghiên cứu này chỉ tập trung phân tích một dạng khối sạt với kích thước  $h_0$  và  $l_0$ , trong đó tỉ lệ  $a = h_0/l_0 = 0,5$ , đây là tỉ lệ phản ánh kích thước khối sạt hợp lý trong

việc khảo sát ảnh hưởng của lực liên kết giữa các phần tử đến quá trình sạt trượt của khối vật liệu, mà không bị ảnh hưởng lớn bởi thể năng khi chiều cao khối sạt lớn. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ rõ đối với các khối sạt có chiều cao nhỏ, sau khi khối vật liệu bị kích hoạt đổ sụp thì chiều cao khối sạt cuối cùng không thay đổi so với chiều cao ban đầu (được mô tả như Hình 1)[9]. Khi thực hiện các mô phỏng, hệ số ma sát giữa các phần tử và giữa các phần tử với tường (bản đáy và tường trái) lần lượt là 0,5 và 0,2. Giá trị ma sát này đã được Nguyen và cộng sự khảo sát và cho thấy rằng khi ma sát giữa các phần tử lớn hơn 0,3 hay ma sát giữa các phần tử và tường biên lớn hơn 0,2 thì các kết quả cuối cùng ít chịu ảnh hưởng của các hệ số ma sát [14]. Số liệu chi tiết của các thông số trong nghiên cứu này được thể hiện tại Bảng 1.

**Bảng 1.** Các thông số chi tiết sử dụng trong các mô hình mô phỏng

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Chiều cao khối vật liệu ban đầu	$h_0$	0,25	m
Chiều dài khối vật liệu ban đầu	$l_0$	0,5	m
Khối lượng riêng	$\rho$	2600	$kg\ m^{-3}$
Đường kính hạt nhỏ nhất	$d_{min}$	4	mm
Đường kính hạt lớn nhất	$d_{max}$	6	mm
Đường kính hạt trung bình	$\langle d \rangle$	5	mm
Gia tốc trọng trường	$g$	9,81	$m\ s^{-2}$
Hệ số ma sát hạt – tường	$\mu_w$	0,2	-
Hệ số ma sát hạt – hạt	$\mu_p$	0,5	-
Bước thời gian mô phỏng	$\Delta t$	$1e^{-6}$	s
Số Bond	$Bo = c/mg$	$0 \div 100$	-
Tổng số phần tử ngũ giác	$N_p$	6737	-

Các mô hình mô phỏng trong nghiên cứu này được thực hiện trên bộ chương trình mã nguồn mở GDMTK-2D, được phát triển bởi Viện Cơ học và xây dựng LMGC tại Pháp, sau đó được cải tiến phù hợp với những mô phỏng trong nghiên cứu này. Bộ chương trình này đã thực hiện các nghiên cứu trước đây đối với bài toán 2 chiều áp dụng hình dạng mẫu vật liệu như hình tròn, đa giác khác nhau [13,23,24].

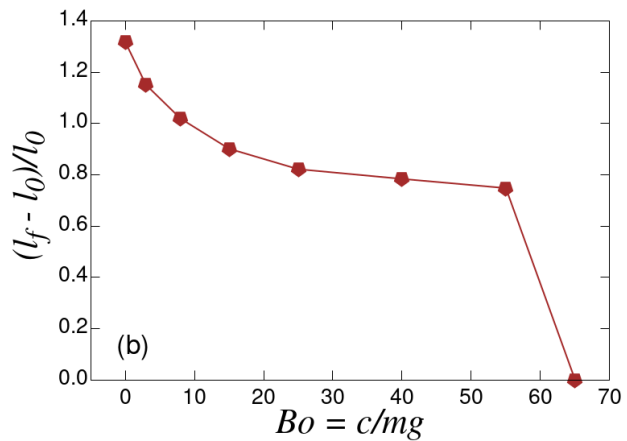
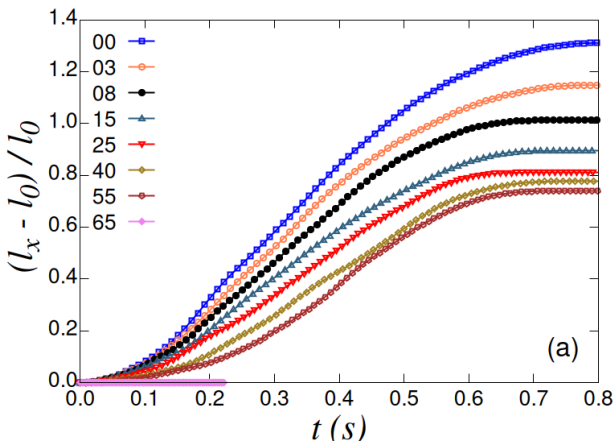
**3. Kết quả**

