

# Khả năng xói bề mặt của đất dính hạt mịn

D. Marot<sup>1</sup>, H.H. Nguyen<sup>2</sup>, F. Bendahmane<sup>1</sup>, O. Amiri<sup>1</sup>, S. Bonnet<sup>1</sup>

(1) Viện nghiên cứu GeM, Đại học Nantes, Saint Nazaire, Pháp

(2) Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng, Việt Nam

**TÓM TẮT:** Xói là một trong những nguyên nhân chính gây nên hiện tượng mất ổn định trong các công trình như đập, đê hay các hồ chứa nước bằng đất. Bài viết trình bày hiện tượng xói xảy ra tại bề mặt tiếp xúc giữa đất và nước thông qua thí nghiệm mô phỏng phun nước tạo áp lực JET (Jet Erosion Test). Thí nghiệm được sử dụng để đánh giá khả năng chịu xói của hai loại cát-sét khác nhau. 23 mẫu thí nghiệm chế bị theo phương pháp đầm nén tiêu chuẩn Proctor, được phân tích đồng thời bằng phương pháp năng lượng và phương pháp đề nghị bởi 2 tác giả Hanson và Simon. Phương pháp phân tích dựa trên năng lượng tiêu hao của dòng chảy gây xói cho kết quả đánh giá, phân loại đặc trưng xói của đất chi tiết hơn và có khoảng phân loại hẹp hơn. Với cả 2 loại cát-sét thí nghiệm, đặc trưng chịu xói đánh giá thông qua chỉ số cường độ xói có một liên hệ tuyến tính với độ bão hòa. Nghiên cứu cũng cho thấy có ảnh hưởng vì cấu trúc của các mẫu đất thí nghiệm đến độ nhạy xói bề mặt.

## 1. GIỚI THIỆU

### 1.1 Thuật ngữ và ngữ cảnh

Dưới tác dụng của dòng chảy ngầm, các công trình chắn giữ nước được xây dựng bằng đất (như đê, hồ chứa nước, đập và nền móng phía dưới) có thể chịu một hiện tượng xói và cuốn trôi các thành phần hạt nhỏ trong kết cấu đất. Hai hiện tượng xói có thể được phân biệt: xói ngầm và xói xảy ra ở bề mặt. Hiện tượng xói ngầm liên quan đến sự tách và cuốn trôi các hạt mịn, làm cho chúng di chuyển trong kết cấu lỗ rỗng giữa các hạt cốt liệu lớn. Hiện tượng xói bề mặt có thể gặp trong các đường nứt, hoặc các lỗ rò, thủng trong kết cấu công trình, hình thành các đường ống “piping” (Fell & Fry, 2007). Xói bề mặt xuất hiện giữa hai vật liệu có kích cỡ thành phần hạt khác nhau, được gọi là xói tại vị trí tiếp xúc (contact erosion). Tuy nhiên, mặt phân cách cũng có thể tồn tại ở mặt phân cách giữa nước và đất. Trong nhiều trường hợp, dòng chảy ngầm có thể có hướng vuông góc với mặt phân cách, hiện tượng xói trong trường hợp này thường được gọi là hiện tượng xói đùn.

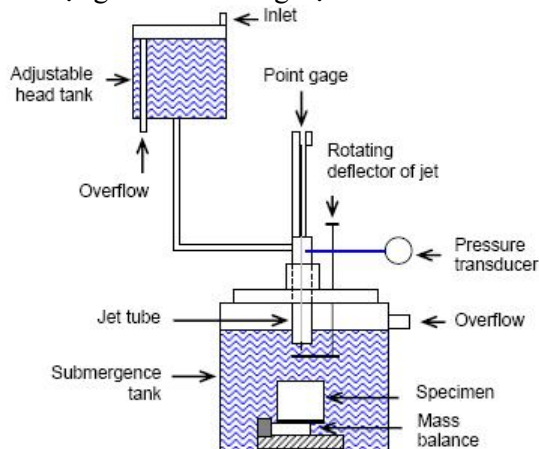
Xói xảy ra tại bề mặt tiếp xúc là một trong những hiện tượng chính làm tăng nguy cơ mất ổn định trong các công trình được xây dựng bằng đất và nền móng công trình. Với mục đích tìm được một phương pháp đánh giá an toàn cho các công trình này, nhiều nghiên cứu được thực hiện dựa thông qua việc phát triển các thiết bị thí nghiệm khác nhau để đánh giá và phân loại khả năng chịu xói của đất. Trong số đó, thí nghiệm JET được sử dụng khá phổ biến nhờ tính đơn giản, có thể thí nghiệm trên các loại đất có tính dẻo thấp và đất bão hòa. Một thuận lợi khác của thí nghiệm JET nhờ khả năng có thể thực hiện thí nghiệm tại hiện

trường và có thể đánh giá cường độ trên mẫu nguyên dạng.

### 1.2 Thí nghiệm JET

Thí nghiệm JET được phát triển bởi Dunn (1959), và được cải tiến bởi Hanson và Cook (2004). Thiết bị được thiết kế sao cho tia nước được phun từ miệng lỗ được bố trí ngập trong nước, tác dụng một áp lực trực tiếp lên bề mặt mẫu đất thí nghiệm. Một thiết bị thí nghiệm tương tự được nêu trong tiêu chuẩn ASTM D5852. Trong phòng thí nghiệm, những mẫu đất được đầm nén theo phương pháp đầm nén tiêu chuẩn Protor.

Hình 1 thể hiện nguyên lý cấu tạo của thiết bị thí nghiệm. Thí nghiệm JET bao gồm bể chứa nước có thể điều chỉnh chiều cao cột nước, một ống (Jet tube) có lỗ phun nước ngập trong bể chứa hạ lưu, một thước đo chiều sâu xói (point gage) và một bể chứa tia nước phun ra từ miệng lỗ trong đó có chứa đựng mẫu đất thí nghiệm.



Hình 1: Sơ đồ thí nghiệm JET

Dụng cụ đo được điều chỉnh vừa để đóng miệng lỗ, vừa để đo chiều sâu xói (J) tương ứng với các khoảng thời gian qui định (đường kính đo).

Thí nghiệm được sử dụng cho nghiên cứu này cũng bao gồm một cân cảm biến (mass balance) được đặt dưới mẫu đất để đo sự thay đổi khối lượng của mẫu đất trong suốt quá trình thí nghiệm.

