

PHÂN BỐ ỨNG SUẤT VÀ XU HƯỚNG DỊCH TRƯỢT CỦA ĐỨT GỖ KHI BỊ TÁC ĐỘNG BỞI BƠM ÉP NƯỚC LIÊN QUAN ĐẾN KHAI THÁC DẦU KHÍ VÙNG VEN BIỂN TUY HÒA TỚI VŨNG TÀU

ĐỖ VĂN LĨNH¹, NGUYỄN LỢI LỘC¹, ĐÌNH QUỐC VĂN², VŨ TRỌNG TÂN¹,
NGUYỄN XUÂN HUY³, ĐÌNH QUANG SANG¹, NGUYỄN THỊ THU THÚY¹, NGUYỄN THANH SANG¹, VŨ
THỊ NGÂN THẢO¹

¹Liên đoàn Bản đồ Địa chất miền Nam, 200 Lý Chính Thắng, Quận 3, Tp. Hồ Chí Minh;

²Viện Vật Lý Địa cầu, 18 Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội.

³Khoa Địa chất và Dầu khí- Đại Học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh, 210 Lý Thường Kiệt, Quận 10, Tp. Hồ Chí Minh.

Tác giả liên hệ: dovalinh@gmail.com; lynogec@gmail.com

Tóm tắt: Phân tích xu hướng dịch trượt cung cấp một phương tiện để đánh giá rủi ro tương đối của động đất và khả năng hoạt động của các đứt gãy, kiểm tra tính tương thích của các cấu trúc địa chất trong một trường ứng suất nhất định, một cách tiếp cận để thăm dò các đứt gãy có nguy cơ cao và dễ xảy ra động đất, và một giải pháp thay thế định hướng vector ứng suất để luận giải các bề mặt đứt gãy thật từ các cơ cấu chấn tiêu động đất cũng như định hướng cho công tác tìm kiếm và khai thác các khoáng sản dầu khí và nước. Kết quả chuẩn hóa hệ số ma sát 0,55 (~ góc 28,56⁰) bằng phương pháp góc cộng ứng và hệ thống mô hình hóa bằng các phần mềm chuyên dụng, các đứt gãy phương BDB – NTN (phương 10 – 30⁰) vùng ven biển Tuy Hòa – Vũng Tàu được đánh giá có khả năng sinh trượt cao (Ts dao động 0,7-1) đối với trường ứng suất kiến tạo hiện đại. Với áp lực bơm ép vượt ngưỡng tới hạn gradient bơm ép từ 0,001 đến 1,3 bar/10m (vượt ngưỡng áp suất thủy tĩnh tại độ sâu xem xét) đều có thể kích thích gây trượt đứt gãy và phát sinh động đất với cường độ cực đại là 4.2 độ Richter. Kết quả nghiên cứu phù hợp với kết quả quan trắc động đất từ 2002 đến 5/2020 (315 trận được ghi nhận) với magnitude từ 1,5 đến 4,2 độ Richter.

Từ khóa: đứt gãy, xu hướng dịch trượt, tensor ứng suất, hệ số ma sát, cơ chế chấn tiêu động đất, hoạt động nhân sinh, bơm ép, áp suất tới hạn, Tuy Hòa, Vũng Tàu

1. Mở đầu

Hiện nay, phân tích xu hướng trượt của đứt gãy là vấn đề nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới từ những năm 70-80 của thế kỷ 20 (Morris, 1996, 2009; Hengmao Tong, 2011; Inga Moeck, 2009, 2011; E. D Hawkes, 2005; Loes Buijze và nnk, 2017; Yukutake et al, 2015; Kuang và nnk, 2017 và Zoback và nnk, 2018; Lee, 1997, ...). Xu hướng trượt giúp đánh giá nhanh các trạng thái ứng suất và khả năng tái hoạt động của đứt gãy ở điều kiện tự nhiên, kiểm tra tính tương thích của các cấu trúc địa chất, thăm dò các đứt gãy mới cũng như luận giải bề mặt đứt gãy thật từ hai mặt nodal trong cơ cấu chấn tiêu của một động đất (Morris, 1996). Nghiên cứu về khả năng tái hoạt động của đứt gãy liên quan đến sự thay đổi ứng suất có ý nghĩa quan trọng trong việc xây dựng các kho ngầm, hồ chứa, khai thác địa nhiệt, đặc biệt là khai thác dầu tăng cường tính thấm; gia tăng áp suất lỗ rỗng để gọi dòng và tăng cường hiệu suất thu hồi. Việc mất cân bằng ứng suất với giá trị rất nhỏ, cỡ 1% với cường độ ứng suất xung quanh (Zoback, 1997; Segall, 1994) hoặc với tốc độ cỡ 0,1 nano biến dạng (Simpson et al, 1994, Phan Trọng Trịnh, 2011) đều có khả năng làm cho đứt gãy tái hoạt động và gây ra động đất kích thích.

Một đứt gãy có trước có thể tái hoạt động khi ứng suất cắt tác động trên mặt phẳng đứt gãy bằng hoặc vượt quá lực cản ma sát và lực cản ma sát tỷ lệ thuận với ứng suất pháp tuyến hiệu dụng (σ_{neff}) tác dụng lên bề mặt đó. Hiện nay, trên thế giới có bốn hướng tiếp cận trong đánh giá về khả năng tái dịch trượt của một bề mặt đứt gãy có trước: i) Xu hướng tái dịch trượt được tính toán dựa trên tỷ số giữa cường độ ứng suất cắt trên cường độ ứng suất pháp hiệu dụng (Morris và nnk, 1996, 2009; Inga Moeck và nnk, 2009, 2011, Hengmao Tong, 2011 ...). ii) Xu hướng tái dịch trượt được tính toán bằng tỷ số giữa cường độ ứng suất cắt tác động lên mặt đứt gãy với ngưỡng cường độ ứng suất cắt (C. D. Hawkes và, 2005; Yukutake et al, 2015; Loes Buijze và nnk, 2017...). iii) Xu hướng tái dịch trượt được tính toán bằng hiệu số giữa cường độ ứng suất cắt và tích giữa hệ số ma sát và cường độ ứng suất hiệu dụng (Kuang và nnk, 2017 và Zoback và nnk, 2018; ...). iv) Xu hướng tái dịch trượt của đứt gãy được tính toán dựa trên góc hợp bởi phương trục

ứng suất ép nén cực đại (σ_1) và pháp tuyến bề mặt đứt gãy (góc δ) (Lee, 1997; A. Nouri et al, 2014, Hamideh et al, 2016; Duan et al, 2017). Trong việc đánh giá dự báo xu hướng dịch trượt, hệ số ma sát tĩnh là một tham số rất quan trọng, tuy nhiên hầu hết các mô hình hiện nay đều giả thiết góc ma sát này theo luật Bayerlee, 1978, chưa chắc đã phù hợp với đối tượng nghiên cứu. Trong khi đó, hệ số ma sát thay đổi tùy theo đặc điểm địa chất, kiến tạo, thạch học, v.v... (Barton & Choubey, 1976; Yukutake, 2015; Sato, 2016; ...).

Báo cáo sử dụng tổ hợp các mô hình định lượng hiện nay trên thế giới (Morris, 2016; Moeck, 2011; Allmendinger, 2012, Yukutake, 2015, Sato, 2016) để xử lý số liệu động học đứt gãy và hệ thống đứt gãy theo tài liệu hiện có nhằm: 1- Xây dựng quy trình phân tích xu hướng tái dịch trượt để dự báo khả năng tái dịch trượt đứt gãy trong điều kiện tự nhiên và bị tác động bởi hoạt động nhân sinh; 2- Phân tích hệ số ma sát bất thường làm cơ sở đánh giá tái trượt đứt gãy liên quan đến tự nhiên hay hoạt động của con người; 3- Sự phân bố, thay đổi ứng suất cắt, ngưỡng áp suất bơm ép gây trượt đứt gãy có trước khi gia tăng áp suất lỗ rỗng liên quan hoạt động khai thác dầu khí.

2. Cơ sở dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1 Cơ sở dữ liệu

Dữ liệu được sử dụng trong bài báo bao gồm: 05 cơ cấu chấn tiêu động đất trong khu vực nghiên cứu từ trạm quan trắc USGS/ ICS thế giới; 09 cơ cấu chấn tiêu động đất từ số liệu phân tích mới của đề tài KC.09.38/16-20; 1000 mặt trượt vết xước, đứt gãy, mặt bất chỉnh hợp/196 vết lộ/1000km thực địa khu vực từ Tuy Hòa đến Vũng Tàu và khu vực đảo Phú Quý từ các nghiên cứu có trước và 23 điểm khảo sát bổ sung vào tháng 10/2019 thuộc đề tài KC.09.38/16-20; Số liệu đo đạc ứng suất tại chỗ từ 13 giếng khoan (8 thí nghiệm XLOT, 23 hình chụp FMI, Cast-V, nhật ký bơm ép từ Vietsovpetro,...) khu vực Bạch Hồ tại bồn trũng Cửu Long; 315 trận động đất/21 trạm quan trắc động đất quốc gia khu vực ven biển từ Tuy Hòa đến Vũng Tàu từ năm 2002 đến năm 05/2020; Chuỗi động đất quan sát với khoảng 33 trận động đất với M từ 1 đến 2.4 độ richter trong 02 năm 2006 – 2008 của Liên Đoàn Địa chất Miền Nam cho khu vực Bồn trũng Cửu Long và lân cận. 02 Phá hủy thủy lực và 34 kết quả phân tích mẫu nền 3 trục của kho ngầm Cái Mép độ sâu 90m đến 173m. 04 Trạm quan sát GPS (A13, A14, A16, A15) từ 2013-2020 (Lĩnh và nnk, 2015). Đo 300km địa chấn nông phân dải cao (6/2020) bổ sung mới, kết hợp phân tích 14000km địa chấn dầu khí của đề tài KC.09.38/16-20; gần 3 triệu khối nước bơm ép khai thác mỏ Bạch Hồ từ 1993 đến 2017 (Phùng Đình Thực, 2018).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1 Phương pháp đánh giá xu hướng dịch trượt

Để đánh giá xu hướng dịch trượt (T_s) bài báo sử dụng tỷ số giữa ứng suất cắt và sức bền đứt gãy theo cách tính của (Yukutake et al, 2015), sau đây:

$$T_s = \frac{|\tau|}{\mu|\sigma_n - P_h|}; \quad \sigma_s = \mu(\sigma_n - P_h) = \mu'\sigma_n; \quad (\tau - \text{ứng suất cắt}, \sigma_s - \text{sức bền đứt gãy}, \sigma_n - \text{ứng suất pháp})$$

$$\frac{|\tau|}{(\sigma_n - P_h)\mu} = T_s = \tau/\sigma_s; \quad (\sigma_n - \text{ứng suất pháp})$$

$$T_s = \frac{|\sigma_3|}{\mu|\sigma_n|} = \frac{|\sigma''_n - n[n(\sigma''_n)]|}{\mu[n[n(\sigma''_n)] + \left(\frac{\sigma_s - P}{d}\right).n|}; \quad (n - \text{hướng pháp tuyến mặt đứt gãy})$$

$$d = \frac{2\mu(\sigma_v - P_h)}{\sqrt{\mu^2 + 1 + \mu(2\cos^2\theta_1 + 2R\cos^2\theta_2 - 1)}}, \quad \sigma_v - \text{ứng suất đứng thạch tinh}, R - \text{bán kính vòng tròn Mohr}$$

σ'' là một tensor không thứ nguyên/vô hướng có thể được ước tính bằng phân tích nghịch đảo ma trận ứng suất (ví dụ, Gephart và Forsyth, 1984; Hardebeck và Michael, 2006; Horiuchi và cộng sự, 1995; Michael, 1987) sử dụng cơ chế chấn tiêu động đất. Lưu ý rằng các tham số d , μ , P và σ_3 vẫn chưa biết (d - ứng suất lệch, P_h - áp suất thủy tĩnh, P - áp suất chất lỏng trong lỗ rỗng), ngay cả sau khi thực hiện bài toán phân tích nghịch đảo ma trận ứng suất. Trong đó θ_1 và θ_2 lần lượt là các góc mà trục σ_1 và σ_2 nghiêng so với phương thẳng đứng, τ - ứng suất cắt, σ_n - ứng suất pháp tác động lên mặt đứt gãy, σ_s - sức bền đứt gãy. Giả thiết sau được đặt ra: (1) Dịch trượt sinh chấn trên mặt phẳng đứt gãy được định hướng tối ưu, so với trường ứng suất khu vực chiếm ưu thế, xảy ra dưới áp suất chất lỏng thủy tĩnh (P_h). (2) Sức bền của mặt phẳng đứt gãy bị chi phối bởi tiêu chuẩn phá hủy Coulomb với hệ số ma sát tốt nhất phù hợp đặc điểm địa chất khu vực, không nhất thiết nằm trong khoảng $0,6 \leq \mu \leq 0,85$ (Byerlee, 1978) như nhiều công trình, mô hình giả thiết. (3) Độ lớn của ứng suất thẳng đứng bằng áp suất thạch tinh và bằng ($\sigma_v \approx \rho gz$). Khi $T_s \geq 1$ là điều kiện cần để đứt gãy có thể tái dịch trượt.