Thực hiện khảo sát sự tác động của lực liên kết giữa các phần tử trong khối vật liệu sụp đổ trên mặt phẳng nằm ngang thông qua số Bond  $Bo = c/mg$  thay đổi từ 0, 3, 8, 15, 25, 40, 55, 65, 75, 100. Các phần tử trong khối vật liệu là các hạt ngũ giác đều, không biến dạng trong suốt quá trình mô phỏng. Dưới tác dụng của trọng lực, sau khi bị kích hoạt các hạt vật

liệu đổ sụp xuống theo phương thẳng đứng Y, sau đó chảy tràn trên mặt phẳng nằm ngang theo phương X. Ảnh hưởng của số Bo này tác động đến hình thái khối sạt, vận tốc dịch chuyển trung bình của khối vật liệu, biến thiên năng lượng trong suốt quá trình sạt trượt được phân tích cụ thể sau đây.

**3.1 Hình thái khối sạt**

Trong nghiên cứu này khảo sát kích thước khối sạt ban đầu có chiều cao  $h_0 = 0,25$  (m), chiều dài khối sạt ban đầu  $l_0 = 0,5$  (m), kích thước này được chọn để đánh giá chi tiết ảnh hưởng của số Bo, khi tỉ lệ  $a = h_0/l_0 = 0,5$  là phù hợp để không chịu ảnh hưởng lớn bởi chiều cao khối sạt. Khi này, khối vật liệu chỉ sạt một phần phía bên phải của khối, và không làm giảm chiều cao khối sạt ban đầu.



**Hình 2.** Chiều dài khối sạt trượt theo thời gian (a); chiều dài lớn nhất tương ứng với các giá trị Bo

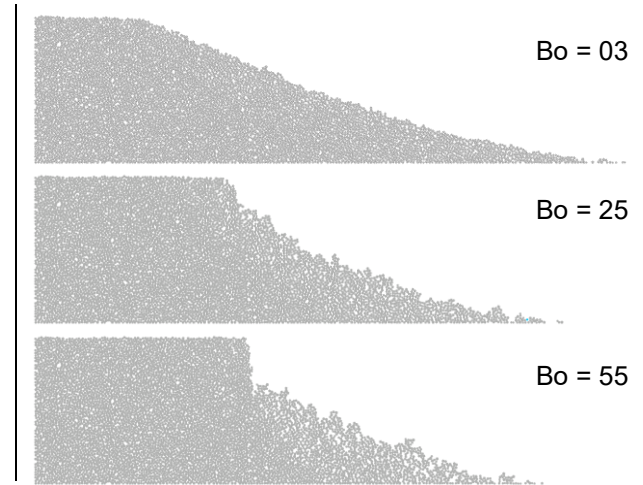
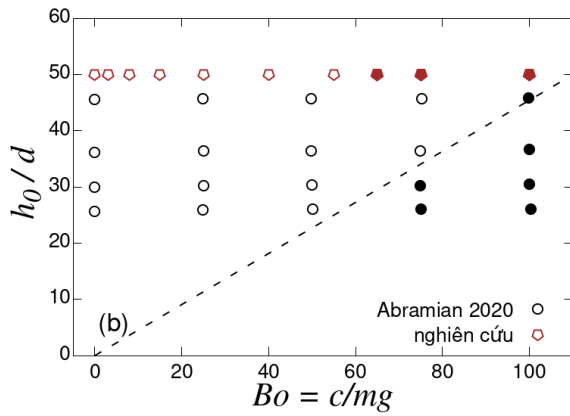
Hình 2 mô tả chiều dài hay phạm vi khối vật liệu sạt trượt trên mặt phẳng nằm ngang, trong đó Hình 2 (a) là chiều dài lớn nhất theo thời gian và Hình 2 (b) là chiều dài lớn nhất tương ứng các mô phỏng với các giá trị Bo. Khi giá trị Bo = 0, tương ứng với lúc này mẫu vật liệu không có lực liên kết giữa các phần tử, nên phạm vi dịch chuyển lớn trong suốt quá trình sạt trượt. Khi giá trị Bo tăng lên thì chiều dài khối vật liệu sạt trượt lớn nhất  $l_f$  giảm dần từ 1,3 đến 0,75 lần chiều dài ban đầu tương ứng với Bo = 0 và Bo = 55. Trong khi tăng giá trị Bo từ 65 trở lên, thì lúc này khối vật liệu không sạt, tức là tác động của lực liên kết giữa các phần tử ngũ giác đủ lớn làm cho khối vật liệu không sạt trượt dưới tác dụng của trọng lực. Tại Hình 2 (b), thấy rằng khi giá trị Bo tăng lên từ 0 đến 25 thì chiều dài khối vật liệu sạt trượt giảm đi đáng kể, trong khi Bo tăng từ 25 đến 55 thì chiều dài  $l_f$  này