### 1.3 Phương pháp phân tích kết quả đo và phân loại đặc tính xói của đất

Hai phương pháp phân tích kết quả thí nghiệm JET đang tồn tại có thể phân biệt như sau:

Phương pháp đầu tiên được đề xuất bởi Hanson và Simon (2001) dựa trên quy luật xói tuyến tính, liên quan giữa tốc độ xói thể tích,  $\dot{\epsilon}$ , với ứng suất cắt thủy lực  $\tau$  vượt quá một giá trị ngưỡng  $\tau_c$ . Giá trị ứng suất cắt thủy lực giới hạn là giá trị tối thiểu cần thiết bắt đầu gây nên hiện tượng xói. Phương trình miêu tả định luật xói:

$$\dot{\epsilon} = k_d (\tau - \tau_c) \quad (1)$$

Trong đó  $k_d$  là hệ số tốc độ xói.

Ở thời gian  $t = 0$ , khoảng cách từ đầu miệng phun tia nước tạo áp lực đến bề mặt mẫu đất là  $J_0$ . Ở thời gian  $t = \infty$ , J tiến đến một chiều sâu cân bằng giới hạn  $J_e$ . Đối với khoảng cách nhỏ hơn  $J_p = 6.2d_0$ , dòng chảy bao gồm một lõi trong đó vận tốc bằng với vận tốc ban đầu  $u(0;0)$  tại miệng lỗ phun và càng khu vực vùng lõi thì vận tốc trên trục tia phun tỉ lệ nghịch với khoảng cách.

$$u(0, J) = \frac{J_p}{J} u(0;0) \quad (2)$$

Ứng suất cắt thủy lực tương đương tác dụng lên bề mặt lớp đất, có thể được tính toán theo hàm của tốc độ dòng chảy  $u(0, J)$  theo trục của tia nước:

$$\tau = C_f \rho u(0, J)^2 \quad (3)$$

Trong đó  $C_f$  là hệ số ma sát, giả thuyết là hằng số,  $C_f = 0.00416$ .

Quy luật xói không thứ nguyên và đặc trưng về thời gian được xác định. Bằng cách lấy tích phân của phương trình xói, thời gian được biểu diễn bằng một hàm với chiều sâu  $J^*$  không thứ nguyên.

$$t = T_R \left( -J^* \Big|_{J_i^*}^{J^*} + \frac{1}{2} \text{Ln} \left( \frac{1+J^*}{1-J^*} \right) \Big|_{J_i^*}^{J^*} \right) \quad (4)$$

$$\text{Với } T_R = \frac{J_e}{k_d \cdot \tau_c} \quad (5)$$

$$\text{Và } J^* = \frac{J}{J_e} \quad (6)$$

Diễn biến chiều sâu xói với thời gian là một hàm hyperbolic dùng để dự đoán chiều sâu xói cuối cùng, tương đương với chiều sâu cân bằng (Blaisdell và Anderson, 1981). Từ đó cho phép xác định được ứng suất cắt thủy lực giới hạn  $\tau_c$ . Dữ liệu thí nghiệm trùng khớp với mô hình được đưa ra ở phương trình 6. Cho phép dự đoán hệ số đặc trưng về thời gian và hệ số biểu diễn tốc độ xói thể tích  $k_d$ .

Sự phân loại mức độ xói của đất đề xuất bởi Hanson và Simon (2001) được dựa trên đồng thời cả ứng suất cắt thủy lực giới hạn và hệ số tỉ lệ xói xác định từ thí nghiệm JET. Hệ thống phân loại của Hanson và Simon chia làm 5 cấp từ vật liệu có cường độ chịu xói rất cao đến rất dễ xói.

Phương pháp thứ 2 được đề xuất bởi Marot và các cộng sự (2011) dựa trên sự tiêu hao năng lượng giữa nước và đất. Phương trình năng lượng cho chất lỏng (bỏ qua pha đất bên trong thể tích) có thể được viết:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \frac{d}{dt} \int_{\text{Mass}} \left( e_{\text{int}} + \frac{u^2}{2} + \vec{g} \cdot \vec{x} \right) \cdot dM \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{Volume}} \left( e_{\text{int}} + \frac{u^2}{2} + \vec{g} \cdot \vec{x} \right) \cdot \rho_w dV + \oint_S \left( e_{\text{int}} + \frac{u^2}{2} + \vec{g} \cdot \vec{x} \right) \cdot \rho_w \cdot (\vec{U} \cdot \vec{n}) \cdot dS \end{aligned} \quad (7)$$

Trong đó: M- Khối lượng chất lỏng; V- Thể tích chất lỏng;  $e_{\text{int}}$ - năng lượng bên trong, S-bề mặt tiếp xúc giữa chất lỏng và môi trường; S-véc tơ pháp tuyến với bề mặt tiếp xúc; U- vận tốc chất lỏng (có các thành phần theo các trục là u, v, w); g-gia tốc trọng trường;  $\rho_w$ - khối lượng riêng của chất lỏng, x: trục tọa độ.

Năng lượng tổng cộng là tổng năng lượng dưới dạng cơ học và sự trao đổi năng lượng giữa hệ thống và môi trường  $E_{\text{ther}}$ .

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE_{\text{ther}}}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad (8)$$

Toàn bộ hệ thống thí nghiệm được đặt trong một phòng thí nghiệm có nhiệt độ được khống chế và nó được cung cấp bởi hệ thống nước công cộng, vì vậy trong suốt quá trình kiểm tra, hệ thống có thể được xem là đẳng nhiệt và năng lượng bên trong xem như hằng số. Tất cả những thí nghiệm được thực hiện trong cùng điều kiện, vì vậy khi so sánh những thí nghiệm có thể bỏ qua những sai số tương đối của sự thay đổi năng lượng giữa hệ thống và môi trường. Kết quả đại lượng  $\frac{dE_{\text{ther}}}{dt}$  có thể cho phép bỏ qua. Các kết quả của thí nghiệm JET được phân tích trong trạng thái ổn định (giả thuyết trong mỗi bước thời gian vận tốc nước biến

đôi chậm), động năng mất mát không đáng kể. Do đó phương trình 7 trở thành:

$$\frac{dW}{dt} = \iint_S \left( \frac{u^2}{2} + \vec{g} \cdot \vec{x} \right) \rho_w (\vec{U} \cdot \vec{n}) dS \quad (9)$$

Năng lượng cơ học W bao gồm: năng lượng do áp lực của dòng chảy, do tính nhớt trong chất lỏng và năng lượng gây xói

$$\begin{aligned} \frac{dW_{\text{pressure}}}{dt} + \frac{dW_{\text{viscous in fluid}}}{dt} + \frac{dW_{\text{erosion}}}{dt} \\ = \iint_S \left( \frac{u^2}{2} + \vec{g} \cdot \vec{x} \right) \rho_w (\vec{U} \cdot \vec{n}) dS \end{aligned} \quad (10)$$

Khác với trường hợp tia nước được phun tự do, trường hợp này tia nước được phun ra từ miệng lỗ của thiết bị JET có độ lệch so với trục ở trước bề mặt tiếp xúc giữa đất với nước. Có thể giả thuyết rằng đây chính là lý do gây nên hiện tượng xói, sự lệch trục của tia nước áp lực tác dụng lên bề mặt lớp đất sẽ làm tăng ứng suất cắt và biến đổi lớn về áp lực.