2.2.2 Phương pháp ước lượng sự thay đổi ứng suất do hoạt động nhân sinh

Giả sử :1- Hoạt động nhân sinh gây gia tăng áp suất lỗ rỗng gây trượt phát sinh động đất; 2- Vùng ảnh hưởng của hoạt động tăng cao áp suất lỗ rỗng của một lỗ khoan trong bán kính khoảng 900m-1,2km (Zoback et al, 2016), nhưng cụm lỗ khoan, nhiều mỏ lân cận có thể bán kính từ 10km đến 25km, tương đương với phạm vi ảnh hưởng của hồ chứa Konya (Ấn Độ) (Gupta, 2002, 2005, 2007). Phương pháp ước lượng: 1-So sánh trạng thái ứng suất tại chỗ trước khi xảy ra động đất với sự thay đổi ứng suất tĩnh (ứng suất coulomb) lúc xảy ra động đất giải phóng ứng suất; 2 - Ứng suất tại chỗ đạt được trên cơ sở các đo đạc khi thăm dò, thử vỉa bể chứa, khu vực mỏ. 3 - Thay đổi ứng suất tĩnh đạt được bằng sự biến đổi ứng suất coulomb đối với các trận động đất bất thường hoặc trên các đứt gãy có xu hướng dịch trượt cao, đạt được từ phân tích xu thế trượt, áp lực bơm ép, lưu lượng bơm ép, phá hủy thủy lực và mạng đứt gãy, v.v... 4 - Ứng suất cắt trên một mặt đứt gãy bất kỳ được ước lượng bởi vòng tròn Mohr dựa trên góc cộng ứng (θ) tạo với trục ứng suất chính lớn nhất:

$$\tan(\theta) = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \text{ hay } \theta = \tan^{-1}(\theta) \text{ và } \tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta$$

Nhận dạng động đất bất thường thông qua hệ số ma sát: Các đứt gãy trượt phát sinh động đất có hệ số ma sát trượt bất thường so với động đất tự nhiên, hoặc phổ ma sát bình thường của vỏ dòn/sức bền vỏ (Zoback, 1997). Nguyên nhân thứ nhất, hoặc do tác động hoạt động nhân sinh như bơm ép thu hồi dầu khí, phá hủy thủy lực khai thác địa nhiệt, nhốt khí CO₂ trong lòng đất, bơm nước thải từ các nhà máy điện hạt nhân, ... gây gia tăng áp suất lỗ rỗng một vùng nhất định xung quanh địa điểm tác động. Nguyên nhân thứ hai do sự bất thường môi trường đất đá, vật chất nhét lấp đứt gãy như khoáng hóa sét, phong hóa, quá trình biến chất trao đổi. Việc xác định động đất liên quan đến nguyên nhân nào có thể đạt được nếu xét quy luật phân bố, chu kỳ động đất, không gian, thời gian phân bố, ... và dư chấn liên quan đến địa điểm hoạt động nhân sinh.

2.2.3 Phương pháp xác định hướng và cường độ trường ứng suất kiến tạo:

Hướng của 3 ứng suất chính có thể được xác định bởi nhiều phương pháp cũng như cách tiếp cận như: phân tích các mặt trượt vết xước và giải bài toán ngược phù hợp để xác định được trạng thái ứng suất tại một điểm; phân tích các cơ cấu chấn tiêu động đất; phân tích các sập lở thành giếng khoan (BO - breakout) hoặc khe nứt căng xuất hiện trong khi khoan (DIF – Drilling induced fracture), ... Cường độ ứng suất và áp suất lỗ rỗng có thể được tính toán thông qua kết quả của các thí nghiệm ứng suất tại chỗ, hoặc thông qua tỷ số ứng suất trong nghiên cứu cổ ứng suất. Bài báo tiếp cận tính toán thông số của 3 trục ứng suất chính đại diện cho trường ứng suất kiến tạo (Lộc và nnk, 2019).

2.2.4 Nhóm phương pháp xác định hệ số ma sát tĩnh

1-Phương pháp hình học – số

Giả sử đứt gãy trượt theo hướng ứng suất cắt (Wallace, 1951; Bott, 1959; Angelier, 1989; Sato, 2006, 2016), các đứt gãy trượt tuân theo luật tải trượt Mohr-Coulomb, khi không có lực dính.

$$\tau = \mu \sigma_n$$

Các cường độ ứng suất chính của một tensor ứng suất rút gọn, được chuẩn hóa biểu diễn trên vòng tròn Mohr quy ước (Normalised) dưới dạng $\sigma_1=1$, σ_2 =tỷ số ứng suất và $\sigma_3=0$ (Sato, 2016) cho rằng độ lớn của ứng suất chênh lệch ($\sigma_1 - \sigma_3$) và áp suất chất lỏng lỗ rỗng không ảnh hưởng đến định hướng ứng suất cắt (quy ước vòng tròn Mohr để ước lượng hệ số ma sát, $\sigma_2=\sigma_k = (\sigma_i - \sigma_j)\phi + \sigma_j$; ($\sigma_i=\sigma_i = 1, 10, 100$; $\sigma_3=\sigma_j =$ tùy ý, và $\sigma_j = 1/10\sigma_i$); gán áp suất lỗ rỗng bằng σ_j , khi đó $\sigma_3=0$) và không thể xác định thông qua đảo ngược. Trong chương trình TENSOR (Delvaux & Sperner, 2003), điều này được thực hiện bằng phương pháp của Mean (1989). Trong việc giải ngược dữ liệu đứt gãy, phần đẳng hướng của tensor ứng suất đó bị mất. Do đó, tensor ứng suất rút gọn giống với phần lệch của tensor ứng suất. Các cường độ được thể hiện một cách tương đối vì không thể xác định giá trị tuyệt đối bằng cách chỉ sử dụng dữ liệu địa chất (Angelier 1989). Bảng quy ước, cường độ tương đối các trục ứng suất nằm trong khoảng $100 = \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 = 0$ (theo đơn vị tùy ý) và cường độ ứng suất của trục σ_2 được cố định bởi hàm của tỷ số ứng suất với độ lớn σ_1 và σ_3 (Delvaux&Sperner, 2003). Do đó, tensor ứng suất rút gọn tối ưu được biểu diễn trên vòng tròn Mohr quy ước đơn vị (chương trình Tensor của Delvaux, 2003; Sato, 2016; Mean, 1989) cho giá trị quy ước của ứng suất pháp và ứng suất cắt trên đứt gãy nhằm ước lượng hệ số ma sát của bất kỳ đứt gãy trượt nào được biết. Góc ma sát bình thường này sẽ nằm trong khoảng lớn 16.7° và nhỏ hơn 40.4° theo tiêu chuẩn ma sát (Bayerlee, 1978; Delvaux & Sperner, 2003).

2-Phương pháp góc cộng ứng

Góc ma sát sẽ bằng 90 độ trừ góc cộng ứng. Góc cộng ứng sẽ được quan sát tại thực địa có giá trị từ 30-90⁰ đối với biến dạng dòn. Việc xác định cặp ứng tại thực địa đạt được, nhưng mất nhiều thời gian, tuy nhiên có thể sử dụng phần mềm chuyên dụng Structure (Danilovitch, 1993) để hỗ trợ xác định các cặp ứng.

3-Phương pháp góc tới ưu

Để đánh giá khả năng tái hoạt động của đứt gãy do hoạt động khai thác, phương pháp của Sibson (1985) được sử dụng, kết nối các chế độ ứng suất ở độ sâu nhất định với góc định hướng θ :

$$\frac{\sigma'_H}{\sigma'_h} = \frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{1 + \mu \cdot \cot(\theta)}{1 - \mu \cdot \tan(\theta)} \dots \dots \dots (1)$$

σ'_H hay σ'_1 – Cường độ ứng suất chính hiệu dụng lớn nhất; σ_h hay σ_3 - cường độ ứng suất chính hiệu dụng nhỏ nhất; μ -hệ số ma sát tĩnh; θ góc nhị diện giữa hướng trục σ_H hay σ_1 với bề mặt đứt gãy.

Trong điều kiện tới hạn trượt ta có cân bằng (Zoback, 2010):

$$\frac{\sigma_{Hmax} - P_p}{\sigma_{hmin} - P_p} = (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2 \dots \dots \dots (2)$$

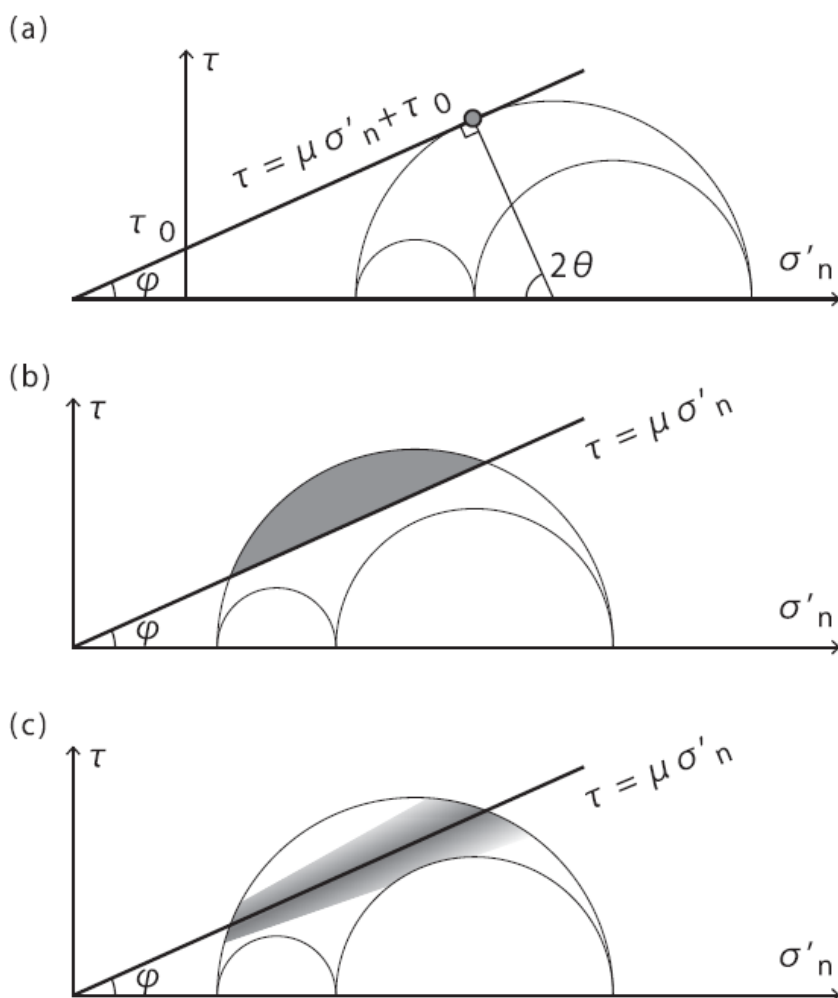
P_p là áp suất chất lỏng lỗ rỗng, thường lấy bằng áp suất thủy tĩnh trong điều kiện tới hạn bình thường

Kết hợp phương trình (1) và (2):

$$\frac{1 + \mu \cdot \cot(\theta)}{1 - \mu \cdot \tan(\theta)} = (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2 \dots \dots \dots (3)$$

Như vậy, nếu biết được góc θ hợp với trục σ_H hay σ_1 gây trượt đứt gãy, sẽ ước lượng được góc ma sát và ngược lại. Góc cộng ứng đứt gãy sẽ bằng 2θ . Chính vậy việc chính xác hóa góc ma sát rất quan trọng trong phân tích xu thế đứt gãy trượt. Phương trình (3) cho ta ước lượng hệ số ma sát khi biết góc trượt đứt gãy hợp với trục ứng suất chính lớn nhất bằng phân tích tensor ứng suất từ tập hợp số liệu trượt đứt gãy hoặc cơ chế chấn tiêu (Hình 1).

2.2.5 Phương pháp mô hình hóa: Sử dụng các mô hình: Tensor (Delvaux&Sperner, 2003), Mohr-Plotter của Allmendinger, 2012; FSP – Fault Slip Potential program (Zoback, 2016); Phase²; 3D – Stress (Morris, 2016); Coulomb 3.3 (USGS)



Hình 1. Các hình vẽ sơ đồ thể hiện các khái niệm về các phương pháp trước đây để xác định hệ số ma sát và xu hướng dịch trượt từ sự phân bố định hướng của các đứt gãy. Trục hoành và trục tung lần lượt là ứng suất pháp tuyến hiệu dụng σ'_n và ứng suất cắt τ , tương ứng (biểu đồ Mohr). Tiêu chí phá hủy của Coulomb không gắn kết, được biểu thị bằng đường $\tau = \mu\sigma'_n$, trong đó μ là hệ số ma sát tĩnh/trượt/phá hủy, áp dụng tùy điều kiện. Góc ma sát φ thỏa mãn $\varphi = \tan^{-1}(\mu)$. (a) Phương pháp đứt gãy cộng ứng. Lực dính và góc cắt lần lượt được ký hiệu là τ_0 và θ . Đứt gãy trượt xảy ra khi đứt gãy đạt giá trị $\tau \geq \mu\sigma'_n$ và chạm đường bao phá hủy trượt, các đứt gãy nằm trong diện tô xám là đã xảy ra trượt (b) Phương pháp của Angelier (1989). (c) Phương pháp của Yin và Ranalli (1995)

2.3 Các bước nghiên cứu

2.3.1 Các bước phân tích xu hướng dịch trượt

Bước 1- Dùng số liệu cơ chế chấn tiêu, BO, DIF, GPS (xem mục 2.1) xác định được trạng thái ứng suất kiến tạo hiện đại trung bình khu vực đang xét để đạt được tensor ứng suất rút gọn (hướng 3 trục ứng suất chính và tỷ số ứng suất)

Bước 2- Biểu diễn tensor rút gọn trên vòng tròn Mohr quy ước với $\sigma_1=0$; $\sigma_2=$ tỷ số ứng suất; $\sigma_3=0$ đã giải thích trên (xem mục 2.2.4)

Bước 3- Tính toán giá trị ứng suất cắt, ứng suất pháp cho từng đoạn đứt gãy (phương pháp số Lộc và nnk, 2019; Stock, 1985; bởi mô hình 3D stress của Moriss, 1996, 2009, Farland, 2012 hoặc bằng mô hình Tensor (Delvaux&Sperner, 2019) hoặc Mohr Plotter (Allmendinger, 2020). Trong công trình này chúng tôi sử dụng tất cả các mô hình hiện có trên thế giới để so sánh đánh giá, chọn mô hình Tensor và Mohr Plotter để xử lý, so sánh.

Bước 4- Ước lượng hệ số ma sát trượt phù hợp nhất từ tensor ứng suất giải ngược từ tập hợp động học vi đứt gãy hay mặt trượt vết xước trên các vi đứt gãy cho từng kiểu thạch học, đất đá khác nhau.

Bước 5- Xác định ứng suất pháp hiệu dụng tại điều kiện áp suất lỗ rỗng giả thiết bằng áp suất thủy tĩnh tại độ sâu đang xét.

Bước 6- Xác định sức bền đứt gãy bằng tích hệ số ma sát tĩnh phù hợp nhất (xem mục 2.2.4, điểm và mục 2.3.1, Linh D.V et al, 2020) với giá trị ứng suất pháp hiệu dụng.