giảm không nhiều. Điều này cho thấy tác động đáng kể của lực liên kết đến khối vật liệu, khi Bo tăng lên thì chỉ một phần nhỏ khối vật liệu mất ổn định sạt trượt xuống mặt phẳng nằm ngang. Điều này rất phù hợp trong điều kiện tự nhiên, khối đất đạt trạng thái ổn định khi duy trì lực liên kết trong đất, ngược lại dưới tác động bên ngoài đã làm giảm lực liên kết giữa các phần tử làm cho khối đất đá sạt trượt.

Trong nghiên cứu của Abramian và cộng sự đã thực hiện trên mô hình hạt vật liệu là hình tròn (mô hình 2 chiều), thì khi tăng chỉ số Bo, khối vật liệu đạt trạng thái ổn định (không sạt biểu diễn qua các chấm tròn đậm), còn ứng với các giá trị Bo nhỏ thì khối vật liệu mất ổn định và sạt trượt dưới tác động của trọng lực (biểu diễn bằng chấm tròn trắng) như mô tả Hình 3. Đối chiếu kết quả của nghiên cứu này với kết quả đã công bố của nhóm nghiên của Abramian, khi giá trị Bo đạt đến 65 thì khối vật liệu được cấu thành từ

các phần tử ngũ giác đều đã đạt ổn định, ngược lại khi  $Bo$  nhỏ hơn 65 thì khối vật liệu sạt trượt. Điều này được lý giải là do khi mô phỏng, các vật liệu dạng tròn có xu hướng chuyển động lớn hơn, trong khi các

vật liệu dạng đa giác thì ngoài tác động của lực liên kết, các hạt đa giác có xu hướng then cài lẫn nhau, liên kết bề mặt giữa các phần tử tăng lên làm cho khối vật liệu ít sạt trượt hơn.

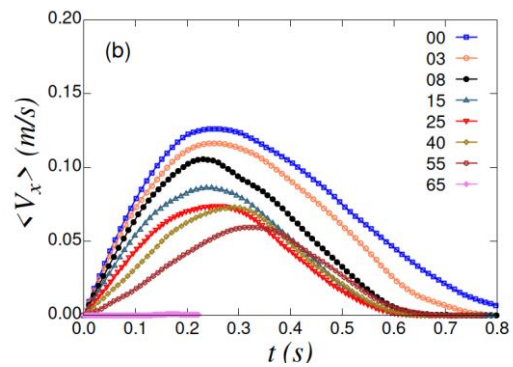
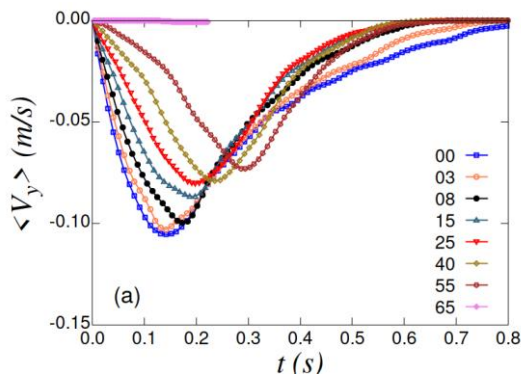


**Hình 3.** Đối sánh kết quả nghiên cứu với kết quả của tác giả Abramian [18], hình thái cuối cùng tại thời điểm  $t = 0.8$  (s) của 03 giá trị  $Bo$  tương ứng (hình phải)

Ba hình thái của khối sạt ở thời điểm ổn định cuối cùng tương ứng với 3 giá trị  $Bo = 3, 25,$  và  $55$  được mô tả ở Hình 3 (phía phải). Nhận thấy rằng khi  $Bo$  tăng lên thì bề mặt khối sạt bắt đầu xuất hiện các khối liên kết nhỏ thay vì một mặt phẳng từ đỉnh xuống chân như  $Bo = 3$ . Các khối liên kết nhỏ này chính là do lực liên kết tăng lên giữa các phần tử tạo ra, làm giảm chiều dài, phạm vi khối sạt ở trạng thái cuối như kết quả ở Hình 2(a).