Trong thí nghiệm phun nước trước một tường chắn, Beltaos và Rajaratnam (1974) quan sát và thấy rằng ứng suất cắt tại mặt cắt tường tăng tuyến tính với khoảng cách tính từ trục phun (r), đạt đến giá trị cực đại tại vị trí  $r = 0.14J$ , và sau đó giảm dần khi r tăng lên. Thêm vào đó khi tỉ lệ  $r/J$  tăng từ 0 đến 0.14 áp lực ở tường giảm nhanh và bằng 10% giá trị lớn nhất của áp lực tại vị trí trục của tia nước. Tại độ sâu J, năng lượng gây xói được giả thuyết giới hạn trong phạm vi  $r \leq 0.14J$ .

Beltaos và Rajaratnam (1974) đề nghị công thức của vận tốc theo phương đứng trên trục tia Jet.

$$\frac{u(r, Z)}{u(0, Z)} = \exp \left[ -0.693 \left( \frac{r}{b_u} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Với mục đích tính toán sự thay đổi vận tốc theo phương thẳng đứng so với độ sâu J và khoảng cách r từ trục tia Jet. Kết hợp phương trình 10 và 11 cho phép biểu diễn năng lượng cơ học gây xói theo thời gian.

$$\frac{dW_{\text{erosion}}}{dt} = \pi \int_0^{0.14J} \rho_w u^3(0, J) \left( \exp \left( -0.693 \left( \frac{r}{b_u} \right)^2 \right) \right)^3 r dr \quad (12)$$

Để thuận tiện, đạo hàm theo thời gian của năng lượng cơ học gây xói được gọi là năng lượng xói ( $P_{\text{erosion}}$ ).

Năng lượng tổn thất do xói ( $E_{\text{erosion}}$ ) được xác định bằng cách lấy tích phân theo thời gian của năng lượng xói tức thời trong suốt quá trình thí

nghiệm. Vì vậy đối với mỗi thí nghiệm, năng lượng xói được tính toán theo nguyên tắc hình thang và chỉ số cường độ xói được xác định từ năng lượng xói và khối lượng vật liệu bị xói tích lũy ở trạng thái khô.

$$I_\alpha = -\log \left( \frac{m_{\text{dry}}}{E_{\text{erosion}}} \right) \quad (13)$$

Marot và những cộng sự (2011) đề nghị thang phân loại mức độ xói của đất gồm 6 cấp: Hết sức nhanh (đất có cường độ chịu xói rất kém) nếu  $I_\alpha < 1$ , rất nhanh nếu  $1 \leq I_\alpha < 2$ ; nhanh vừa nếu  $2 \leq I_\alpha < 3$ ; chậm vừa nếu  $3 \leq I_\alpha < 4$ ; rất chậm nếu  $4 \leq I_\alpha < 5$  và hết sức chậm (đất có cường độ chống xói cao)  $I_\alpha \geq 5$ . Bằng phương pháp phân tích năng lượng, Regazzoni và Marot (2013) cho thấy có thể đạt được sự phân loại khả năng xói tương tự nhau cho 7 loại đất khi thực hiện các thí nghiệm trên 2 thiết bị khác nhau Jet Erosion Test (JET) và Hole Erosion Test (HET).

#### 1.4 Xác định chỉ số cường độ xói $I_\alpha$ từ những đặc tính của đất.

Regazzoni và Marot (2012) đã xác định được mức độ xói của 12 mẫu đất tự nhiên, được chế bị bằng phương pháp đầm nén tiêu chuẩn Proctor ở độ ẩm nhỏ hơn 1% độ ẩm tối nhất. Những mẫu đất này đại diện cho khả năng chịu xói trong một phạm vi rộng. Một tổn thất năng lượng được tìm thấy và một sự phân tích thống kê được thực hiện. Bằng phân tích thống kê trên 2 loại đất phân biệt (có tính chất phân tán và không phân tán), đã xây dựng được biểu thức miêu tả chỉ số cường độ xói như là một hàm của 3 thông số: mức độ đầm chặt, độ bão hòa và sự khác nhau giữa hàm lượng nước trong thành phần hạt sét và độ ẩm giới hạn chảy.

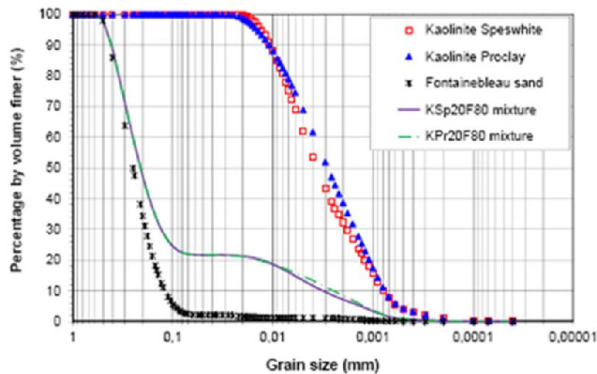
Những kết quả này cũng cho thấy rằng hàm lượng nước thay đổi 4% có thể dẫn đến một sự thay đổi về đặc trưng chống xói của đất từ trạng thái ổn định xói cao đến dễ bị xói. Vì vậy, ngay cả các mẫu đất được đầm chặt theo phương pháp Proctor tiêu chuẩn, khả năng chống xói dường như còn phụ thuộc vào thông số chính khác đã được nghiên cứu.

Bài báo giới thiệu kết quả từ thí nghiệm phun nước tạo áp lực JET được phân tích bởi 2 phương pháp khác nhau và mối tương quan giữa độ nhạy xói bề mặt với các tính chất của đất.

## 2. LOẠI ĐẤT VÀ CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

### 2.1 Các đặc tính của đất thí nghiệm.

Một loạt thí nghiệm được thực hiện trên hỗn hợp cát pha sét. Hình 2 giới thiệu đường cong phân bố cỡ hạt của cát, sét và hỗn hợp sau khi trộn sử dụng trong các thí nghiệm nhờ thiết bị phân tích Laser.