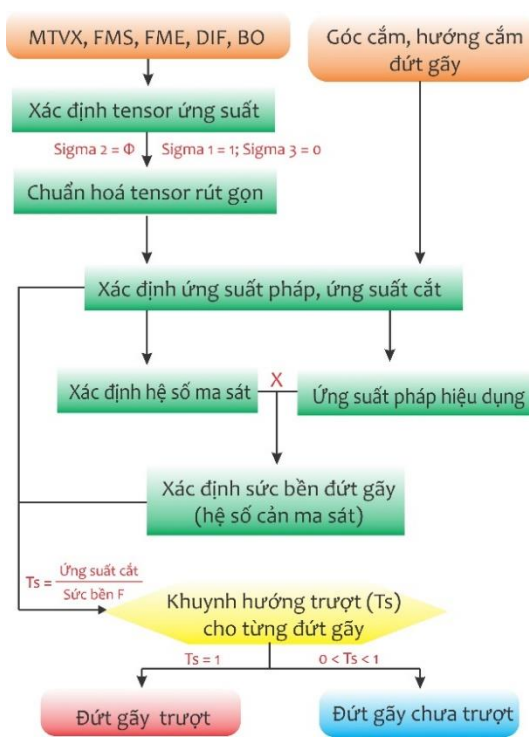
Bước 7- Tỷ số giữa ứng suất cắt xác định ở bước 3 và giá trị sức bền đứt gãy ở bước 6 chính là khuynh hướng trượt của đứt gãy và luôn nhỏ hơn và bằng 1, lớn hơn 0 ($1 \geq T_s > 0$).

2.3.2. Các bước xây dựng bản đồ phân bố ứng suất do tác động hoạt động nhân sinh (bơm ép, phá hủy thủy lực, ...)-AOH

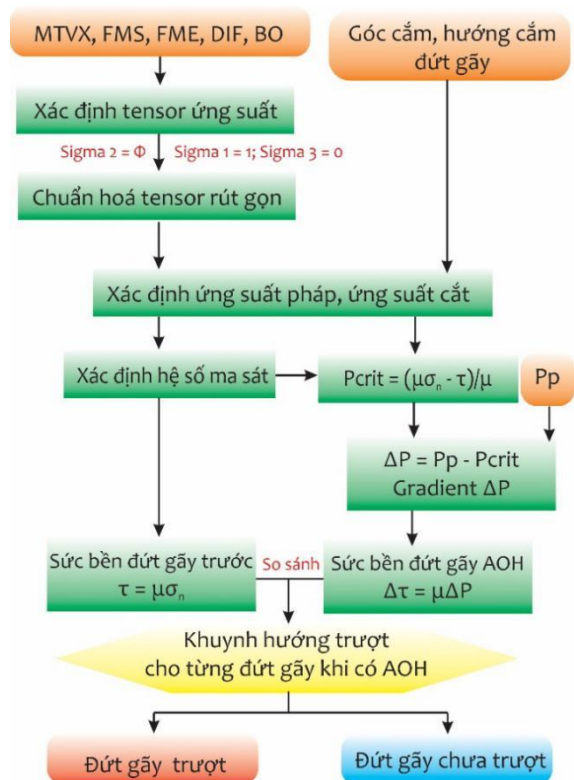
Bước 1- Làm như bước 1 (mục 2.3.1 nêu trên) xác định được trạng thái ứng suất kiến tạo hiện đại khu vực đang xét hay trạng thái ứng suất kiến tạo hiện đại trung bình (tensor rút gọn + cường độ 3 trục ứng suất chính (Angerlier, 1989; Lộc, 2019) bằng phương pháp giải ngược tập hợp các dữ liệu động học đứt gãy và cơ chế chấn tiêu + trục căng P và T (phân tích từ BO, DIF) dùng chương trình Tensor (Delvaux&Sperner, 2003-2019)

Bước 2- Tính toán giá trị ứng suất cắt, ứng suất pháp cho từng đoạn đứt gãy dưới tác động của trạng thái ứng suất kiến tạo hiện đại đang tác động.

Bước 3- Ước lượng hệ số ma sát trượt phù hợp nhất (xem mục 2.2.4, mục 2.3.1 Linh D.V et al, 2020).



Hình 2. Các bước phân tích khuyh hướng trượt (Ts); MTVX; mặt trượt-vết xước, FMS-cơ chế chấn tiêu đơn; FME-nhiều cơ chế chấn tiêu động đất; DIF-khe nứt căng khi khoan; BO- Sập lở thành giếng khoan (cũng chỉ dẫn cho hình 3)



Hình 3. Các bước phân tích phân bố ứng suất do tác động hoạt động nhân sinh (bơm ép, phá hủy thủy lực, ...)-AOH (Activities of Human)

Bước 4- Tính áp suất lỗ rỗng ngưỡng tới hạn (Pcrit) xảy ra trượt cho từng đứt gãy $P_{crit} = (\mu\sigma_n - \tau)/\mu$ (Zoback, 2007).

Bước 5- Xác định chênh lệch áp suất (ΔP) giữa Pcrit và giá trị áp suất lỗ rỗng tại độ sâu đang xét giả thiết bằng áp suất thủy tĩnh cho từng đứt gãy.

Bước 6- Xác định gradient áp suất lỗ rỗng chênh lệch.

Bước 7- Xác định hướng tác động ứng suất pháp và ứng suất cắt cho từng mặt đứt gãy.

Bước 8- Xác định sự thay đổi ứng suất cắt và ứng suất pháp cho từng đoạn đứt gãy thông qua sức bền đứt gãy trước ($\tau = \mu\sigma_n$) và giá trị thay đổi ứng suất cắt sau khi trượt ($\Delta\tau = \mu\Delta P$) do tác động AOH gia tăng áp suất lỗ rỗng đủ cao để gây trượt ($P \geq P_{crit}$).

Bước 9- Mã hóa cơ sở dữ liệu, bản đồ hóa, phân đoạn hóa đứt gãy về hệ GIS và xây dựng bản đồ phân bố ứng suất do tác động hoạt động nhân sinh theo tỷ lệ nghiên cứu.

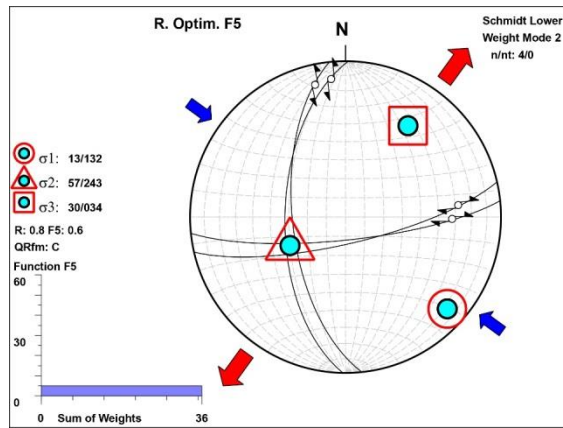
3. Kết quả nghiên cứu

3.1 Ước lượng hệ số ma sát

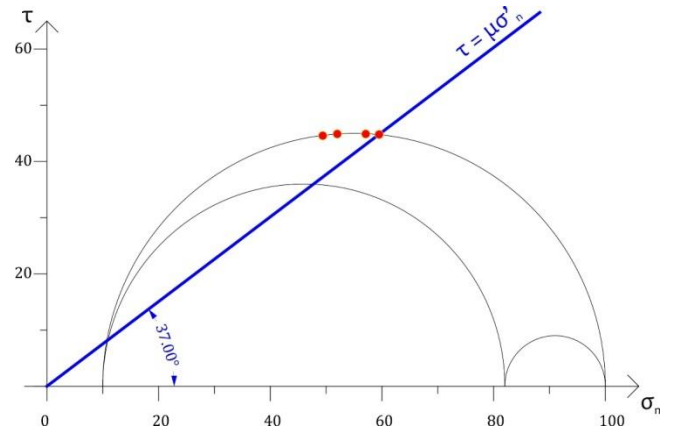
3.1.1- Ước lượng hệ số ma sát liên quan đến động đất

a) - Động đất tự nhiên sông Cầu

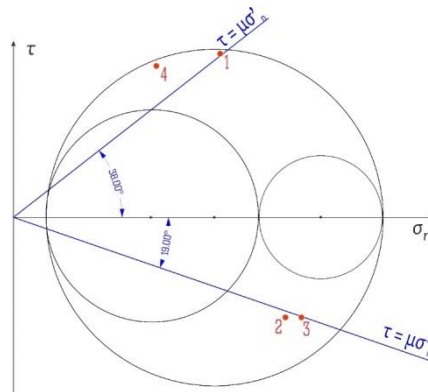
Kết quả ước lượng hệ số ma sát từ 02 trận động đất tại Sông Cầu (Hình 4a) cho kết quả góc ma sát nhận giá trị khoảng 37° (khi xét tại trạng thái ứng suất phân tích từ 02 cơ cấu chấn tiêu Sông Cầu -Hình 4b) và nhận giá trị 38° hoặc 19° (khi xét tại trạng thái ứng suất hiện đại trung bình rút gọn khu vực).



Hình 4a-Cơ chế chấn tiêu 2 trận động đất sông cầu 1972, $M=5.3$



Hình 4b-Góc ma sát động đất tự nhiên ứng với 02 trận động đất ở Sông Cầu lớn nhất $\beta=37^\circ$



Hình 4c. Góc ma sát động đất tự nhiên ứng với 02 trận động đất ở Sông Cầu có 2 khả năng hoặc $\beta=38^\circ$ hoặc $\beta=19^\circ$

b) - Động đất ngoài khơi Vũng Tàu

Góc ma sát được phân tích từ 12 cơ cấu chấn tiêu động đất ngoài khơi Vũng Tàu (Hình 5a) phổ biến trong khoảng từ 20.3° đến 20.6° (khi xét tại trạng thái ứng suất hiện đại trung bình rút gọn khu vực - Hình 5b) và nhận giá trị khoảng 19.4° (khi xét tại trạng thái ứng suất khi phân tích 12 mặt cơ cấu chấn tiêu động đất). Một số trận động đất có mặt đứt gãy trượt với góc ma sát cao bất thường như các mặt đứt gãy số 6, 9, 17, 22 với góc ma sát lần lượt là 42.2° , 50° , 53° và 53.5° (Hình 6f, 6b, 6d và 6e). Các mặt đứt gãy số 8 và số 10 có dấu hiệu trượt với góc ma sát thấp lần lượt 14.7° và 12.4° . Các hiện tượng trượt bất thường với góc ma sát bất thường xảy ra, có thể liên quan đến hoạt động bơm ép/phá hủy thủy lực, thử vỉa trong hoạt động thăm dò, khai thác dầu khí (Simpson, 1988).

3.1.2- Ước lượng từ tập hợp mặt trượt vết xước

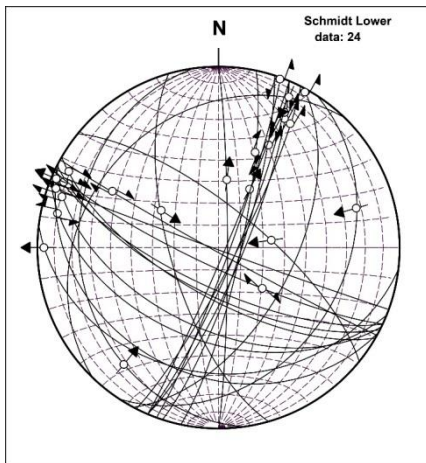
Kết quả nghiên cứu (Linh., 2020) đã ước lượng góc ma sát phù hợp (fit) với phân bố chuẩn (normal distribution) cho thấy giá trị chấp nhận được của góc ma sát trung bình ở phần đất liền nằm trong khoảng 25.8° đến 31.5° có độ tin cậy hơn 95%. Trong khi đó, giá trị chấp nhận được của góc ma sát trung bình ở phần ngoài khơi thấp hơn nằm trong khoảng 23° đến 31° . Do tính chất bất đồng nhất của hệ thống đứt gãy, đề xuất giá trị ngưỡng dưới thấp nhất để các đứt gãy trượt trong mọi điều kiện, khuyến nghị lấy giá trị của trung vị (median) góc ma sát là 19.12° . Lựa chọn giá trị ngưỡng trên của góc ma sát trung bình tốt nhất là 28.58° . Đây là giá trị trung bình của trung bình (mean), tương ứng hệ số ma sát 0,55 (Hình 7).

Việc phát hiện các ngưỡng góc ma sát có độ tin cậy cao đóng góp có ý nghĩa trong dự báo các khuynh hướng trượt các đứt gãy và sự thay đổi ứng suất do động đất bất thường có dấu hiệu liên quan đến các hoạt động nhân sinh trong quá trình bơm ép nước và khai thác dầu khí ở mỏ dầu khí Bạch Hổ nói riêng và trũng Cửu Long nói chung. Góc ma sát của đá granit dải đất liền ven biển vùng nghiên cứu bao gồm 73 mẫu (39 mẫu cộng ứng mặt vết xước) + 34 mẫu thí nghiệm nén 3 trục ở kho ngầm Cái Mép (max/min). Giá trị trung bình của trung bình $28,58^{\circ}$ ($25,86^{\circ}$ - $31,08^{\circ}$). Góc ma sát trong đá granit ở móng của mỏ dầu khí Bạch Hổ, bị dập vỡ và phá hủy mạnh, bao gồm 65 mẫu (41 mẫu BH + 24 mẫu/24 mặt nodal từ 12 cơ chế chấn tiêu của 12 trận động đất được xác định tốt nhất). Giá trị trung bình của trung bình là $26,97^{\circ}$ ($23,27^{\circ}$ - $30,96^{\circ}$). Lựa chọn giá trị ngưỡng trên của góc ma sát trung bình tốt nhất là $28,58^{\circ}$. Đây là giá trị trung bình của trung bình (mean), tương ứng hệ số ma sát 0,55.

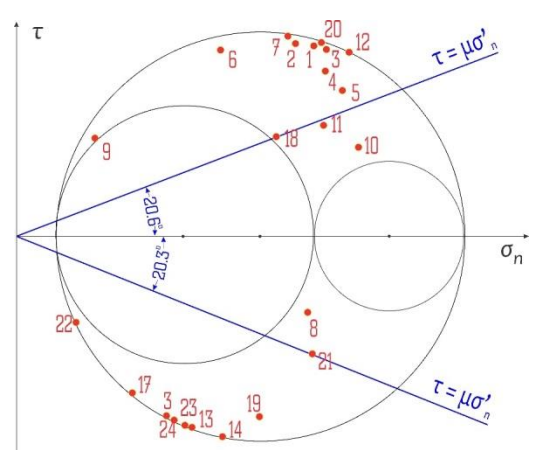
3.2 Kết quả tính toán xu hướng dịch trượt

Mô hình tính toán cho kết quả các đứt gãy phương BDB – NTN (phương $10 - 20^{\circ}$) và các đứt gãy TB – ĐN ($315 - 320^{\circ}$) nhạy cảm với trường ứng suất kiến tạo hiện đại. Khi bơm ép vượt áp suất thủy tĩnh 6 MPa (50,5 MPa), làm tái trượt đoạn đứt gãy độ dài 5881m gần cụm mỏ Rồng – Bạch Hổ có thể tạo động đất 1,5 độ Richter (Hình 8A, 8B). Khi tiến hành bơm ép ở độ sâu khoảng 4km đến 5 km, vượt áp suất thủy tĩnh 12,4 MPa (61,5 MPa), làm tái trượt đoạn đứt gãy độ dài 8695m tại cụm mỏ Rồng – Bạch Hổ, với biên độ trượt cực đại 0,55m có thể gây động đất 3,3 độ Richter.