**3.2 Vận tốc**

Dưới tác động trọng lực thì khối vật liệu sạt trượt ban đầu theo phương thẳng đứng  $Y$ , sau đó chảy dài trên mặt phẳng ngang theo phương  $X$ . Tuy nhiên lực liên kết giữa các phần tử hay chỉ số Bond, làm thay đổi thời gian sạt trượt của khối vật liệu cụ thể được mô tả như Hình 4.



**Hình 4.** Mô tả vận tốc trung bình của khối sạt theo thời gian: (a) phương  $Y$ , (b) phương  $X$

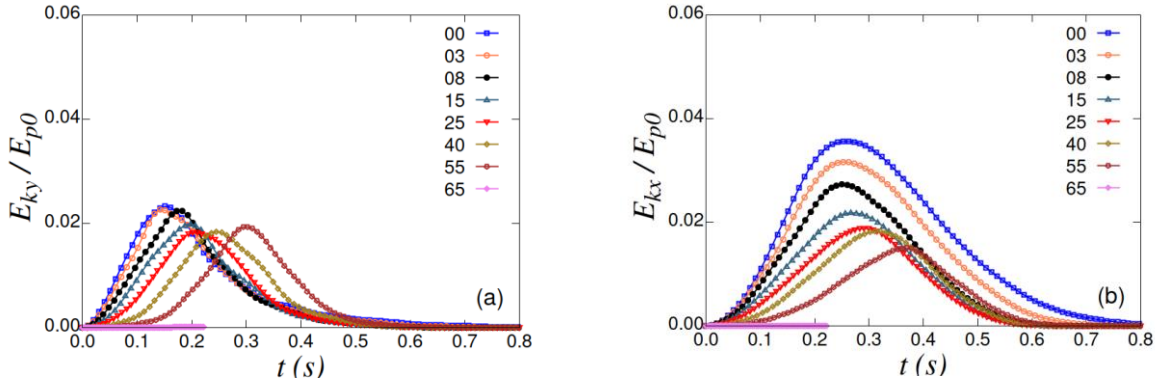
Hình 4 mô tả vận tốc trung bình của khối vật liệu sụp đổ theo thời gian sau khi bị kích hoạt tương ứng với các giá trị  $Bo$ , trong đó Hình 4(a) mô tả vận tốc trung bình  $V_y$  của khối vật liệu theo phương thẳng đứng, còn Hình 4 (b) mô tả theo phương ngang  $V_x$ . Thật vậy, dưới tác dụng của lực liên kết đã làm cho thời gian khối sạt có sự khác biệt đáng kể, khi các mô phỏng có trị số  $Bo$  nhỏ thì khối sạt chuyển động nhanh theo phương đứng và đạt cực đại trong giai đoạn tại  $t = 0,1 - 0,2$  (s) tại Hình 4(a), sau đó chuyển

dần sang dịch chuyển theo phương ngang và đạt cực đại tại  $0,2 - 0,3$  (s) theo phương ngang Hình 4(b). Trái ngược với đó, khi lực liên kết giữa các phần tử tăng lên thì làm cho khối sạt kéo dài thời gian sụp đổ và vận tốc trung bình đạt cực đại tại  $t = 0,2 - 0,3$  (s) theo phương đứng và  $0,25 - 0,4$  (s) theo phương ngang. Tuy khối vật liệu sụp đổ với tốc độ chậm hơn tương ứng với  $Bo > 25$ , tuy nhiên các khối vật liệu này có xu hướng kết thúc đạt ổn định sớm hơn sau khoảng  $0,6$  (s) so với hơn  $0,8$  (s) đối với các mô phỏng có  $Bo$

< 25. Điều này được giải thích là do lực liên kết giữa các phần tử đã tác động đến các phần tử trong khối vật liệu, ngăn cản sự dịch chuyển chung của các phần tử trong khối vật liệu.