Hình 2. Đường cong thành phần hạt của sét, cát và hỗn hợp cát pha sét

Thí nghiệm được thực hiện trên 2 loại đất pha trộn gồm 20% đất sét kaolinite và 80% đất cát. Cát sử dụng là loại cát Fontainebleau (thành phần hạt nằm trong khoảng 0.4mm đến 600 $\mu$ m, đường kính trung bình  $D_{50} = 250 \mu\text{m}$ , hệ số đồng nhất  $C_u = 2.38$  và trọng lượng riêng 26.5KN/m<sup>3</sup>). Đất sét kaolinite được sử dụng trong các thí nghiệm gồm 2 loại: Speswhite (thành phần hạt nằm trong khoảng 0.04mm đến 25 $\mu$ m, đường kính trung bình  $D_{50} = 3.65 \mu\text{m}$ , hệ số đồng nhất 6.04 và trọng lượng riêng 25.5KN/m<sup>3</sup>) và Proclay có đường cong thành phần hạt khác nhau rất nhỏ (thành phần hạt nằm trong khoảng 0.04mm đến 32 $\mu$ m, đường kính trung bình  $D_{50} = 2.84 \mu\text{m}$ , hệ số đồng nhất 5.03 và trọng lượng riêng 25.7KN/m<sup>3</sup>).

Bảng 1 tổng hợp thành phần hóa học của vật liệu (Phân tích hóa học dựa vào quang phổ của tia X, được cho bởi nhà cung cấp).

Bảng 1. Thành phần hóa học của các vật liệu thí nghiệm

Khoáng	Sét Speswhite	Sét Proclay	Cát Fontainebleau
SiO <sub>2</sub> (%)	48.2	56.4	>99.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	36.9	28.7	<0.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.68	1.4	<0.03
TiO <sub>2</sub> (%)	0.02	1.2	<0.03
CaO (%)	0.06	0.3	<0.03
MgO (%)	0.24	0.3	
K <sub>2</sub> O (%)	1.59	0.8	<0.03
Na <sub>2</sub> O (%)	0.12	0.1	

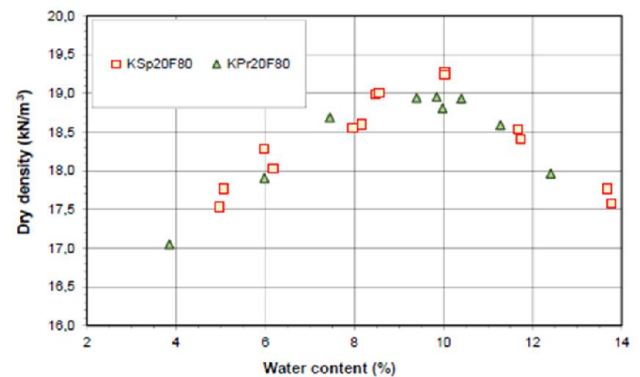
Quá trình chế bị mẫu được chia thành 2 giai đoạn: Chuẩn bị mẫu và đầm nén. Đầu tiên cát được trộn với nước ở một độ ẩm định trước. Sau đó, trong khi tiếp tục trộn, đất sét dưới dạng bột được

thêm vào từ từ cho đến khi đủ hàm lượng yêu cầu. Quá trình trộn được thực hiện trong 10 phút. Đường cong thành phần hạt của hỗn hợp cát và sét sau khi trộn (ký hiệu KSp20F80 và KPr20F80) được thể hiện trên hình 2.

Sau khi đảm bảo tính đồng nhất về thành phần hạt, mẫu được chế bị bằng phương pháp đầm nén động Proctor tiêu chuẩn (mẫu được chia thành 3 lớp, mỗi lớp đầm 25 chày).

Đối với một số mẫu thí nghiệm ở điều kiện bão hòa nước, đầu tiên mẫu được bão hòa bằng khí carbon dioxide, sau đó tiến hành bão hòa bằng nước đã loại bỏ khí trong thời gian xấp xỉ 24 giờ.

Hình 3 thể hiện kết quả đầm nén tiêu chuẩn của hỗn hợp KSp20F80 và KPr20F80. Dung trọng khô lớn nhất lần lượt là 19,31KN/m<sup>3</sup> và 18,96KN/m<sup>3</sup>. Độ ẩm tốt nhất là 10% cho cả hai loại hỗn hợp.



Hình 3. Đường cong đầm nén tiêu chuẩn của hỗn hợp sét-cát dùng thí nghiệm

## 2.2 Chương trình thí nghiệm

Bảng 2 thể hiện các loại đất sét được sử dụng trong các thí nghiệm (sét Speswhite, ký hiệu Sp hoặc sét Proclay, ký hiệu Pr), giá trị độ ẩm đầm nén  $w$ , dung trọng khô  $\gamma_d$ , độ bão hòa  $S_r$  và áp suất thủy lực tác dụng  $P_a$ . Mười bốn (14) thí nghiệm xói được thực hiện trên hỗn hợp KSp20F80 và 9 thí nghiệm được thực hiện trên mẫu KPr20F80.

Bảng 2. Các đặc trưng chính của các thí nghiệm xói Jet

Thí nghiệm	Sét	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$S_r$ (%)	$P_a$ (kPa)
1	Sp	4.97	17.53	27.49	8.4
2	Sp	5.08	17.77	91.41	16.9
3	Sp	5.97	18.29	37.86	8.4
4	Sp	6.18	18.03	95.70	8.4
5	Sp	7.96	18.56	53.15	8.4
6	Sp	8.17	18.60	98.56	8.5
7	Sp	8.49	18.98	61.52	8.4
8	Sp	8.56	19.00	91.22	8.4
9	Sp	10.03	19.27	76.93	7.1
10	Sp	10.03	19.24	80.97	8.5
11	Sp	11.74	18.41	76.25	8.4

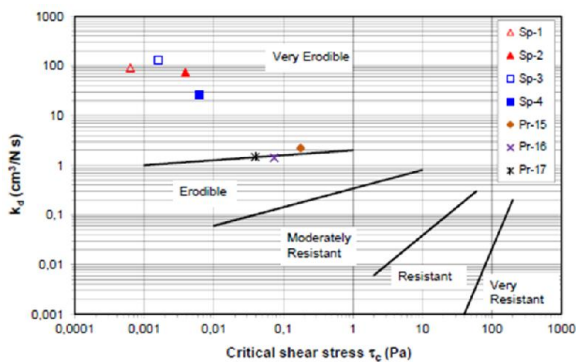
12	Sp	11.66	18.53	77.43	8.4
13	Sp	13.77	17.57	76.69	8.4
14	Sp	13.69	17.77	78.95	8.4
15	Pr	3.85	17.05	97.99	8.5
16	Pr	5.98	17.90	35.23	8.5
17	Pr	7.45	18.69	50.78	8.4
18	Pr	9.40	18.94	67.35	8.4
19	Pr	9.85	18.95	70.67	8.4
20	Pr	10.40	18.93	74.33	8.4
21	Pr	9.98	18.81	94.19	8.5
22	Pr	11.28	18.59	75.46	8.5
23	Pr	12.41	17.96	73.92	8.4