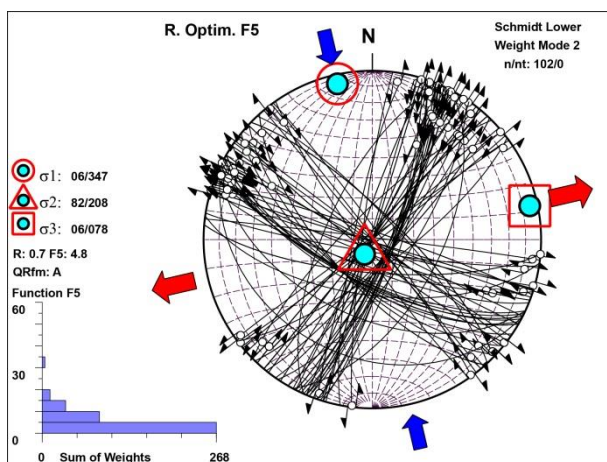
b) Động đất ngoài khơi Vũng Tàu



Hình 5a. 24 mặt đứt gãy có khả năng tham gia vào trong 12 cơ chế chấn tiêu động đất ở ngoài khơi Vũng Tàu từ 2002 đến 5/2020



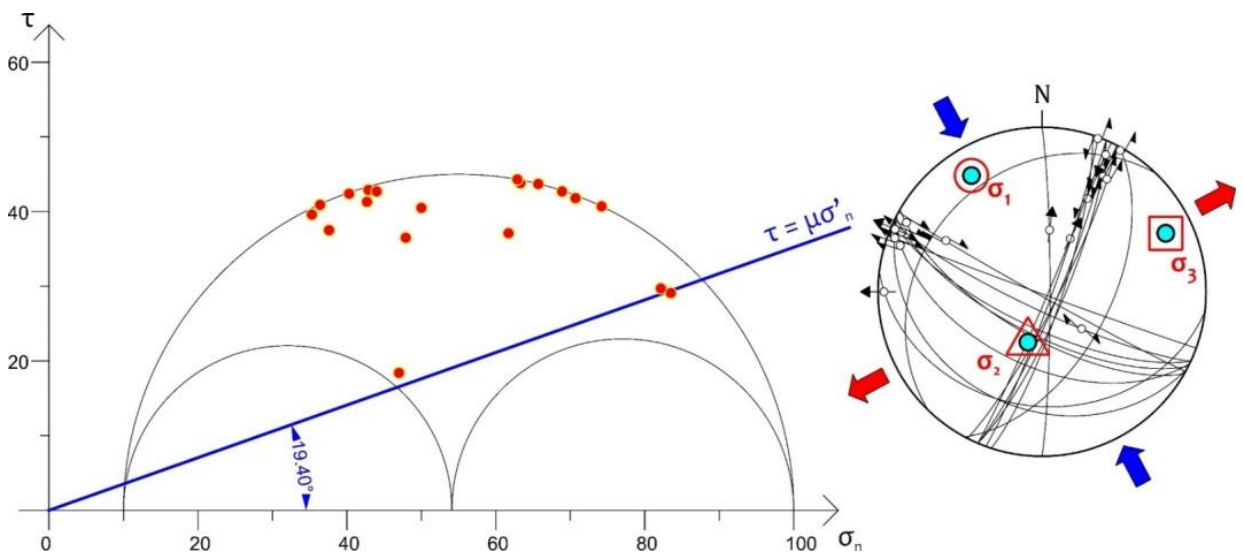
Hình 5b. Góc ma sát ($20,3^{\circ}$ đến $20,6^{\circ}$) phổ biến ở ngoài khơi Vũng Tàu từ 2002 đến 5/2020



Hình 5c. Trạng thái ứng suất hiện đại trung bình rút gọn phù hợp nhất vùng nghiên cứu phân tích từ cơ chế chấn tiêu động đất và ứng suất in situ (BO, DIF)

Mô hình hoá khả năng sinh trượt cho hệ thống đứt gãy (đã biết hướng cắm, góc cắm) (Hình 9) trên phần mềm Mohr – Plotter cho kết quả ở trạng thái ban đầu khi chưa xảy ra bơm ép, các hệ thống đứt gãy phương BDB – NTN cắm dốc đã gần chạm tới giới hạn trượt và tối ưu hoá với trường ứng suất khu vực mỏ Bạch Hồ (Hình 10A); khi tiến hành bơm ép vượt áp suất thủy tĩnh 16,49 MPa (Hình 10B) các hệ thống đứt gãy BDB – NTN và TB – ĐN với góc cắm từ 70° đến gần cắm đứng đều bắt đầu sinh trượt. Điều này cũng phù hợp với mô hình của chương trình Phase² đưa ra với sai số chênh lệch cũng không đáng kể. Xét điều kiện bơm ép cực cấp với áp suất bơm 25MPa ở mỏ Bạch Hồ (Hình 10C), các hệ thống đứt gãy BDB – NTN và TB – ĐN với góc cắm từ 70° đều có nguy cơ sinh trượt. Các hệ thống đứt gãy phương vĩ tuyến hoặc các đứt gãy có góc cắm thoải đều có nguy cơ sinh trượt thấp.

Mô hình FSP với gần 3 triệu khối nước bơm ép trên 8 giếng khoan thường xuyên trong giai đoạn 1993 đến 2017 cho thấy khả năng tái trượt của các đứt gãy khu vực mỏ Bạch Hồ cho kết quả các đứt gãy phương BDB – NTN (phương $10 - 30^{\circ}$) là các đứt gãy có nhạy cảm với trường ứng suất kiến tạo hiện đại khu vực (Hình 11A, B). Trong điều kiện bơm ép nước tại khu vực trung tâm với mức bơm ép trung bình 10686,48 – 32059,45 bbl/ngày, kết quả mô phỏng cho thấy các đứt gãy nghịch phương $20 - 30^{\circ}$ khu vực phía Tây Bắc mỏ Bạch Hồ có khả năng sinh trượt với xác suất cao nhất là có FSP là 70% hoặc 0.7 (Hình 11C).



d-Phân tích góc ma sát từ tập hợp đứt gãy trong đứt đoạn trong 12 cơ chế chấn tiêu động đất ngoài khơi Vũng Tàu cho giá trị ngưỡng dưới góc ma sát 19,4 độ

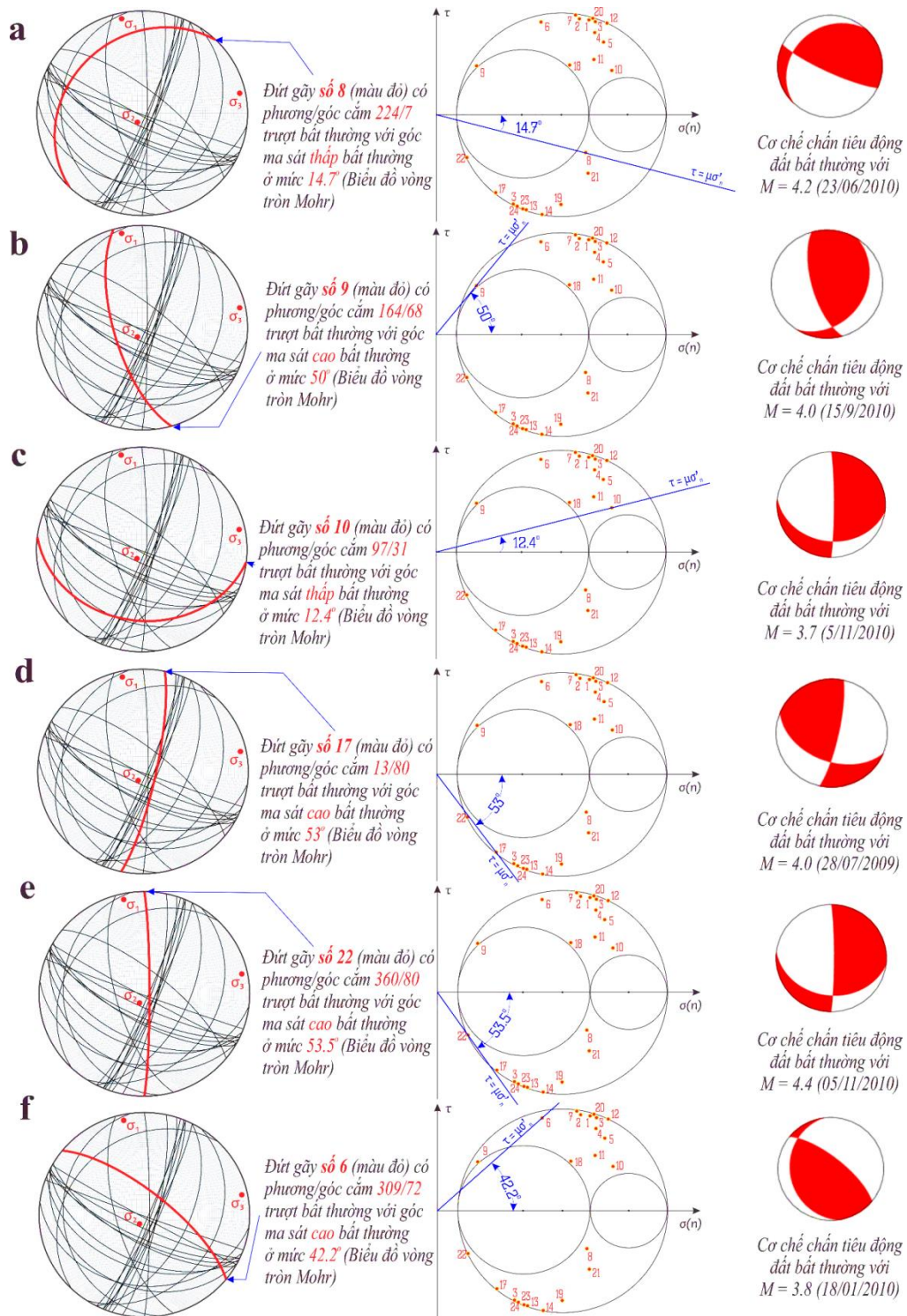
Hình 5. Góc ma sát trung bình và trạng thái ứng suất hiện đại phân tích từ các trận động đất bất thường và phổ biến (bình thường)

Kết quả phân tích mô hình 3Dstress (Moriss, 2016) cho kết quả cực đại xu hướng dịch trượt đứt gãy có $T_{s_{max}} = 1.272$ khi $P_p = 72$ MPa khi cực đại tối ưu hóa góc đứt gãy trong tensor ứng suất khu vực tác động. Các đứt gãy phương Đông Bắc – Tây Nam có phương $40^{\circ} - 55^{\circ}$ hầu như ít rất ít khả năng trượt hay hầu như không trượt (Hình 12A). Chỉ thay đổi đặc điểm phân bố xu hướng dịch trượt là cực của các đứt gãy có góc hợp với trục (σ_3 -ứng suất chính nhỏ nhất) thu hẹp lại, đồng nghĩa trượt cao nhất, mạnh mẽ dọc các đứt gãy phương kinh tuyến $\pm 10^{\circ}$ và phương TB - ĐN $332 \pm 5^{\circ}$ có góc cắm trên 85 độ theo đường trượt với góc rake $175,5^{\circ}$ (Hình 12B). Tại mỏ Bạch Hồ, cực đại xu hướng dịch trượt $T_{s_{max}}=1.272$ khi $P_p=72$ Mpa (bơm ép vượt ngưỡng $P_h=23$ Mpa) khi cực đại tối ưu hóa góc đứt gãy trong tensor ứng suất khu vực tác động. Các đứt gãy phương Đông Bắc – Tây Nam có phương $40^{\circ} - 90^{\circ}$ hầu như ít rất ít khả năng trượt hay hầu như không trượt (Hình 12C). Chỉ thay đổi đặc điểm phân bố khuynh hướng trượt là cực các đứt gãy có góc hợp với trục (σ_3 - ứng suất chính nhỏ nhất) thu hẹp lại, đồng nghĩa trượt cao nhất, mạnh mẽ dọc các đứt gãy phương kinh tuyến $\pm 10^{\circ}$ và phương TB-ĐN $332 \pm 5^{\circ}$ có góc cắm trên 85 độ theo đường trượt với góc trượt (rake) là $175,5^{\circ}$ (Hình 12D).