**3.3 Năng lượng khối sạt**

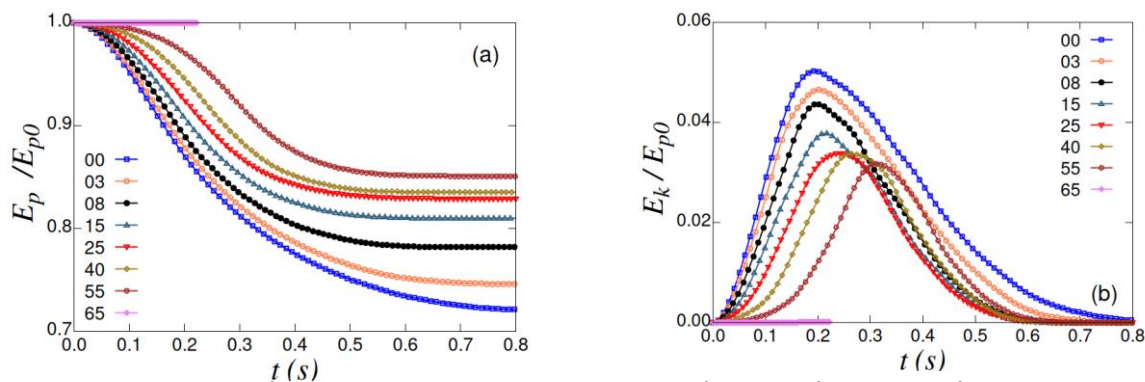
Từ vận tốc trung bình của khối vật liệu sạt trượt dưới tác động của trọng lực qua các mô phỏng tương ứng với các giá trị  $Bo$ , nghiên cứu này tiếp tục phân tích sự biến thiên năng lượng trong suốt quá trình sụp đổ của khối vật liệu như là động năng và thế năng.



**Hình 5.** Mô tả biến thiên động năng theo các phương: (a) phương Y, (b) phương X

Hình 5 mô tả sự biến thiên động năng theo phương đứng (Hình 5 (a)) và theo phương ngang (Hình 5 (b)) theo thời gian  $t$  (s). Trong đó  $E_{ky} = 0,5m_i v_{iy}^2$ ,  $E_{kx} = 0,5m_i v_{ix}^2$  lần lượt là động năng theo phương Y và theo phương X,  $m_i$  là khối lượng phần tử thứ  $i$ ,  $v_{iy}$ ,  $v_{ix}$  là vận tốc theo phương Y và phương X của phần tử thứ  $i$ .  $E_{p0} = m_i g h_i$  năng lượng ban đầu của khối vật liệu, đây cũng chính là thế năng ban đầu. Trong khi, giá trị động năng biến thiên theo phương Y của các mô phỏng ứng với các giá trị  $Bo$  là gần như nhau và gần bằng 0,02, nhưng thời gian đạt cực đại lại khác nhau như kết quả thể hiện trong Hình 5 (a). Điều này như đã giải thích ở phần trên, do lực dính giữa các phần tử ngũ giác cấu thành khối

vật liệu tăng lên làm tăng ổn định kết cấu của khối. Do vậy thời gian đổ sụp của khối vật liệu trễ hơn so với các mô phỏng có giá trị  $Bo$  nhỏ. Trái ngược với biến thiên động năng của phương Y, thì biến thiên động năng theo phương X có sự khác biệt rõ đối với các giá trị  $Bo$  nhỏ. Khi  $Bo$  nhỏ, lực liên kết nhỏ hoặc bằng không với  $Bo = 0$ , các phần tử có vận tốc dịch chuyển lớn nên động năng biến thiên lớn. Khi  $Bo > 25$  thì dường như giá trị cực đại là như nhau, lúc này chỉ một phần của khối vật liệu bị sạt, chỉ khác nhau ở thời gian trễ hơn đối với  $Bo$  lớn hơn như thể hiện ở Hình 5 (b). Khi  $Bo = c/mg$  từ 65 trở lên thì khối không bị sạt nên vận tốc bằng không và năng lượng bằng không.