### 3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

#### 3.1 Kết quả phân tích thí nghiệm JET theo phương pháp của Hanson và Simon.

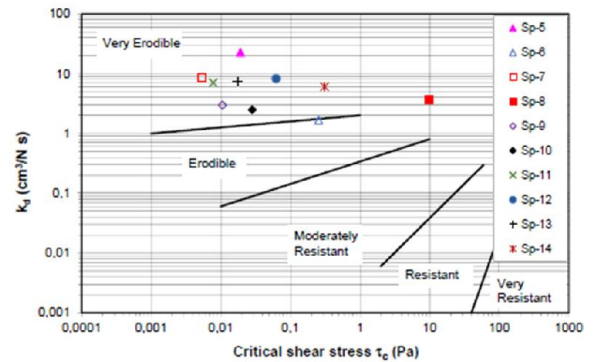
Kết quả của thí nghiệm đầu tiên được phân tích theo phương pháp của Hanson và Simon và được thể hiện trên biểu đồ phân loại khả năng xói của đất.

Hình 4 chỉ ra kết quả đạt được đối với đồng thời cả hai loại hỗn hợp cát-sét được đầm nén ở độ ẩm ở nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất. Chỉ có một mẫu nằm trong khung phân loại có khả năng xảy ra xói (Pr-16) hay nhạy xói (erodible), tất cả các mẫu còn lại đều thuộc loại rất nhạy xói (xói nhiều, very erodible).



Hình 4. Quan hệ giữa hệ số đặc trưng xói và ứng suất cắt thủy lực giới hạn (mẫu đầm nén ở độ ẩm nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất, cho cả 2 hỗn hợp sét-cát)

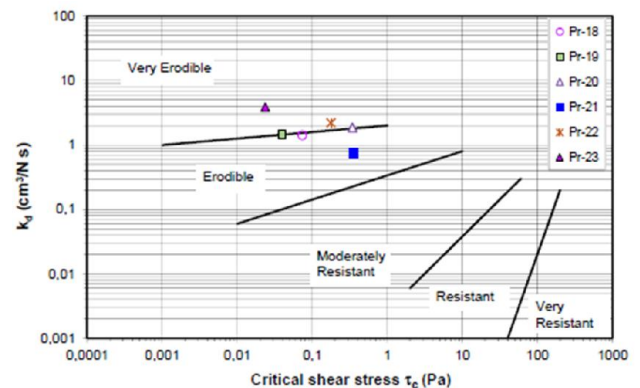
Hình 5 chỉ ra kết quả phân tích của mẫu KSp20F80 được đầm nén ở độ ẩm tốt nhất hoặc ở các độ ẩm lớn hơn độ ẩm tốt nhất (nhánh ướt của đường cong đầm nén tiêu chuẩn Protor).



Hình 5. Quan hệ giữa hệ số đặc trưng xói và ứng suất cắt thủy lực giới hạn (mẫu đầm nén ở độ ẩm tốt nhất và lớn hơn độ ẩm tốt nhất, hỗn hợp KSp20F80)

Trong số những mẫu này chỉ có mẫu Sp-6 là thuộc loại nhạy xói (erodible), còn lại được đánh giá là rất nhạy xói (xói nhiều, very erodible).

Đối với những mẫu được chế bị từ hỗn hợp sét-cát KPr20F80 được đầm nén ở độ ẩm tốt nhất hoặc lớn hơn độ ẩm tốt nhất (nhánh ướt của đường cong đầm nén Protor, xem hình 6), có 4 mẫu thuộc loại nhạy xói (erodible, Pr-18; Pr-19; Pr-20; Pr-21) và 2 mẫu thuộc nhóm có độ nhạy xói rất cao (very erodible, Pr-22 và Pr-23).

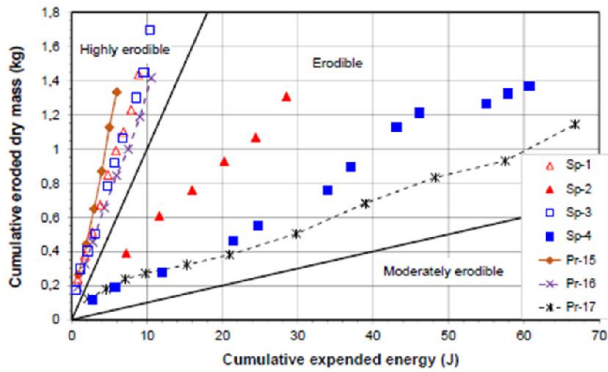


Hình 6. Quan hệ giữa hệ số đặc trưng xói và ứng suất cắt thủy lực giới hạn (mẫu đầm nén ở độ ẩm tốt nhất và lớn hơn độ ẩm tốt nhất, hỗn hợp KPr20F80)

#### 3.2 Kết quả phân tích thí nghiệm JET bằng phương pháp năng lượng.

Để xét đến lịch sử tác dụng của tải trọng thủy lực và ứng xử của mẫu đất thí nghiệm, một biểu đồ biểu diễn khối lượng xói tích lũy theo năng lượng tiêu hao tích lũy được thiết lập. Biểu đồ có thể phân thành nhiều khu vực tùy theo tỉ số  $m_{eroded\ dry\ mas}/E_{erosion}$ , liên hệ với khả năng xói, được định nghĩa bằng chỉ số cường độ xói (Marot và các cộng sự 2011).

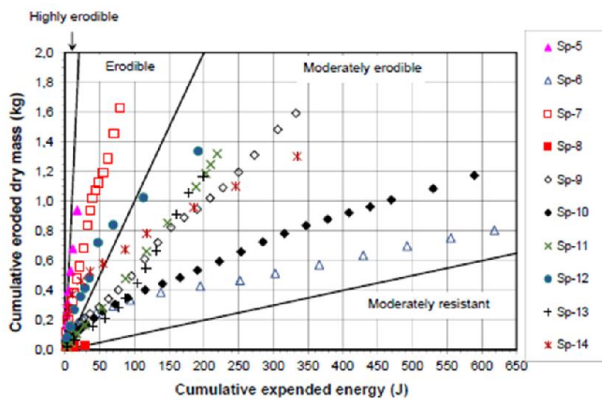
Hình 7 chỉ ra kết quả phân tích năng lượng của các thí nghiệm được thực hiện trên 2 hỗn hợp sét-cát ở độ ẩm đầm nén nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất.