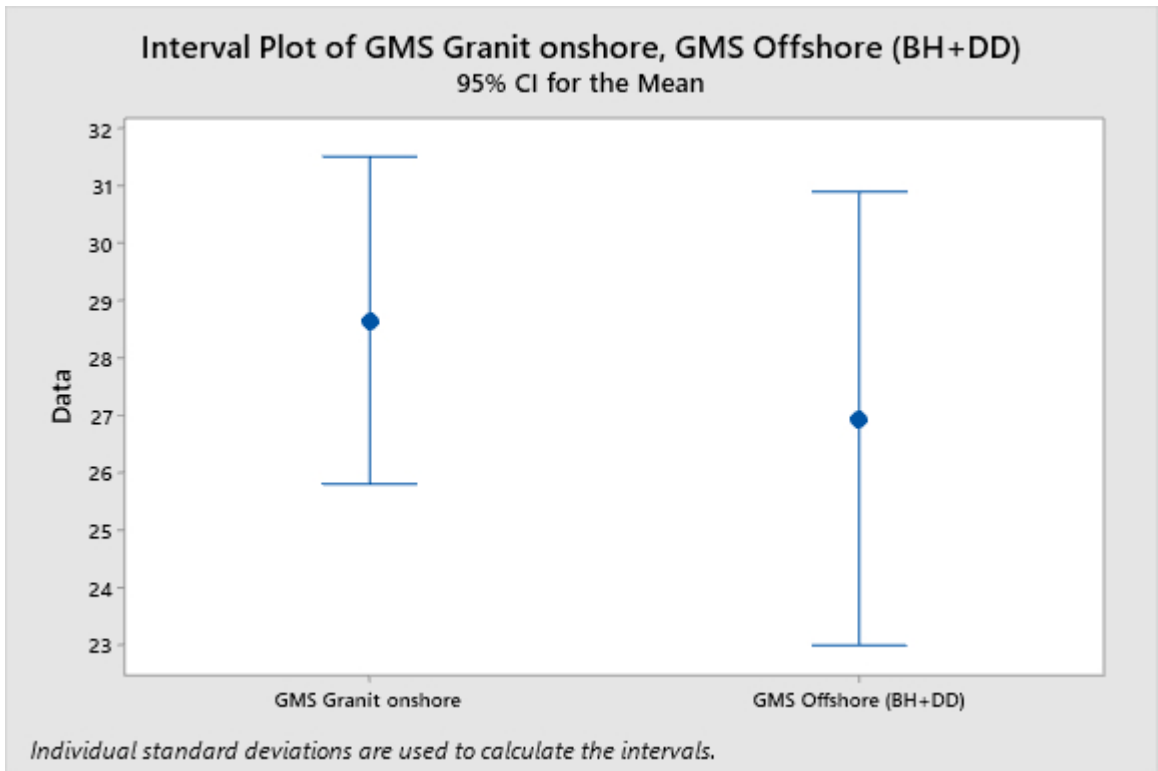
3.3. Sự thay đổi ứng suất cắt do dịch trượt bất thường, hoạt động nhân sinh gây động đất

Phân tích hệ số ma sát trượt bất thường chỉ ra các trận động đất bất thường trong số chùm chấn tâm động đất tập trung cụm, đới kéo dài phương ĐB- TN khoảng 30° dọc theo đứt gãy cùng phương, trong giai đoạn

2002 đến 5/2020 (Hình 14) khu vực mỏ Bạch Hổ và các mỏ dầu đang khai thác ở trung Cửu Long, Đông Bắc của mỏ Bạch Hổ (Lộc, 2019). Kết quả cho thấy có 6 mặt đứt đoạn điển hình động đất bất thường (góc ma sát quá thấp, hoặc quá cao so với động đất bình thường và tự nhiên) (Bảng 1) với sự thay đổi ứng suất cắt đạt từ 0,2 đến 35,1 MPa tùy theo độ sâu và góc ma sát bất thường.



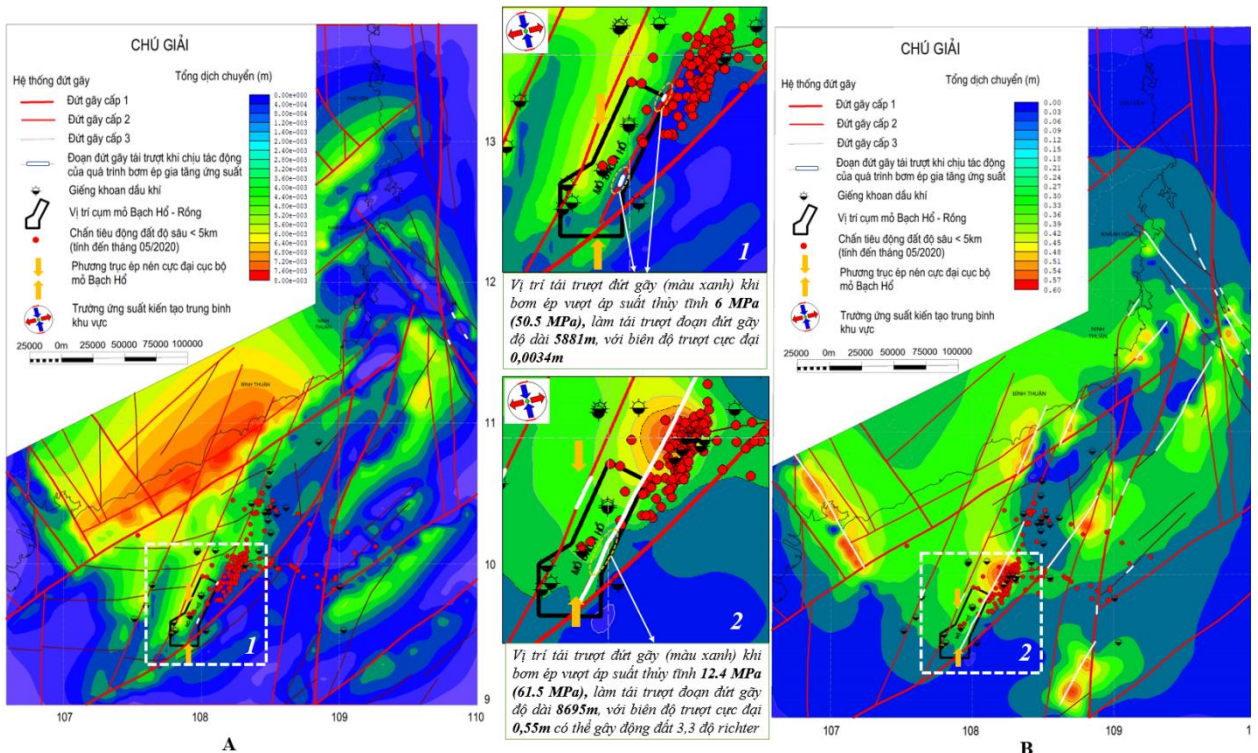
Hình 6: Phân tích hệ số ma sát trượt đứt gãy từ phân tích 12 cơ chế chấn tiêu động đất/24 mặt nodal, để đánh giá trượt bất thường xảy ra, có thể liên quan đến hoạt động bơm ép/phá hủy thủy lực, thử vỉa trong hoạt động thăm dò, khai thác dầu khí. (Lưu ý: Chiều cực của ba trục $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ trên cầu chiếu dưới biểu diễn cho trạng thái ứng suất hiện tại)



Hình 7: Lựa chọn giá trị ngưỡng trên của góc ma sát trung bình tối nhất là 28,58°. Đây là giá trị trung bình của trung bình (mean), tương ứng hệ số ma sát 0,55 (GMS – Góc ma sát; BH- Bạch Hồ mở; DD-cơ chế chấn tiêu động đất; CL-độ tin cậy

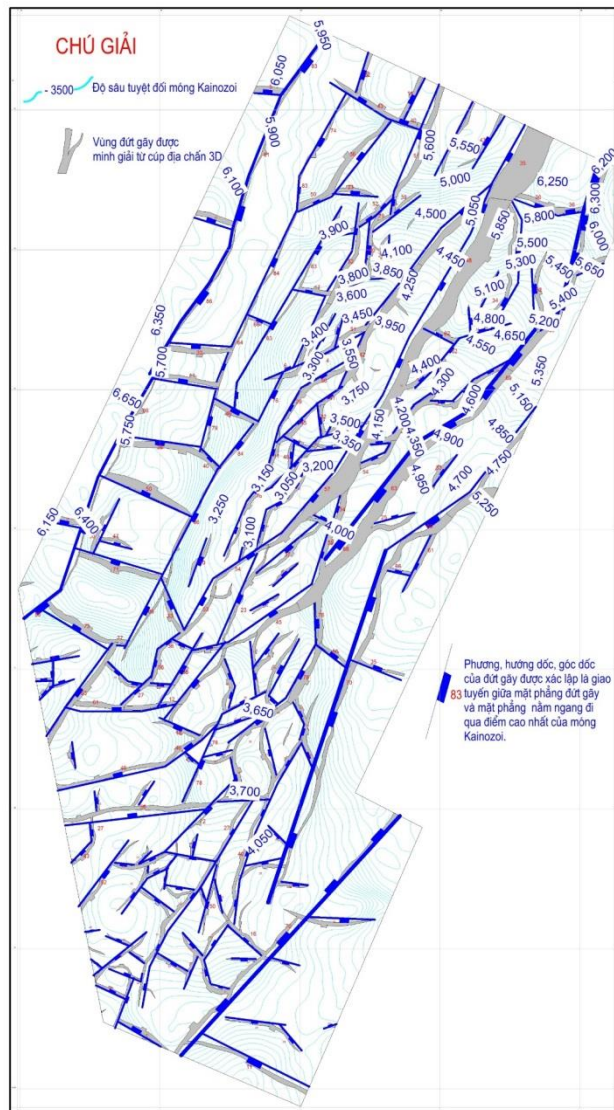
Vị trí tải trượt đứt gãy (màu trắng) khi bơm ép vượt áp suất thủy tĩnh 6 MPa (50.5 MPa), làm tải trượt đoạn đứt gãy độ dài 5881m, với biên độ trượt cực đại 0,0034m

Vị trí tải trượt đứt gãy (màu trắng) khi bơm ép vượt áp suất thủy tĩnh 12.4 MPa (61.5 MPa), làm tải trượt đoạn đứt gãy độ dài 8695m, với biên độ trượt cực đại 0.55m có thể gây động đất 3.3 độ Richter

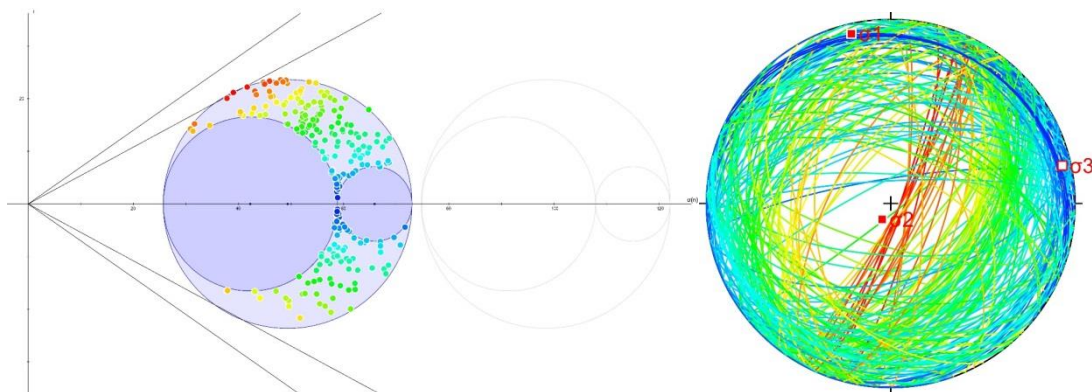


Hình 8: Kết quả mô hình hóa theo chương trình Phase² A – Tổng dịch chuyển trong trường hợp áp suất bơm ép vượt áp suất thủy tĩnh 6 MPa (50.5 MPa), B – Tổng dịch chuyển trong trường hợp áp suất bơm ép vượt áp suất thủy tĩnh

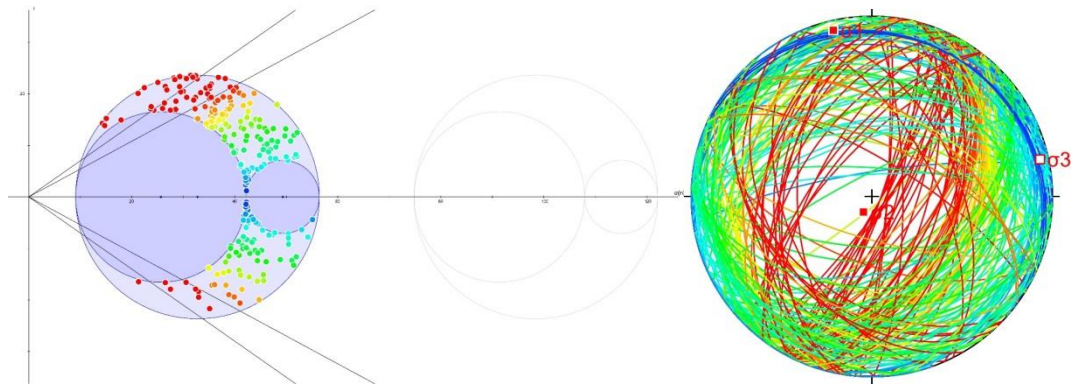
12.4 MPa (61.5 MPa) C – Sự phân bố ứng suất cắt trong trường hợp áp suất bơm ép vượt áp suất thủy tĩnh 12.4 MPa (61.5 MPa) (Lộc và nnk, 2019)



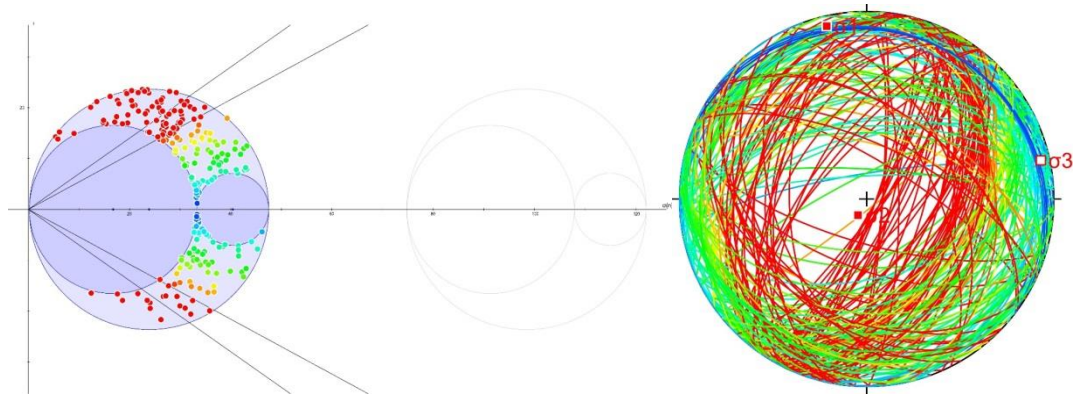
Hình 9: Sơ đồ đứt gãy tầng móng mỏ Bạch Hồ



Hình 10A



Hình 10B



Hình 10C



Không có nguy
cơ sinh trượt

Nguy cơ sinh
trượt cao

Hình 10: Mô hình Mohr – Plotter xem xét khả năng tái trượt của các đứt gãy mỏ Bạch Hổ

A – Trường hợp tại trạng thái ứng suất ban đầu $S_{Hmax} = 122.1 \text{ MPa}$; $S_v = 107.9 \text{ MPa}$; $S_{Hmin} = 74.8 \text{ MPa}$; $P_p = 49.1 \text{ MPa}$

B- Trường hợp khi áp suất bơm ép vượt áp suất thủy tĩnh 16.69 MPa ($P_p = 65.69 \text{ MPa}$)