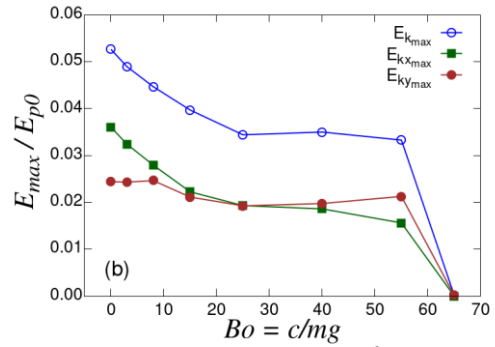
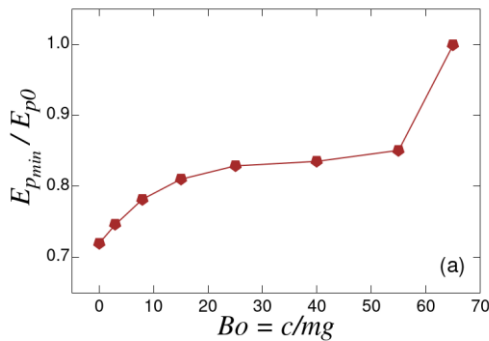
**Hình 6.** Mô tả sự biến thiên năng lượng theo thời gian: (a) biến thiên thế năng, (b) biến thiên động năng

Để khảo sát phần chuyển hóa năng lượng trong suốt quá trình sụp đổ, Hình 6 mô tả kết quả khảo sát biến thiên thế năng  $E_p$  (Hình 6 (a)) và biến thiên động năng trung bình  $E_k$  (Hình 6 (b)) theo thời gian  $t$  (s), trong đó  $E_k = 0,5m_i(v_{ix}^2 + v_{iy}^2) = E_{kx} + E_{ky}$ . Mặc dù sự biến thiên động năng theo phương Y là gần như nhau, tuy nhiên sự biến thiên thế năng rất rõ ràng như mô tả Hình 6 (a), thế năng giảm nhiều đối với  $Bo$

nhỏ và nhỏ hơn đối với  $Bo$  lớn. Điều này cho thấy thể tích khối vật liệu bị sạt tỉ lệ nghịch với việc tăng lực liên kết giữa các phần tử, rất phù hợp với trạng thái vật liệu trong tự nhiên. Khi các mô phỏng có giá trị  $Bo$  nhỏ, thể tích khối sạt lớn, các hạt có xu hướng trượt dài/chảy tràn trên mặt phẳng nằm ngang phương X, kéo theo động năng lớn hơn so với các mô phỏng có  $Bo$  lớn. Tỉ lệ động năng trên thế năng

ban đầu  $E_k/E_{p0}$  đạt cực đại tại giá trị 0,05 khi  $Bo = 0$ , và giảm dần cho đến khi  $Bo > 25$  thì  $E_k/E_{p0} \approx 0,03$ . Điều này chứng tỏ khi  $Bo$  lớn, khối vật liệu mất ổn

định, dẫn đến một phần nhỏ khối lượng bị đứt gãy, đổ sập, tuy nhiên sớm đạt trạng thái ổn định như thể hiện ở Hình 6(b).



**Hình 7.** Giá trị thể năng tại trạng thái cuối cùng (a) và động năng cực đại (b) theo trị số  $Bo$

Khi thực hiện khảo sát giá trị thể năng khối vật liệu tại thời điểm ổn định cuối cùng ( $E_{p_{min}}$ ) và giá trị cực đại tương ứng của tổng động năng ( $E_{k_{max}}$ ), động năng theo phương X ( $E_{kx_{max}}$ ), động năng theo phương Y ( $E_{ky_{max}}$ ) trong quá trình sạt trượt để xem xét tác động của lực liên kết giữa các phần tử đa giác trong khối vật liệu đã được thể hiện tại Hình 7(a) và Hình 7 (b) tương ứng. Ngoài trường hợp  $Bo$  từ 65 trở lên thì lực liên kết đủ lớn để khối vật liệu không bị sạt trượt dưới tác động của trọng lực, thì các trường hợp  $Bo$  nhỏ hơn đã xảy ra sạt trượt. Về phương diện tổng quát, khi  $Bo$  nhỏ thì khối vật liệu ban đầu bị sạt trượt một phần khối lượng lớn thể tích nên thể năng giảm nhiều, và cũng đạt động năng lớn hơn. Trong khi  $Bo$  lớn hơn 25 thì dường như sự khác biệt giữa động năng cực đại và giá trị thể năng cuối cùng là không nhiều. Lưu ý, các giá trị  $E_{max}$  tại Hình 7(b) được trích xuất tại các thời điểm khác nhau khi động năng tương ứng đạt cực đại của các mô phỏng  $Bo$  khác nhau.