Hình 7. Quan hệ giữa khối lượng xói ở trạng thái khô và năng lượng tiêu hao tích lũy (mẫu đầm nén ở độ ẩm nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất, cho cả 2 hỗn hợp sét-cát)

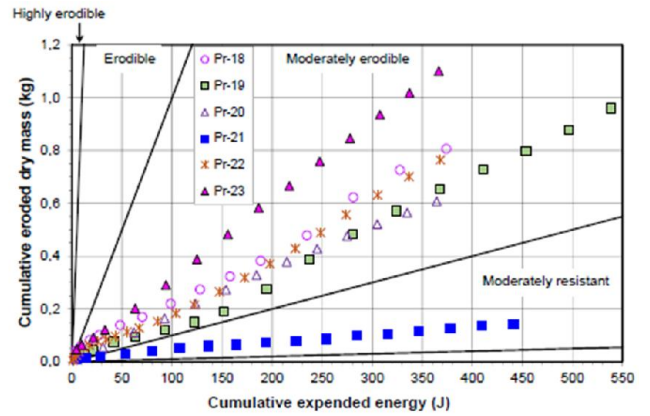
Theo phương pháp phân tích này, 4 mẫu được mô tả thuộc loại rất nhạy xói (xói nhiều) (Sp-1; Sp-3; Pr-15; Pr-16) và 3 mẫu thuộc được xếp vào loại dễ xói (Sp-2; Sp-4; Pr-17).

Hình 8 cho thấy trong số các mẫu KSp20F80 được đầm nén ở độ ẩm tốt nhất và độ ẩm lớn hơn độ ẩm tốt nhất, có 2 mẫu thuộc loại nhạy xói (erodible, Sp-5; Sp-7) và những mẫu khác được xếp vào loại nhạy vừa (Moderately erodible, Sp-6, Sp-8; Sp-9; Sp-10; Sp-11; Sp-12; Sp-13 và Sp-14).



Hình 8. Quan hệ giữa khối lượng xói ở trạng thái khô và năng lượng tiêu hao tích lũy (mẫu KSp20F80, đầm nén ở độ ẩm tốt nhất và lớn hơn độ ẩm tốt nhất)

Đối với các mẫu KPr20F80 được đầm nén ở độ ẩm tốt nhất và lớn hơn độ ẩm tốt nhất, khung phân loại cho thấy mẫu Pr-21 có cường độ chống xói vừa phải hay ít nhạy (Moderately resistant, Hình 9), những mẫu còn lại được xếp vào loại có khả năng xói ở mức vừa phải (Moderately erodible, Pr-18; Pr-19; Pr-20, Pr-22 và Pr-23).



Hình 9. Quan hệ giữa khối lượng xói ở trạng thái khô và năng lượng tiêu hao tích lũy (mẫu KPr20F80, đầm nén ở độ ẩm tốt nhất và lớn hơn độ ẩm tốt nhất)

## 4. BÌNH LUẬN KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

### 4.1 Sự so sánh giữa những sự phân loại xói

Kết quả so sánh khả năng xói trên các mẫu thí nghiệm theo hai phương pháp được cho ở bảng 3.

Với cả 2 phương pháp phân tích đều cho kết quả xói tương đối như nhau trên tất cả các mẫu thí nghiệm, ngoại trừ mẫu Pr-21 có độ nhạy xói nhỏ nhất.

Tuy nhiên phương pháp đề nghị bởi Hanson và Simon cho kết quả 17 mẫu thuộc loại “rất nhạy” xói và 6 mẫu thuộc loại “nhạy” xói (Sp-6, Pr-16, Pr-18, Pr-19, Pr-20 và Pr-21). Trong khi phương pháp dựa trên năng lượng tiêu tán cho kết quả: 4 mẫu “rất nhạy” xói (Sp-1, Sp-3, Sp-15 và Sp-16) và 5 mẫu “nhạy” xói (Sp-2, Sp-4, Sp-5, Sp-7 và Pr-17).

14 mẫu được phân loại “rất nhạy” xói theo phương pháp của Hanson và Simon được đánh giá thuộc loại “nhạy” và “nhạy vừa” theo phương pháp năng lượng (Sp-2, Sp-4, Sp-5, Sp-7, Sp-8, Sp-9, Sp-10, Sp-11, Sp-12, Sp-13, Sp-14, Pr-17, Pr-22 và Pr-23).

Bảng 3. So sánh phân loại khả năng xói

Thí nghiệm	$k_d$ ( $\text{cm}^3/\text{N.s}$ )	$\tau_c$ (Pa)	$I_\alpha$	<sup>a</sup> Phân loại	<sup>b</sup> Phân loại
1	91.55	0.0006	0.84	Rất nhạy	Rất nhạy
2	73.91	0.0039	1.38	Rất nhạy	Nhạy
3	132.40	0.0016	0.83	Rất nhạy	Rất nhạy
4	26.39	0.0061	1.64	Rất nhạy	Nhạy
5	22.73	0.0192	1.33	Rất nhạy	Nhạy
6	1.68	0.2557	2.89	Nhạy	Nhạy vừa
7	8.64	0.0054	1.70	Rất nhạy	Nhạy
8	3.71	9.8820	2.96	Rất nhạy	Nhạy vừa
9	2.97	0.0106	2.34	Rất nhạy	Nhạy vừa
10	2.49	0.0284	2.70	Rất nhạy	Nhạy vừa
11	7.03	0.0078	2.22	Rất nhạy	Nhạy vừa
12	8.25	0.0625	2.16	Rất nhạy	Nhạy vừa

13	7.37	0.0174	2.23	Rất nhạy	Nhạy vừa
14	6.04	0.3105	2.41	Rất nhạy	Nhạy vừa
15	269.80	0.0290	0.65	Rất nhạy	Rất nhạy
16	83.35	0.0010	0.87	Nhạy	Rất nhạy
17	7.17	0.0392	1.77	Rất nhạy	Nhạy
18	1.41	0.0736	2.67	Nhạy	Nhạy vừa
19	1.47	0.0394	2.75	Nhạy	Nhạy vừa
20	1.86	0.3411	2.78	Nhạy	Nhạy vừa
21	0.74	0.3514	3.49	Nhạy	Ít nhạy
22	2.21	0.1769	2.68	Rất nhạy	Nhạy vừa
23	3.87	0.0235	2.52	Rất nhạy	Nhạy vừa

<sup>a</sup>Phân loại khả năng xói của đất theo đề xuất của Hanson & Simon (2001).

<sup>b</sup> Phân loại khả năng xói của đất theo đề xuất của Marot và các đồng sự (2011).