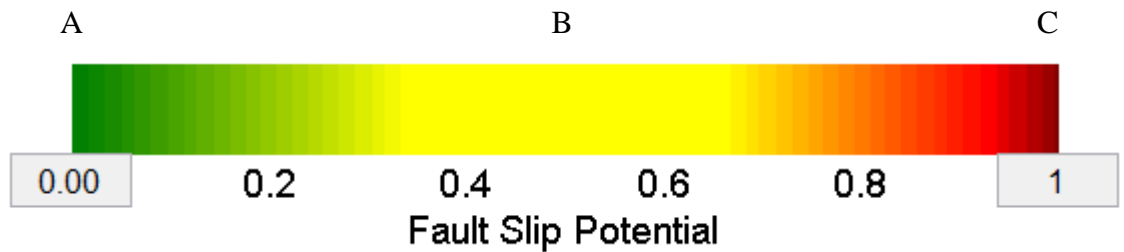
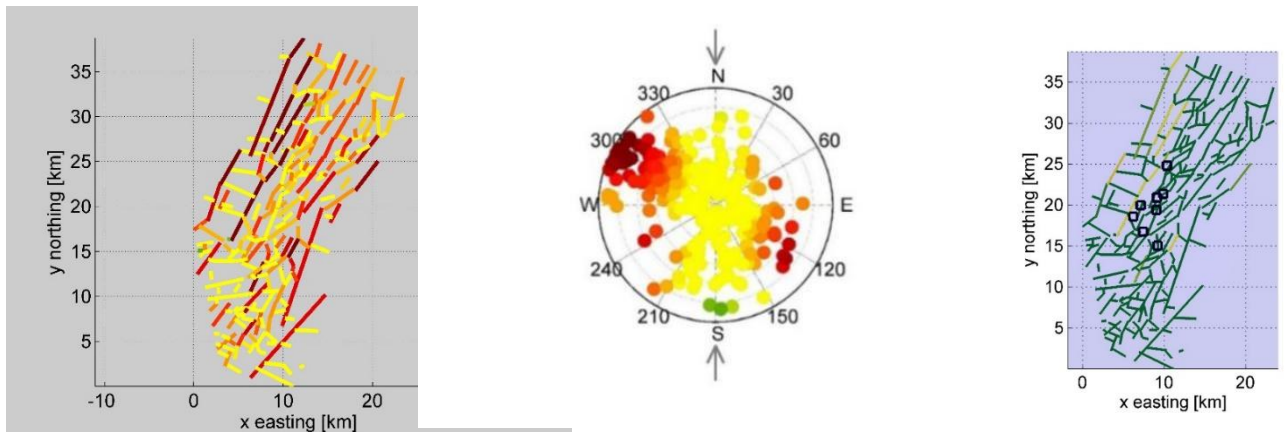
C- Trường hợp khi bơm ép cực cấp vượt áp suất thủy tĩnh 25 MPa ($P_p = 74.6 \text{ MPa}$)

**Hình bên phải: Mô hình vòng tròn Mohr tại các trạng thái ứng suất, đường giới hạn bên trong chỉ khả năng tái dịch trượt của đứt gãy tương ứng hệ số ma sát khối $= 0.54$; đường giới hạn bên ngoài chỉ phá hủy vật liệu tại trạng thái góc ma sát trong 35° . Hình bên trái: Ảnh chiếu cực các bề mặt đứt gãy lên cầu chiếu dưới và khả năng sinh trượt của chúng trong điều kiện trạng thái ứng suất hiện tại

3.4. Sự phân bố ứng suất do hoạt động nhân sinh-bơm ép làm gia tăng áp suất lỗ rỗng đạt ngưỡng tới hạn và vượt áp suất thủy tĩnh gây trượt các đứt gãy

Kết quả phân tích xu hướng dịch trượt khu vực mỏ Bạch Hổ (Hình 12C, Hình 12D; Hình 13a, Hình 13b) cho thấy các đứt gãy vùng rìa tây bắc và đông – đông nam mỏ Bạch Hổ có xu hướng dịch trượt cao mức $T_s=0,9-1$ tới hạn trượt, chỉ một tác động bơm ép với gradient đạt $0-0,1 \text{ bar}/10 \text{ m}$ có thể trượt đứt gãy xảy ra kèm phát sinh động đất.

Chênh lệch gradient bơm ép gây trượt giữa hai kịch bản góc ma sát trượt $28,6$ và $30,96^\circ$ có gradient bơm ép gây trượt dao động từ $0,1$ đến $0,3 \text{ bar}/10 \text{ m}$. Khu vực đối trung tâm, vùng Tây Nam, và Bắc khuynh hướng trượt thấp hơn, diện phân bố các vùng gây trượt nhỏ hơn chiếm khoảng $5-15\%$ so với vùng rìa Tây Bắc và Đông – Đông Nam. Đồng nghĩa việc bơm ép với gradient cao hơn từ 3 MPa đến 26 MPa so với áp suất thủy tĩnh, có thể trượt đứt gãy xảy ra tùy từng đứt gãy cụ thể. Ứng suất pháp có độ dài càng nhỏ tác động vào đứt gãy ứng với xu hướng dịch trượt cao, và ngược lại.

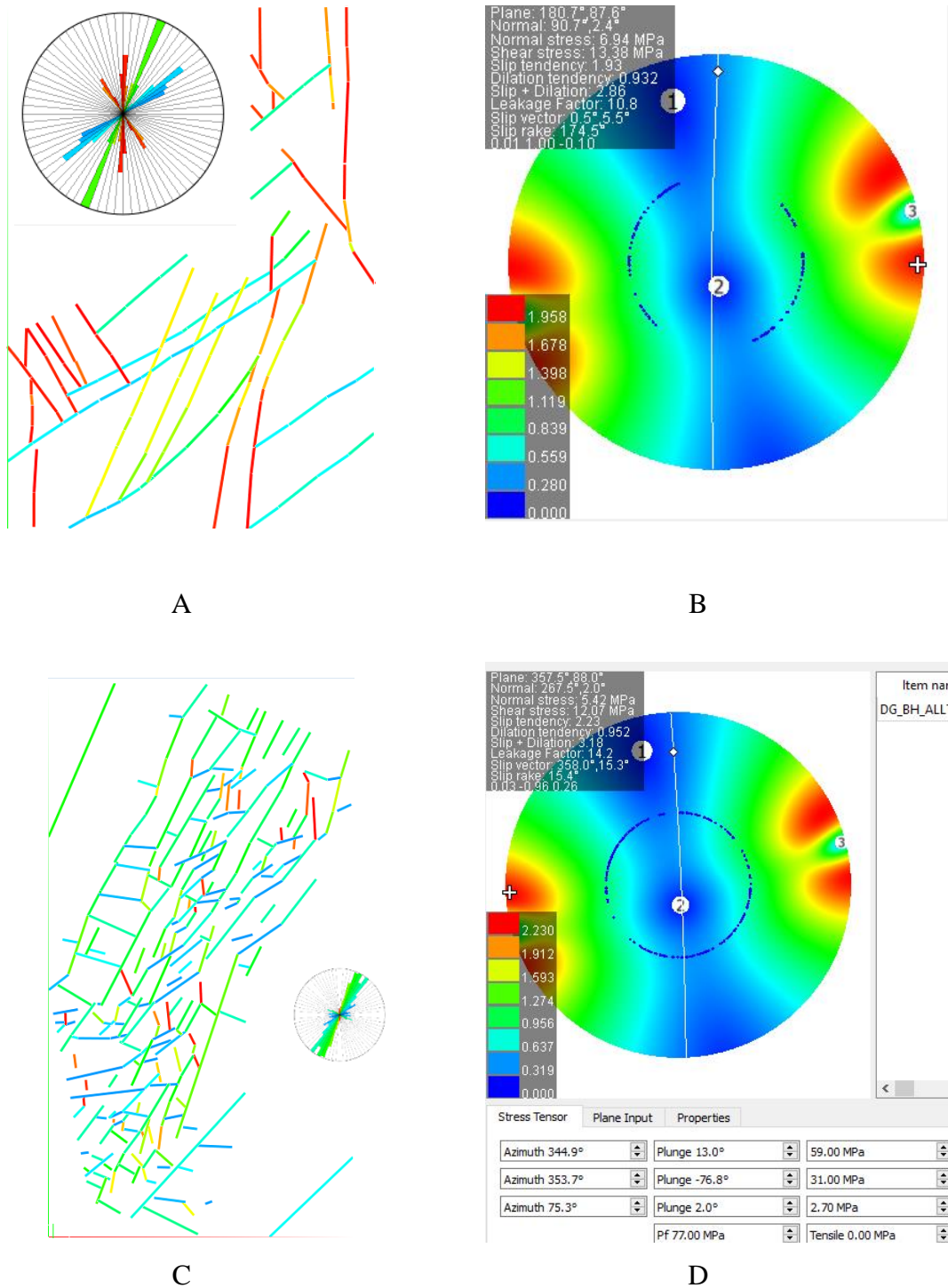


Hình 11: Tiềm năng dịch trượt các đứt gãy khu vực mỏ Bạch Hổ khi bơm ép nước thu hồi dầu khí, tiềm năng càng cao nguy cơ trượt càng lớn, đứt gãy phía tây mỏ Bạch Hổ, Tây của vòm trung tâm có khả năng trượt cao nhất và phát sinh động đất; chỉ dẫn hình 11-C: ô vuông cạnh màu đen là vị trí lỗ khoan bơm ép nước thu hồi dầu khí

Bảng 1. Sự thay đổi ứng suất cắt liên quan trượt bất thường, hoạt động bơm ép nước gây động đất

STT	Đứt gãy trượt	M _L (Richter)	Độ sâu km	Góc ma sát bình thường (μ) (độ)	Góc ma sát bất thường (μ*) (độ)	Cường độ σ ₁ (MPa)	Cường độ σ ₃ (MPa)	Ứng suất lệch σ ₁ -σ ₃	Ứng suất cắt bình thường (τ) (MPa)	Ứng suất trượt bất thường (σ _s) (MPa)	Thay đổi ứng suất lúc trượt (τ- σ _s) (MPa)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	Số 10	3.7	5.0	28.6	12.4	122.1	74.8	47.3	46.8	38.2	8.7
2	Số 8	4.2	4.0	28.6	14.7	97.7	59.8	37.8	37.5	3.7	33.7
3	Số 9	4.0	5.0	28.6	50	122.1	74.8	47.3	46.8	35.2	11.6
4	Số 22	3.7	5.0	28.6	53.5	122.1	74.8	47.3	46.8	44.1	2.8
5	Số 17	4.0	10.0	28.6	53	244.2	149.6	94.6	93.7	60.9	32.8
6	Số 6	3.8	10.0	28.6	42.2	244.2	149.6	94.6	93.7	59.2	34.5

Lưu ý: Số liệu được in đậm là cùng một trận động đất, khác mặt đứt gãy thực. chỉ dẫn bảng 1: cột (1) – số thứ tự; cột (2) số hiệu mặt đứt gãy trong phân tích cơ chế chấn tiêu từ 1 đến 24 đứt gãy/12 cơ chế chấn tiêu; cột (3) – cường độ động đất quan sát bằng mạng trạm khu vực nghiên cứu; cột số (4)-độ sâu chấn tiêu xác định bằng mạng trạm khu vực nghiên cứu; cột (5)-góc ma sát phân tích thống kê trung bình từ 238 mặt đứt gãy trượt (vì đứt gãy quan sát đất liền + 24 đứt đoạn trong 12 cơ chế chấn tiêu); cột (7) và cột (8) từ công thức (2) trong bài này và tỷ số ứng suất trung bình phân tích từ 238 đứt gãy trượt ($\phi = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$, (Angelier, 1984; Loc, 2019) với giả thiết đứt gãy tới hạn trượt (Zoback, 2010) và tại độ sâu xét xảy ra trượt đứt gãy; cột (9), hiệu số giữa cột (7) và cột (8); cột (10), $\tau = \mu \sigma_n$ hoặc $(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta$, θ -góc tối ưu trượt của mặt đứt gãy so với trục ép nén cực đại (σ_1), $\theta = \text{atan}(1/\mu)$, $2\sigma_n = [(\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \theta]$ (Hawkes, 2005), μ -góc ma sát bình thường; cột (11): $\sigma_s = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta^*$, θ^* -Góc tối ưu trượt bất thường, $\theta^* = \text{atan}(1/\mu^*)$, μ^* -góc ma sát bất thường



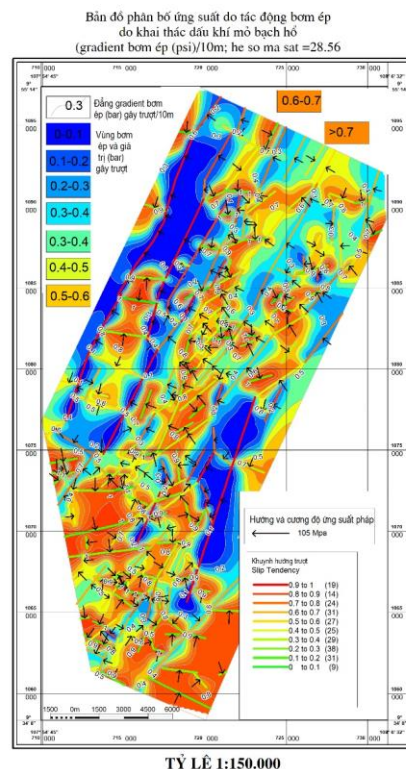
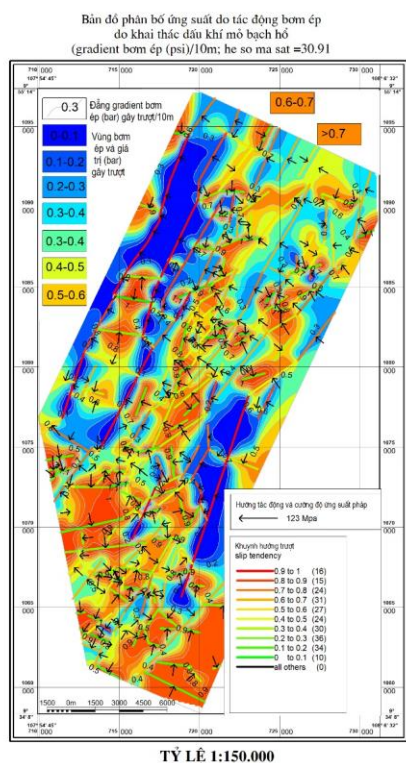
Hình 12. Xu hướng dịch trượt các đứt gãy khu vực ven biển Tuy Hòa tới Vũng Tàu (A, B), mỏ Bạch Hổ (C, D) theo phân tích mô hình 3Dstress (code mô hình theo Morris, 2016), chỉ dẫn cấp độ màu-xu hướng trượt (hình A, C) như chỉ dẫn trong hình (B, D)

Kết quả phân tích xu hướng dịch trượt khu vực ven biển Tuy Hòa tới Vũng Tàu (Hình 14) cho thấy các đứt gãy sông Sài Gòn, đứt gãy sông Vàm Cỏ Đông, Sông Đồng Nai; đứt gãy Sông Ba, Shear Tuy Hòa, đứt gãy Sông Cà Núi; đứt gãy Đông Bạch Hổ, đứt gãy Tây Bạch Hổ, đứt gãy Đông Phú Quý có xu hướng dịch trượt cao mức $T_s=0,9-1$ tới hạn trượt, chỉ một tác động bơm ép với gradient đạt 0-0.1bar/10m so với độ sâu xem xét có thể trượt đứt gãy xảy ra kèm phát sinh động đất. Khu vực dọc đứt gãy Vũng Tàu – Cà Ná, dải ven biển Vũng Tàu – Ninh Thuận, vùng Tuy An, vùng Nha Trang, vùng Ninh Hoa xu hướng dịch trượt thấp hơn, diện phân bố các vùng gãy trượt nhỏ hơn chiếm khoảng 5-15% so với vùng trũng Cửu Long, Tây Trũng Nam, vùng Sài Gòn – Long An – Bình Long – Đồng Nai – Côn Sơn. Điều này đồng nghĩa việc bơm

ép với gradient cao hơn từ 0,3 MPa đến 49 MPa so với áp suất thủy tĩnh, có thể trượt đứt gãy xảy ra tùy từng đứt gãy cụ thể (Hình 14). Ứng suất pháp có độ dài càng nhỏ tác động vào đứt gãy ứng với khuynh hướng trượt cao, và ngược lại.