**4. Kết luận**

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử rời rạc (DEM) để thực hiện mô phỏng 2 chiều (2D) khảo sát tác động của lực liên kết giữa các phần tử đa giác trong khối vật liệu đổ sập trên mặt phẳng nằm ngang. Khối vật liệu ban đầu có kích thước chiều cao và chiều dài lần lượt là  $h_0$  và  $l_0$ , được cấu thành từ hơn 6700 phần tử ngũ giác đều, nội tiếp đường tròn có bán kính  $R$ , kích thước lớn nhất 6mm và nhỏ nhất 4mm. Lực liên kết giữa các phần tử ngũ giác được thiết lập thông qua chỉ số  $Bo = c/mg$  từ 0 đến 100 (Bond number), khi  $Bo$  bằng không là không có lực liên kết giữa các phần tử. Dưới tác động của trọng lực, các mô phỏng tương ứng với các giá trị  $Bo$  sập đổ theo phương thẳng đứng sau đó chảy dài trên mặt phẳng nằm ngang.

chiều dài lớn nhất của khối vật liệu sạt trượt, vận tốc trung bình dịch chuyển, sự biến thiên năng lượng của khối vật liệu trong suốt quá trình sập đổ. Những kết quả thu được cho thấy khi  $Bo$  lớn từ 65 trở lên thì khối vật liệu không có hiện tượng sập đổ, hay là lực liên kết giữa các phần tử đủ lớn hơn tác động của trọng lực nên khối vật liệu đạt ổn định. Ngược lại khi  $Bo$  nhỏ hơn 65 thì thấy rõ tác động của lực liên kết, đặc biệt khi giá trị  $Bo$  càng nhỏ hơn 25. Mức độ lan rộng hay phạm vi ảnh hưởng của khối sạt lớn cũng như sự biến thiên động năng lớn, thể năng giảm nhiều đối với  $Bo$  nhỏ hơn 25, trong khi không khác biệt nhiều với các mô phỏng có  $Bo$  lớn hơn 25. Đặc biệt khi đối sánh với kết quả đã công bố của nhóm tác giả Abramian và nhóm nghiên cứu, thấy rõ ảnh hưởng của hình dạng hạt giữa hạt tròn (của Abramian) và hạt đa giác (nghiên cứu này) đã tác động lớn đến trạng thái ổn định/mất ổn định của khối vật liệu khi xét đến cùng giá trị  $Bo$ .

Trong nghiên cứu này, chỉ số Bond được thiết lập trên cơ sở lực liên kết cơ học giữa các phần tử trong môi trường khô ( $Bo = c/mg$ ). Mô hình chưa xét đến tác động của nước như áp lực nước lỗ rỗng, lực mao dẫn hay cơ chế hai pha nước-rắn vốn chi phối mạnh các dạng sạt lở bão hòa nước, đặc biệt trong môi trường chịu nhiều tác động từ mưa lớn như ở Việt Nam. Đồng thời, nghiên cứu này không nhằm khảo sát toàn bộ phổ hình dạng hạt, mà tập trung làm rõ vai trò của lực liên kết giữa các phần tử trong khối vật liệu có hình dạng phi tròn thông qua một dạng hạt ngũ giác đều đại diện, những kết quả thu được của nghiên cứu này rất phù hợp với những kết quả đã nghiên cứu trước đây. Đây xem như là tài liệu tham khảo cho các nghiên cứu đánh giá các dạng sạt lở đất đá khô hoặc chỉ ngâm nước nhẹ vốn phổ biến tại miền Trung Việt Nam, cũng như thực hiện mô phỏng tốt trong giai đoạn khởi phát của các vụ sạt lở dạng