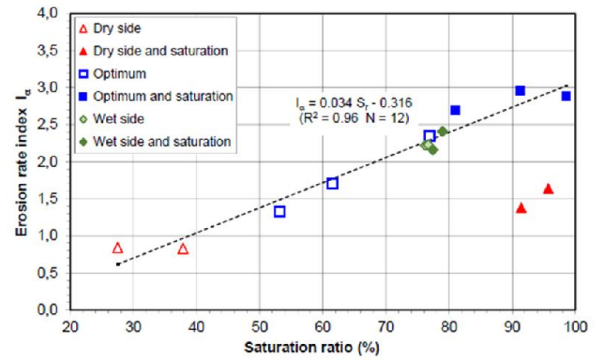
Như vậy, phương pháp của Hanson và Simon dự đoán khả năng xói thiên về an toàn hơn so với phương pháp dựa trên năng lượng tiêu hao. Phương pháp năng lượng dường như dễ dàng hơn (đánh giá chi tiết hơn) trong việc phân loại khả năng xói đối với các loại đất được kết luận rất nhạy xói bởi phương pháp của Hanson và Simon.

#### 4.2 Ảnh hưởng của độ chặt đầm nén và độ bão hòa

Bằng sự tách biệt đặc tính phân tán (dispersive) và không phân tán (non-dispersive), Regazzoni và Marot (2011) đề nghị một biểu thức biểu diễn chỉ số chống xói (chỉ số cường độ xói) là hàm phụ thuộc 3 thông số vật lý: độ đầm chặt, độ bão hòa và sự khác nhau giữa hàm lượng nước trong đất sét và độ ẩm giới hạn chảy. Vì các mẫu thí nghiệm được chế bị theo phương pháp đầm nén tiêu chuẩn Protor ở độ ẩm nhỏ tốt nhất nhỏ hơn 1% nên cần nghiên cứu ảnh hưởng của sự thay đổi độ ẩm đầm nén đến độ nhạy xói của đất.

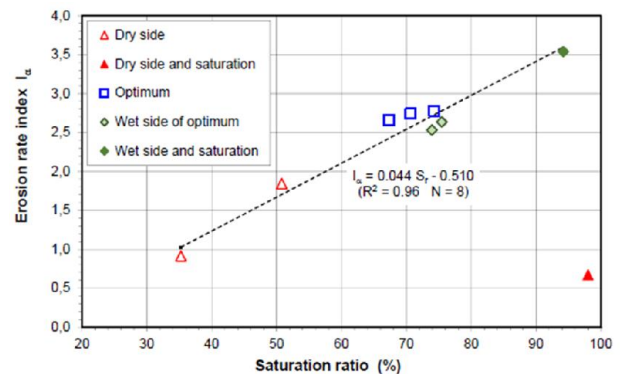
Với các trị số độ ẩm khác nhau của đất, bằng phương pháp đầm nén động cho phép đạt được các mẫu đại diện cho một phạm vi rộng của độ bão hòa và độ chặt đầm nén. Thêm vào đó, sau giai đoạn đầm chặt, có 9 mẫu được bão hòa (Sp-2, Sp-4, Sp-6, Sp-8, Sp-8, Sp-10, Sp-12, Sp-14, Pr-15 và Pr-21).

Giá trị chỉ số tốc độ xói theo độ bão hòa được thể hiện trên hình 10 cho các mẫu trộn KSp20F80 và hình 11 cho các mẫu trộn KPr20F80. Đối với cả hai hỗn hợp cát-sét, các mẫu được nhóm thành 3 loại dựa theo độ ẩm đầm nén đối với độ ẩm tốt nhất: độ ẩm đầm nén nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất (nhánh khô- dry side); độ ẩm tốt nhất (optimum) và độ ẩm đầm nén lớn hơn độ ẩm tốt nhất (nhánh ướt-wet slide).



Hình 10. Quan hệ giữa chỉ số tốc độ xói và độ bão hòa (mẫu thí nghiệm KSp20F80)

Đối với cả hai hỗn hợp sét-cát và xem xét trên tất cả các mẫu thí nghiệm, ngoại trừ những mẫu bão hòa được đầm nén ở độ ẩm nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất (Sp-2, Sp-4 và Pr-15) cho thấy có một sự tương quan tuyến tính giữa chỉ số cường độ xói và độ bão hòa. Hệ số tương quan đạt được ( $R^2$ ) là 0.96, với số lượng mẫu  $N=12$  đối với hỗn hợp KSp20F80 và  $N=8$  cho hỗn hợp KPr20F80. Kết quả này cho thấy độ bão hòa có ảnh hưởng lớn đến khả năng xói của đất.



Hình 11. Quan hệ giữa chỉ số tốc độ xói và độ bão hòa (mẫu thí nghiệm KPr20F80)

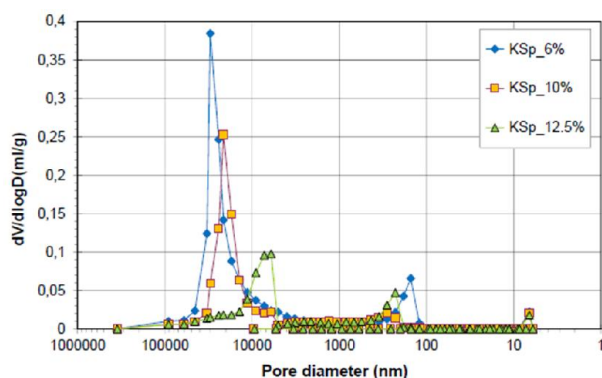
#### 4.3 Ảnh hưởng của vi cấu trúc đất

Xem xét mẫu thí nghiệm Sp-2, được bão hòa sau khi đầm nén ở độ ẩm nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất (nhánh khô) và mẫu Sp-14 được bão hòa sau khi đầm nén ở độ ẩm lớn hơn độ ẩm tốt nhất (nhánh ướt). Cả hai mẫu có cùng dung trọng khô ( $17,7\text{KN/m}^3$ ) nhưng Sp-2 có độ bão hòa  $S_r = 91,41\%$  và giá trị của chỉ số xói  $I_\alpha = 1.38$ . Trong khi đó Sp-14 có độ bão hòa  $S_r = 78,95\%$  và  $I_\alpha = 2.41$ . Thêm vào đó, khi so sánh các mẫu được đầm nén ở nhánh khô ( $w < w_{opt}$ ) với những mẫu được đầm nén ở nhánh ướt ( $w > w_{opt}$ ) đều cho giá trị của chỉ số tốc độ xói nhỏ hơn một cách tương ứng. Các kết quả này cho thấy rằng ngay cả với các mẫu thí nghiệm sau khi được bão hòa, các mẫu được

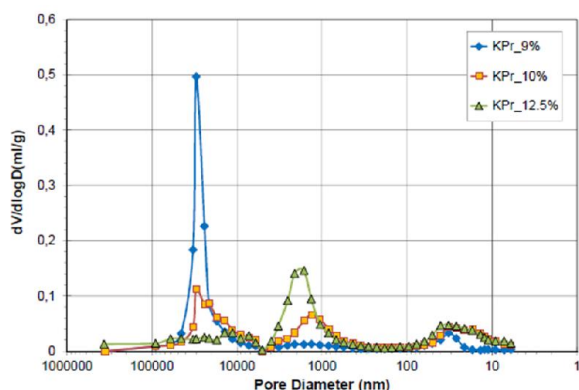
đầm nén ở độ ẩm nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất vẫn có độ nhay xói lớn hơn các mẫu được đầm nén ở độ ẩm lớn hơn độ ẩm tốt nhất.