4. Ý nghĩa của việc nghiên cứu xu hướng dịch trượt của đứt gãy

Phân tích xu hướng dịch trượt cung cấp một phương tiện để đánh giá rủi ro tương đối của động đất và khả năng hoạt động của các đứt gãy, kiểm tra tính tương thích của các cấu trúc địa chất được cho là đã phát triển trong một trường ứng suất duy nhất, một cách tiếp cận để thăm dò các đứt gãy có xu hướng dịch trượt cao và dễ xảy ra động đất, và một giải pháp thay thế định hướng vectơ ứng suất để luận giải các bề mặt đứt gãy thật từ các cơ cấu chấn tiêu động đất.

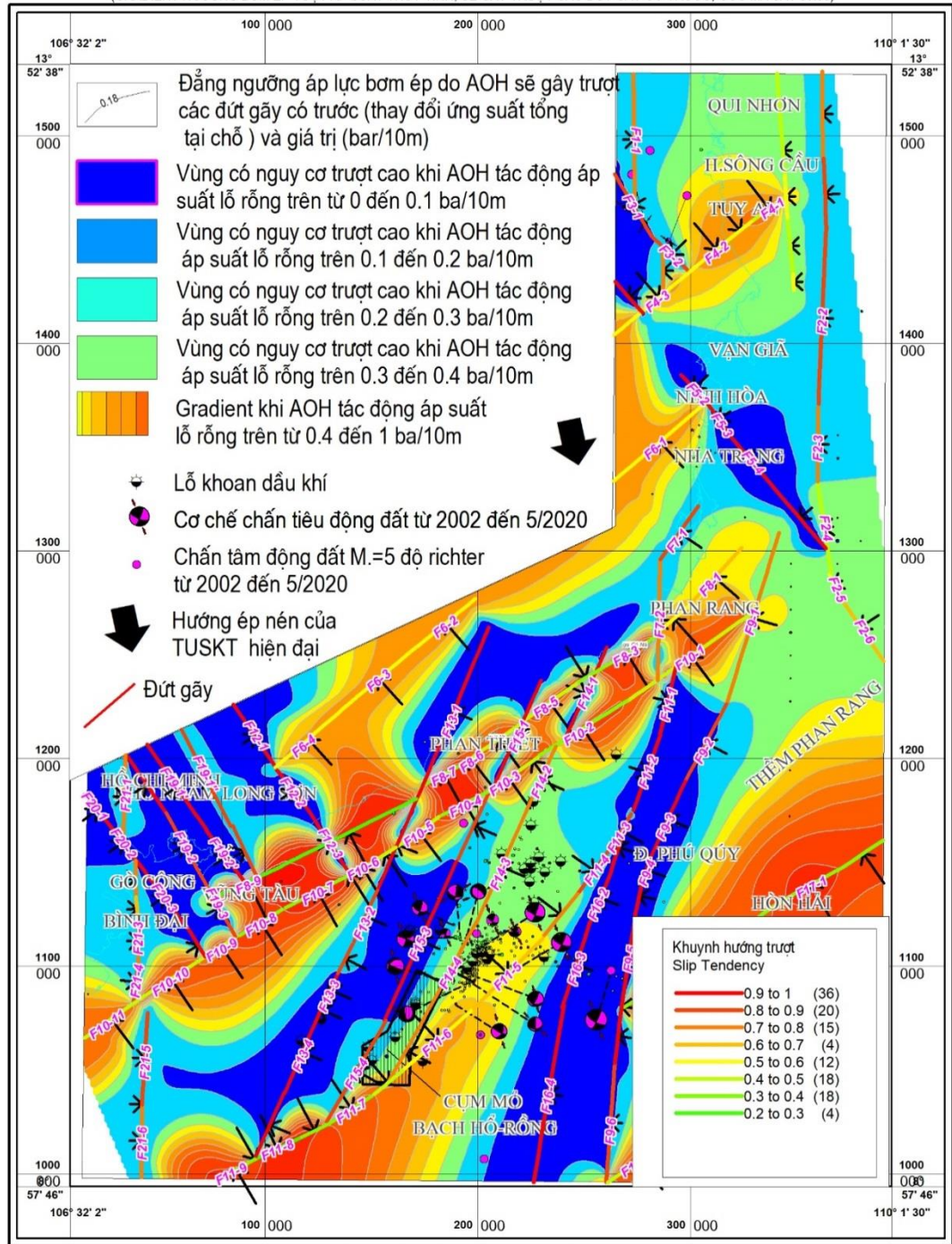


Hình 13a. Xu hướng dịch trượt và phân bố ứng suất do tác động bơm ép do khai thác dầu khí mỏ Bạch Hổ (gradient bơm ép (bar)/10m; trường hợp góc ma sát =28,56; độ sâu xét ở 4300m (các mũi tên hướng, độ dài lớn nhất là cường độ ứng suất pháp ứng với 105 Mpa, cũng chỉ dẫn cho hình 13b)

Hình 13b. Xu hướng dịch trượt và phân bố ứng suất do tác động bơm ép do khai thác dầu khí mỏ Bạch Hổ (gradient bơm ép (bar)/10m; trường hợp góc ma sát =30,96; độ sâu xét ở 4300m

**BẢN ĐỒ PHÂN BỐ ỨNG SUẤT DO TÁC ĐỘNG CỦA HOẠT ĐỘNG NHÂN SINH
VÙNG BIỂN TỪ TUY HÒA TỚI VÙNG TÀU VÀ LÂN CẬN**

(GRADIENT NGƯỠNG BƠM ÉP VƯỢT ÁP SUẤT THỦY TÍNH, SẼ GÂY TRƯỢT CÁC ĐỨT GỖ CÓ TRƯỚC; GÓC MA SÁT 30.96)



Hình 14. Xu hướng dịch trượt và phân bố ứng suất do tác động bơm ép hoạt động nhân sinh (gradient bơm ép bar/10m; trường hợp góc ma sát =30.96; mũi tên màu đen chỉ hướng và cường độ ứng suất pháp (123 Mpa/độ sâu 5km); F11-8: Số hiệu đoạn đứt gãy

Trong xây dựng, để giảm thiểu các hư hại và rủi ro cho các công trình ngầm, các công trình thường được xây dựng theo phương song song với trục ép nén cực tiểu khi xây dựng và vùng không có các đứt gãy có phương tối ưu, nguy cơ sinh trượt cao với trường ứng suất kiến tạo hiện đại. Trong công tác khai thác dầu khí nói chung và công tác gọi dòng sản phẩm nói riêng, việc nghiên cứu ứng suất hiện tại có ý nghĩa như một dữ liệu giúp cho các kỹ sư khai thác tiến hành công tác bơm mở vỉa, nứt vỉa thủy lực cũng như gọi dòng sản phẩm đạt hiệu suất cao hơn, hiệu quả hơn (gọi dòng sản phẩm theo hướng vuông góc với hướng của trục ứng suất ép nén cực đại). Giúp cảnh báo các áp suất và vị trí bơm ép phù hợp đối với công tác gia tăng hệ số thu hồi để không phát sinh dịch trượt đứt gãy gây sinh chấn lớn gây nguy hiểm cho giàn khoan. Xu hướng trượt của đứt gãy định hướng rất tốt cho việc tìm kiếm nước dưới đất trong khe nứt cho các vùng núi, vùng trung du.

Khuynh hướng trượt của đứt gãy cũng như khả năng trượt của chúng khi trạng thái ứng suất bị thay đổi do các hoạt động nhân sinh góp phần dự báo các tai biến địa chất và động đất kích thích (induced earthquake). Trên cơ sở đó, chúng ta có thể khoanh vùng các hoạt động có nguy cơ nhạy cảm cao với tác động của AOH, tiến hành đề xuất các biện pháp, kích bản phòng chống rủi ro một cách phù hợp như: định hướng thiết kế các công trình ngầm, điều tiết các hoạt động kinh tế khi động đất kích thích xảy ra; nâng cao nhận thức của cộng đồng dân cư về động đất nhân sinh và sóng thần.

Kết luận và khuyến nghị

1. Mặt đứt gãy khi có ứng suất cắt tác động dù rất nhỏ ($\#0$), bất kỳ đứt gãy nào đều có thể trượt nếu thỏa mãn hai điều kiện: 1- Áp suất lỗ rỗng $P_p \sim P_{crit}$, P_{crit} là áp suất lỗ rỗng tới hạn trượt cho các đứt gãy khác nhau là khác nhau, phụ thuộc vào hình thái của đứt gãy và trường ứng suất đang tác động, chi phối; Góc ma sát trượt phổ biến 28.56° , thay đổi bất thường trên 45° hoặc dưới 22.4° liên quan đến hoạt động khai thác dầu khí là chính nếu loại trừ thay đổi do đặc điểm địa chất xung quanh và nội tại nơi tiếp xúc mặt đứt gãy/mặt gián đoạn (mặt lớp, mặt phiến, mặt các dike, thậm chí mặt bất chỉnh hợp,...) của đứt gãy.

2. Hoạt động bơm ép có thể gây ra trượt các đứt gãy có trước ở mỏ Bạch Hổ và lân cận trong bán kính 25km, phù hợp với chùm động đất 315 trận từ 2002 đến 5/2020 với magnitude từ 1,5 đến 4,2 độ Richter. Với khoảng cách xa bờ ~ 180 km, và cường độ phát sinh khi trượt do AOH như vậy, cảm nhận trong đất liền là rất nhỏ, không ảnh hưởng đáng kể tới cộng đồng dân cư.

4. Các đứt gãy phương Đông Bắc – Tây Nam ($20-30^\circ$): đứt gãy Đông Bạch Hổ, đứt gãy Tây Bạch Hổ, đứt gãy Đông Phú Quý; một đoạn đứt gãy phương kinh tuyến 109 (ngoài khơi khu vực Tuy Hòa, Phú Yên); các đứt gãy phương Tây Bắc – Đông Nam như đứt gãy Sông Ba, đứt gãy Sông Cà Núi; đứt gãy Sông Sài Gòn, đứt gãy sông Vàm Cỏ Đông, đứt gãy Bình Long- Bình Châu là những xu hướng trượt cao ($T_s = 0.8$ đến 1.0) có nguy cơ phát sinh tai biến địa chất, hoạt động động đất thường xuyên hơn nhưng cũng là đới dẫn chứa nước, dẫn dầu, tối ưu hóa khai thác tài nguyên liên quan đến chất lỏng nói chung và dầu khí nói riêng, nếu bơm ép, phá hủy thủy lực không vượt quá gradient gia tăng áp suất bơm ép đề xuất nêu trên.

5. Khuyến nghị khi hoạt động bơm ép hoặc phá hủy thủy lực, thử vỉa giai đoạn thăm dò và khai thác tài nguyên, tránh các đứt gãy có khuynh hướng trượt cao $T_s = 0,7-1$ và áp lực bơm ép không vượt ngưỡng tới hạn gradient bơm ép từ 0.001 đến 1,3bar/10m (vượt ngưỡng áp suất thủy tĩnh tại độ sâu xem xét) đối với từng đứt gãy và vùng khác nhau là khác nhau. Sử dụng góc ma sát trung bình 28.56° cho thiết kế tối ưu hóa khai thác tài nguyên.

6. Một số vấn đề tồn tại còn cần tiếp tục nghiên cứu như sau: 1 - Việc dùng trục S_{Hmax} và S_{Hmin} so sánh góc cắm với của các trục P và T cơ chế chấn tiêu để đạt trạng thái ứng suất trung bình cần tiếp tục nghiên cứu; 2 - Hoạt động khai thác dầu khí cũng có thể ảnh hưởng đến khuynh hướng trượt của các đứt gãy.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này là một phần kết quả của đề tài KC.09.38/16-20 và đề tài mã số VAST06.02/20-21 (chương trình 7 hướng của Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam) được cấp kinh phí của Bộ Khoa học và Công nghệ, chúng tôi xin chân thành cảm ơn!

Văn liệu

Andrew Jay Michael. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. B1, Pages 357-368, January 10, 1987

Angelier, J., 1979. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics* 56, 17– 26.