khối, nơi liên kết giữa đất đá bị suy giảm trước khi mất ổn định hoàn toàn.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] Huang J, Li X, Zhang L, Li Y, Wang P (2020). *Risk perception and management of debris flow hazards in the upper salween valley region: Implications for disaster risk reduction in marginalized mountain communities*. International Journal of Disaster Risk Reduction;51. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101856>.
- [2] Thouret JC, Antoine S, Magill C, Ollier C (2020). *Lahars and debris flows: Characteristics and impacts*. Earth Sci Rev;201. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103003>.
- [3] Cabral V, Reis F, Veloso V, Correa C, Kuhn C, Zarfl C (2023). *The consequences of debris flows in Brazil: a historical analysis based on recorded events in the last 100 years*. Landslides; 20:511–29. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01984-7>.
- [4] Hungr O, Leroueil S, Picarelli L (2014). *The Varnes classification of landslide types, an update*. Landslides;11:167–94. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
- [5] Lube G, Huppert HE, Sparks RSJ, Freundt A (2005). *Collapses of two-dimensional granular columns*. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys;72. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.72.041301>.
- [6] Lajeunesse E, Monnier JB, Homsy GM (2005). *Granular slumping on a horizontal surface*. Physics of Fluids;17. <https://doi.org/10.1063/1.2087687>.
- [7] Zenit R (2005). *Computer simulations of the collapse of a granular column*. Physics of Fluids;17. <https://doi.org/10.1063/1.1862240>.
- [8] Staron L, Hinch EJ (2005). *Study of the collapse of granular columns using two-dimensional discrete-grain simulation*. J Fluid Mech; 545:1–27. <https://doi.org/10.1017/S0022112005006415>.
- [9] Nguyen TH, Vo TT (2025). *Unified power-law scaling behavior of collapse mobility and deposition morphology of granular columns composed of frictional-pentagonal grains*. Granul Matter;27. <https://doi.org/10.1007/s10035-025-01586-9>
- [10] Girolami L, Hergault V, Vinay G, Wachs A (2012). *A three-dimensional discrete-grain model for the simulation of dam-break rectangular collapses: Comparison between numerical results and experiments*. Granul Matter;14:381–92. <https://doi.org/10.1007/s10035-012-0342-3>.
- [11] Man T, Huppert HE, Li L, Galindo-Torres SA (2021). *Deposition morphology of granular column collapses*. Granul Matter;23. <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01112-7>.
- [12] Gong J, Cheng L, Liu M, Jiang J, Ou X (2024). *The effect of particle shape on the collapse characteristics of granular columns via the DEM*. Advanced Powder Technology;35. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.104283>.
- [13] Vo TT, Nguyen TH (2025). *Combined Effect of Particle Shape and Interparticle Friction on the Collapse Mobility and Deposition Morphology of a Granular Column*. Int J Numer Anal Methods Geomech. <https://doi.org/10.1002/nag.70174>.
- [14] Nguyen T-H, Ngo T-V, Vo T-T (2025). *Combined Inter-Particle and Wall-Particle Friction Coefficient Effects on Collapse Mobility and Deposition Morphology of a Granular Column Composed of Pentagonal Grains*. Mechanics of Solids. <https://doi.org/10.1134/S0025654425600618>.
- [15] Hoang UT, Nguyen NHT (2023). *Particle shape effects on granular column collapse using superquadric DEM*. Powder Technol;424. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118559>.
- [16] Jiang H, Nie J, Debanath OC, Li Y (2024). *Dynamic column collapse of dry granular materials with multi-scale shape characteristics*. Comput Geotech 2025;177. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106873>.
- [17] Zhang Q, Huang B lin, Zhao H lin, Chen X ting, Luo C lin (2020). *Channelized and unchannelized collapses of granular columns on a horizontal surface*. J Mt Sci 2020;17:2982–96. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6021-7>.
- [18] Abramian A, Staron L, Lagrée P-Y, Abramian A, Staron L (2020). *The slumping of a cohesive granular column: Continuum and discrete modeling*. J Rheol (N Y N Y) n.d.. <https://doi.org/10.1122/8.0000049i>.
- [19] Zhu R, He Z, Zhao K, Vowinkel B, Meiburg E (2022). *Grain-resolving simulations of submerged cohesive granular collapse*. J Fluid Mech;942. <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.404>.
- [20] Vo TT, Nguyen TK (2024). *Collapse dynamics and deposition morphology of low-viscocohesive granular columns on a rough horizontal surface*. Phys Rev E;109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.109.014904>.
- [21] Sharma RS, Sarlin W, Xing L, Morize C, Gondret P, Sauret A (2024). *The effects of interparticle cohesion on the collapse of granular columns*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.07430>.
- [22] Gans A, Abramian A, Lagrée PY, Gong M, Sauret A, Pouliquen O, et al (2023). *Collapse of a cohesive granular column*. J Fluid Mech;959. <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.180>.
- [23] Nezamabadi S, Nguyen TH, Delenne JY, Radjai F (2017). *Modeling soft granular materials*. Granul Matter;19:1–12. <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0689-y>.
- [24] Nguyễn TH, Ngô TV (2024). *Nghiên cứu hình thái biến dạng và tương tác giữa các hạt vật liệu của khối đá đắp đập*. Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng;3:56–63. <https://doi.org/10.59382/j-ibst.2024.vi.vol3-8>.