Để nghiên cứu kết cấu vi mô của các mẫu đất thí nghiệm, 3 mẫu cát sét được chuẩn bị bởi phương pháp đầm nén động (Protor tiêu chuẩn) ở 3 giá trị độ ẩm khác nhau tương ứng với độ ẩm tốt nhất, nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất và lớn hơn độ ẩm tốt nhất. Mẫu thí nghiệm được lấy ra từ mỗi mẫu đầm nén và được sấy khô trong 24 giờ ở nhiệt độ 60°C. Sử dụng thiết bị đo độ độ rỗng Porosimeter (Autopore III 9420) tiến hành bơm thủy ngân với áp lực đạt đến trị số lớn hơn 200MPa vào các lỗ rỗng trong kết cấu đất để xác định độ rỗng của mỗi mẫu. Theo luật của Whasburn, với áp lực bơm này cho phép thủy ngân đi vào các lỗ rỗng có đường kính xấp xỉ 6nm.

Sự phân bố kích cỡ lỗ rỗng được minh họa ở hình 12 cho mẫu trộn KSp20F80 và hình 13 cho mẫu trộn KPr20F80. Đối với cả hai loại hỗn hợp cát-sét, phạm vi phân bố kích cỡ lỗ rỗng nằm giữa 6nm đến 10000nm. Đường kính thấm có thể được định nghĩa là đường kính lỗ rỗng tương ứng với giá trị lớn nhất của thủy ngân được bơm vào.



Hình 12. Phân bố kích cỡ lỗ rỗng (mẫu KSp20F80)



Hình 13. Phân bố kích cỡ lỗ rỗng (mẫu KPr20F80)

Bảng 4 cho thấy giá trị của đường kính thấm của các mẫu giảm dần từ mẫu có trị số độ ẩm nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất đến mẫu có độ ẩm tốt nhất và lớn hơn độ ẩm tốt nhất.

Bảng 4. Các đặc trưng chính của thí nghiệm MIP

Loại sét	Độ ẩm đầm nén (%)	Đường kính thấm (nm)
Sp	6	30189
Sp	10	21314
Sp	12.5	6637
Pr	9	30192
Pr	10	30188
Pr	12.5	1863

Những kết quả ở trên cho thấy rằng độ nhay xói bề mặt giảm với đường kính thấm và đường kính này được sử dụng để đặc trưng cho ảnh hưởng của kết cấu vi mô của đất. Để khẳng định ảnh hưởng của kết cấu vi mô của đất đến độ nhay xói bề mặt trên nhiều loại đất đòi hỏi cần thiết phải có những nghiên cứu tiếp theo.

## 5 Kết luận

Một thiết bị thí nghiệm JET đã được sử dụng để mô tả độ nhay xói bề mặt của hai loại hỗn hợp cát-sét. 23 mẫu được đầm nén theo tiêu chuẩn Protor với hàm lượng nước khác nhau và một vài mẫu được ngâm bão hòa sau giai đoạn đầm nén.

Kết quả từ thí nghiệm Jet đã được phân tích theo 2 phương pháp và so sánh cho thấy rằng phương pháp phân tích dựa vào năng lượng không quá thiên về an toàn và xuất hiện tính hiệu quả hơn để dự đoán một cách tương đối khả năng xói của các loại đất.

Đối với cả hai hỗn hợp cát-sét thí nghiệm, độ nhay xói được định nghĩa bằng chỉ số cường độ xói có một quan hệ tuyến tính với độ bão hòa. Thậm chí sau khi bão hòa, các mẫu được đầm nén ở độ ẩm nhỏ hơn độ ẩm tốt nhất vẫn có độ nhay xói lớn hơn các mẫu được đầm nén ở độ ẩm lớn hơn độ ẩm tốt nhất. Các kết quả này cho thấy ảnh hưởng của kết cấu vi mô của đất, đặc trưng bằng đường kính thấm của quá trình xâm nhập thủy ngân, đến độ nhay xói bề mặt.

## 6 Lời cảm ơn

Các tác giả cảm ơn Ngân hàng Thế giới (dự án TRIG, Đại học Đà Nẵng, Việt Nam), Điện lực Pháp, Tổ chức Nghiên cứu quốc gia Pháp (ANR-ERINOH), và Viện nghiên cứu và thử nghiệm trong Xây dựng (IREX) đã hỗ trợ kinh phí cho chương trình nghiên cứu này.

## 7 Tài liệu tham khảo



- ASTM. 2000. Standard test method for erodibility determination of soil in the field or in the laboratory by the jet index method. *Geotechnical engineering standards*. D5852.
- Beltaos, S. & Rajaratnam, N. 1974. Impinging circular turbulent jets. *Journal of the Hydraulics Division*, HY10: 1313-1328.
- Blaisdell, F.W. & Anderson, C.L. 1981. Ultimate dimension of local scour. *Journal of Hydraulics Division, ASCE* 107(HY3): 327-337.
- Dunn, I.S. 1959. Tractive resistance of cohesive channels. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE* 85(SM3): 1-24.
- Fell, R. & Fry, J.J. 2007. *Internal erosion of dams and their foundations*, Editors, Taylor & Francis Publisher.
- Hanson, G.J & Simon, A. 2001. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA. *Hydrological Processes* 15(1): 23-38.
- Hanson, G. J. & Cook, K. R. 2004. Apparatus, Tests procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in-situ. *Applied Engineering in Agriculture* 20(4): 455-462.
- Marot, D., Regazzoni, P.L., Wahl, T. 2011. Energy based method for providing soil surface erodibility rankings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 137(12): 1290 – 1294.
- Regazzoni, P.L. & Marot, D. 2011. Investigation of interface erosion rate by Jet Erosion Test and statistical analysis. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 15(8): 1167-1185.
- Regazzoni, P.L. & Marot, D. 2013. A comparative analysis of interface erosion tests. *Natural Hazards* 67(2): 937-950.