Angelier, J. 1989. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of structural geology*, 11(1-2), 37-50

Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C., and Fisher, D., 2012. Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors. Cambridge, England, Cambridge University Press, 289pp

- A. Nouri Mokhoori et al, 2015.** The Movement potential evaluation of the North Tabriz Fault. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, vol 24, No 95 Spring 2015 (Tectonic)*
- Bui V. Duan, Nguyen A. Duong, 2017.** The relation between fault movement potential and seismic activity of major faults in Northwestern Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences, 39(3), 240-255*
- Byerlee JD.** Friction of rocks. *Pure Appl Geophys. 1978;116: 615–26.*
- Cát N. Hùng và nnk, 2009.** Báo cáo đề tài: “Phân vùng nhỏ động đất thành phố Hồ Chí Minh”. *Liên đoàn Bản đồ Địa chất miền Nam.*
- Cao Đ. Triều, Đỗ V. Lĩnh, Nguyễn Q. Dũng, Mai X. Bách, 2002.** Động đất Vũng Tàu ngày 25 tháng 8 năm 2002 và đặc trưng hoạt động động đất ven biển Nam Trung Bộ và Nam Bộ. *Tuyển tập báo cáo và tham luận, Công tác nghiên cứu cơ bản trong lĩnh vực Các Khoa học về Trái đất, TP Hồ Chí Minh, trang 220 – 234.*
- Cao Đ. Triều, 2019.** Sách “Biến dạng kiến tạo Biển Đông Việt Nam và vùng kế cận trong Kainozoi”. *Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội.*
- Cesca, S., Dahm, T., Juretzek, C. & Kuhn, D., 2011.** Rupture process of the Mw 4.3 Ekofisk induced earthquake, *Geophys. J. Int., 187(1), 407–413.*
- Dahm T., et al, 2013.** Recommendation for the discrimination of human-related and natural seismicity. *J Seismol (2013) 17:197–202.*
- Delvaux.D&Sperner.B., 2003.** *New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program.* The Geological Society of London, 75-100
- Dương Q. Hưng, Bùi N. Thanh, Nguyễn V. Lương, Nguyễn V. Điệp, 2013.** Trường ứng suất và các chuyển động hiện đại trong vỏ trái đất khu vực Đông Nam thềm lục địa Việt Nam. *Tạp chí các Khoa học về Trái đất, 35(1), 1-9.*
- Do V. Lĩnh, Vu D. Chinh, La T. Chich, 2008.** The Pliocen - Quaternary tectonic stress field in South Vietnam and its influence on deformation of Precenozoic basement of Cuu Long basin. *The 2-nd International Scientific Conference “Fracture Basement Reservoir” Petrovietnam, p.51-62.*
- Đỗ V. Lĩnh, 2010.** Lịch sử phát triển kiến tạo Kainozoi lãnh thổ Nam Trung Bộ và mối liên quan với động đất. *Luận án Tiến sĩ Địa chất, Đại học Quốc Gia Tp. Hồ Chí Minh, 160tr.*
- Đỗ V. Lĩnh, 2015.** Báo cáo tổng kết Dự án “Điều tra, đánh giá địa động lực hiện đại để hoàn thiện kịch bản biến đổi khí hậu và đề xuất các giải pháp thích ứng ở vùng đồng bằng Sông Cửu Long”. *Lưu trữ Tổng cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam, Hà Nội.*
- Đỗ V. Lĩnh, 2018.** Characteristic of structure and modern activity of Sai Gon river fault and implication for: the ground subsidence and flooding in Ho Chi Minh city area. *Hội thảo khoa học 15th GEOSEA 2018.*
- Đỗ V. Lĩnh, Thái B. Ngọc, Nguyễn L. Lộc, Nguyễn T. Sang, Vũ T. Tấn, Võ T. H. Quyên, 2020.** The determination of in-situ stress impacting on Field X by well logging data. *International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology (IJISSET). Volume: 6 Issue: 8 | 2020. www.ijisset.org*
- Gupta. H.K., 2002.** A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews 58 (2002) 279–310.*
- Hamideh Noroozpour et al, 2015.** Fault Movement Potentials in the Tehran-Semnan Region (North Iran). *Open Journal of Geology, 2015, 5, 281-290.*
- Hanks, T.C., Kanamori, H., 1979.** A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research 84, 2348–2350.*
- Hawkes CD, McLellan PJ, Bachu S, 2005.** Geomechanical factors affecting geological storage of CO₂ in depleted oil and gas reservoirs. *J Can Pet Technol.; 44:52–61.*
- Hengmao Tong, An Yin, 2011.** Reactivation tendency analysis: A theory for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state. *Tectonophysics 503 (2011) 195 - 200.*
- Heidbach, O., et al, 2018.** The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics 744 (2018) 484–498.*
- H. Mitsuishi, H. Okabe, S. Takagi, T. Uchiyama, Nguyễn V. Toàn, Phan N. Trung, Y. Ueda, Y. Kawahara, 2010.** Nghiên cứu ứng dụng bơm ép CO₂/HCG nhằm nâng cao hệ số thu hồi dầu ở Việt Nam. *Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học & Công nghệ quốc tế “Dầu khí Việt Nam 2010: Tăng tốc phát triển”.*

- Hyosung Co. Ltd, 2018.** LPG Underground Storage Project in Mined Rock Cavern in Cai Mep - Geological Investigation Report. *Hyosung Co. Ltd*
- Jaeger JC, Cook NGW.** Fundamentals of rock mechanics. London: *Methuen & Co., Ltd; 1969.*
- Jeanne L. Hardebeck and Andrew J. Michael, 2006.** Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. *Journal of Geophysical Research, Vol. 111, B11310, doi:10.1029/2005JB004144, 2006*
- Jonny Rutqvist, Frédéric Cappaa, Antonio P. Rinaldi, Maxime Godano, 2014.** Modeling of induced seismicity and ground vibrations associated with geologic CO₂ storage, and assessing their effects on surface structures and human perception. *International Journal of Greenhouse Gas Control 24 (2014) 64–77*
- John W. Gephart, Donald W. Forsyth, 1984.** An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence. *Journal of Geophysical Research Atmospheres 89:2177-2180*
- Katsushi Sato, 2016.** A computerized method to estimate friction coefficient from orientation distribution of meso-scale faults. *Journal of Structural Geology 89 (2016) 44e53*
- Kuang, Wenhuan, Zoback, M.D., and Zhang, J. 2017.** Estimating geomechanical parameters from microseismic plane focal mechanisms recorded during multi-stage hydraulic fracturing. *Geophysics 82(1): KS1–KS11, doi:10.1190/GEO2015-0691.1.*
- Langenbruch, C., and Zoback, M.D. 2016.** How will induced seismicity in Oklahoma respond to decreased saltwater injection rates? *Science Advances 2(11): e1601542–e1601542. doi:10.1126/sciadv.1601542.2.*
- Lee, C. F., Hou, J. J. & Ye, H., 1997-** The movement potential of the major faults in Hong Kong area, *Episodes, Vol. 20, No. 4. pp: 227. 231*
- Lê Đ. Lãng, Nguyễn M. Toàn, Dương H. Lương, Trần Đ. Thọ, 2010.** Một số nghiên cứu về nâng cao hệ số thu hồi dầu cho các mỏ Bạch Hổ và mỏ Rồng. *Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học & Công nghệ quốc tế “Dầu khí Việt Nam 2010: Tăng tốc phát triển”*
- Lê T. Sơn và nnk, 2008.** Chuỗi động đất biển Phan Thiết – Vũng Tàu năm 2005, *Viện Vật lý Địa cầu.*
- Linh Do V, Loc Nguyen L, Tan Vu T, Huy Nguyen X, Trang Nguyen T T, Tai Pham T.** Statistical Estimation of the frictional coefficients of faults based on a structural dataset in the Tuy Hoa – Vung Tau region, Viet Nam. *Journal of Earth Energy Engineering. No:012/EJP/JEEE/X/2020 (E-journal acceptance letter)*
- Loes Buijze et al., 2017.** Fault reactivation mechanisms and dynamic rupture modelling of depletion-induced seismic events in a Rotliegend gas reservoir. *Netherlands Journal of Geosciences, p - 131.*
- Means, W. D. 1989.** A construction for shear stress on a generally oriented plane. *Journal of Structural Geology, 11, 625-627*
- Morris A, Ferrill DA, Henderson DB, 1996.** Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology; 24:275–8.*
- Moeck Inga., et al., 2009.** Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir. *Journal of Structural Geology 31, 1174-1182.*
- Moeck Inga., et al., 2011.** Fault reactivation potential as a critical factor during reservoir stimulation. *First break volume 29, p. 67-74.*
- N. Barton, Choubey, 1976.** The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics 10, 1-54 (1977)*
- Nguyễn L. Lộc và nnk, 2020.** Nghiên cứu sự thay đổi ứng suất hiện đại khu vực ven biển Tuy Hòa – Vũng Tàu do tác động hoạt động khai thác dầu khí. *Tạp chí Địa chất, loạt A, số 369-370/2019, tr. 117-133.*
- Nguyen T. T. Binh, Tomochika Tokunaga, Hoang P. Son, Mai V. Binh., 2007.** Present-day stress and pore pressure fields in the Cuu Long and Nam Con Son Basins, offshore Vietnam. *Marine and Petroleum Geology 24 (2007) 607–615.*
- Nguyen T. T. Binh, Tomochika Tokunaga, Neil R. Goultly, Hoang P. Son, Mai V. Binh, 2011.** Stress state in the Cuu Long and Nam Con Son basins, offshore Vietnam. *Marine and Petroleum Geology 28, p.973-979*

- Nguyễn V. Hường, Phan T. Trịnh, Hoàng N. Đang, 2011.** Trạng thái ứng suất kiến tạo hiện đại khu vực bể Cửu Long, T.33, 3ĐB. *Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất*, 457-464.
- Nguyễn V. Lương, Bùi C. Quế, 1997.** Đặc điểm trường ứng suất kiến tạo khu vực Biển Đông và lân cận. *Tạp chí các Khoa học về Trái đất*, T.19(1), tr.30-38.
- Nguyen V. Vuong, Luong T. T. Hoai, 2019.** Cenozoic paleostress evolution in South Central Vietnam: Implication for changing dynamics of faulting along the eastern Indochina continental margin. *Journal of Asian Earth Sciences*, volume 185 (2019) 104006, page 1-22.
- Nguyễn T. Yên, 1996.** Các chế độ trường ứng suất kiến tạo Kainozoi ở lãnh thổ Việt Nam. *Tổng cục Địa chất*, 236: 1-6, Hà Nội.
- Phùng Đ. Thực, 2018.** Nghiên cứu, đề xuất các giải pháp công nghệ và kỹ thuật nâng cao hệ số thu hồi dầu giai đoạn cuối đối tượng móng mỏ Bạch Hổ - Kỳ II: Đánh giá hiệu quả của giải pháp duy trì áp suất vỉa, thực trạng khai thác của từng khu vực, tồn tại và nguyên nhân, *Tạp chí Dầu khí, Vietsovpetro*
- Phùng V. Phách và nnk, 2015.** Báo cáo “Nghiên cứu cấu trúc địa chất và tiến hóa Biển Đông phục vụ xác lập đường chủ quyền lãnh hải Việt Nam và dự báo tài nguyên năng lượng và khoáng sản”. *Đề tài KC.09.02/11-15. Lưu trữ Viện địa chất – Địa vật lý biển.*
- Phan T. Trịnh, 2012.** Kiến tạo trẻ và Địa động lực hiện đại vùng biển Việt Nam và kế cận. *NXB KHTN&CN*, 331p
- Phan T. Trinh, Nguyen V. Huong, Tran V. Phong, Mai T. Tan, Ngo V. Liem, 2019.** Recent tectonics and geodynamics in Southern Central VietNam. *15th GEOSEA 2018*
- Rangin C., et al., 1995.** Cenozoic deformation of Central and South Việt Nam. *Tectonophysics*, 251, 179 – 196.
- Ramsay, J. G, Lisle R, J, 2000.** Modern structural Geology, Volume 3: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology. *Academic Press, Lodon*, 560p.
- RocScience, 2013.** Phase2 8.0 Excavation & Support Design Software. *RockScience - Software tools for rock and soil.*
- Segall.P, Grasso J, Mossop A., 1994.** Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, Southwestern France. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. B8, Pages 15,423-15,438.
- Sibson, R. H., 1985.** A note on fault reactivation. *Journal of Structural Geology*. Vol. 7. No. 6, pp. 751 to 754, 1985
- Simpson, W.S. Leith and scholz C.H., 1988.** Two types of reservoir-induced seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, No. 6, pp. 2025-2040.
- Suckale., J.** Induced seismicity in hydrocarbon fields. *Advances in geophysics*, vol. 51, chapter 2. DOI: 10.1016/S0065-2687(09)05107-3.
- Thienen-Visser V K., et al., 2015.** Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments. *The Leading Edge*, June 2015. *Special Section: Injection-induced seismicity*
- Trần N. Huy, Mai V. Đur, Phạm Tiến, Nguyễn V. N. Lan, Nguyễn A. Đức, Nguyễn N. T. Huy, Mai T. Tâm, Phùng V. Hải, 2010.** Đánh giá khả năng áp dụng phương pháp nứt vỉa thủy lực để gia tăng hệ số thu hồi dầu trong tầng chứa Oligoxen (Hệ tầng Trà Tân dưới và Trà Cú) thuộc bể Cửu Long. *Tuyển tập báo cáo Hội nghị Khoa học & Công nghệ quốc tế “Dầu khí Việt Nam 2010: Tăng tốc phát triển”*
- Trần V. Trị và Vũ Khúc (đồng chủ biên), 2009.** Sách “Địa chất và Tài nguyên Việt Nam”. *Bộ Tài nguyên và Môi trường, Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam. NXB. Khoa học Tự nhiên và Công nghệ*, 589tr.
- Trinh X. Cuong, John K. Waren, Hoang V. Quy, Phan T. Co, 2018.** *Granitic fractured basement reservoir, Bach Ho oil field case study*, 15th GEOSEA 2018
- Vietsovpetro, 2013.** Nghiên cứu khảo sát ứng dụng phương pháp đánh dấu bằng chất chỉ thị nghiên cứu độ ngập nước các giếng tầng móng mỏ Bạch Hổ. *Thư viện Liên doanh Vietsovpetro.*
- Yohei Yukutake, Tetsuya Takeda, Akio Yoshida,** The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis. *Earth and Planetary Science Letters (2015)*, p. 188-198.
- Zhiqiang Fan et al., 2016.** Geomechanical analysis of fluid injection and seismic fault slip for the $M_w = 4.8$ Timpson, Texas, earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (2016)*, p. 2798 – 2812.

Zoback, M. D., Harjes H.p., 1997. Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany. *Journal of geophysical research*, vol. 102, No. b8, pages 18,477-18,491, August 10, 1997.

Zoback, M. D., 1982. In Situ Study of the Physical Mechanisms Controlling Induced Seismicity at Monticello Reservoir, South Carolina. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87, No. b8, pages 6959-6974, August 10, 1982.

Zoback, M. D., 2010. Reservoir geomechanics. *Cambridge University Press, Cambridge*

Zoback, M.D., Walsh, F.R., III, Sone, H., Kohli, A., Rassouli, F., Weingarten, M., and Xu, S. 2017. Assessing potential magnitudes of injection-induced seismicity. *Talk presented at Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, Davos, Switzerland, 15–17 March 2017.*

Zoback, Mark D., and Lund Snee, J.-E. 2018. Predicted and observed shear on pre-existing faults during hydraulic fracture stimulation. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 3588–3592.

Website

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/fmechanisms/>

<http://www.usgs.gov/science-explorer-results?es=active+fault>