

ژئومکانیک مخازن هیدرو کربوری

خواص دینامیکی سنگ

Dr. Hasan Ghasemzadeh

انتشار امواج عرضی در یک بعد

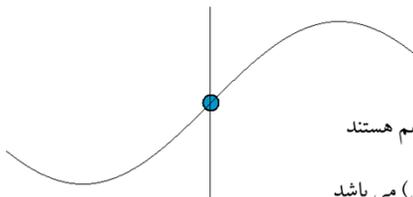
$$u_{tt} = c_s^2 u_{xx}$$

معادله یک بعدی انتشار موج پیچشی

$$c_s = \sqrt{G/\rho}$$

سرعت انتشار موج برشی یا پیچشی

سرعت موج برشی و سرعت ذرات بر هم عمودند
سرعت موج فقط تابع مشخصات مصالح می باشد



سرعت موج فشاری و سرعت ذرات هم جهت هستند
سرعت موج کششی و سرعت ذرات دارای جهت مخالف هم هستند
سرعت موج فقط تابع مشخصات مصالح می باشد
سرعت ذرات تابع مشخصات مصالح و شدت کرنش (یا تنش) می باشد

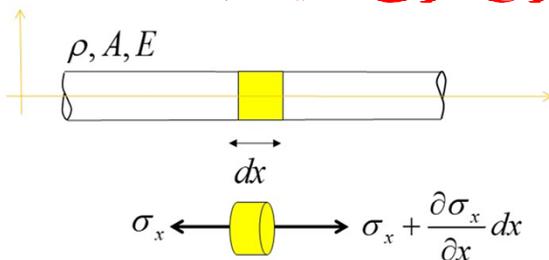
فهرست

- سرعت امواج فشاری و برشی در یک بعد
- سرعت امواج حجمی در سه بعد
- شکست موج
- اصلاحات روی موج دریافتی
- ناهمسانگردی

Dr. Hasan Ghasemzadeh

3

انتشار امواج طولی در یک بعد



میله الاستیک

$$\Sigma F_x = -\sigma_x A + \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) A = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx A$$

$$\text{قانون دوم نیوتن} \quad \Sigma F_x = m \ddot{u} = (\rho A dx) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\sigma_x = E \varepsilon_x = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

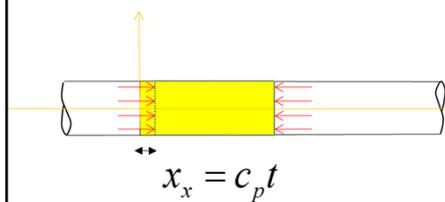
Dr. Hasan Ghasemzadeh

4

انتشار امواج طولی در یک بعد

$$u_{tt} = c_p^2 u_{xx} \quad \text{معادله موج یک بعدی}$$

$$c_p = \sqrt{E/\rho} \quad \text{سرعت انتشار موج (تنش) تابع مشخصات مصالح}$$



$$u = \epsilon x_x$$

$$u = \epsilon c_p t \Rightarrow du = \epsilon c_p dt$$

$$\frac{du}{dt} = \epsilon c_p$$

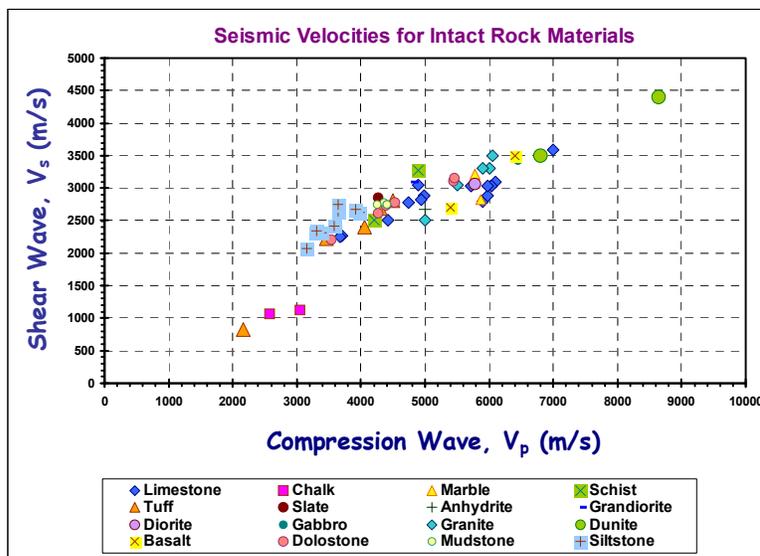
$$\dot{u} = \epsilon c_p \quad \text{سرعت ذرات}$$

تابع مشخصات مصالح و شدت تنش (یا کرنش)

Dr. Hasan Ghasemzadeh

5

Ultrasonic Velocities of Rocks



Dr. Hasan Ghasemzadeh

6

انتشار امواج در سه بعد

معادلات ساختاری

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$$

$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}$	$\frac{1}{2} \gamma_{xy} = \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right\}$
$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}$	$\frac{1}{2} \gamma_{yz} = \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right\}$
$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}$	$\frac{1}{2} \gamma_{zx} = \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right\}$

$\sigma = E\varepsilon$

$\sigma_{ij} = D_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3$

$\sigma_i = \overline{C}_{ij}\varepsilon_j$

قانون هوک

فرم اسکالر

فرم تانسوری

فرم ماتریسی

Dr. Hasan Ghasemzadeh 7

انتشار امواج در سه بعد

معادلات الاستودینامیک

معادلات ناویر با وجود شتاب

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x} + \mu \nabla^2 u_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial y} + \mu \nabla^2 u_y = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial z} + \mu \nabla^2 u_z = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 8

انتشار امواج در سه بعد

حل اول معادلات الاستودینامیک : موج فشاری

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2 \varepsilon_v = \rho \frac{\partial^2 \varepsilon_v}{\partial t^2}$$

$$c_p = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} = \sqrt{\frac{(K + \frac{4}{3}\mu)}{\rho}}$$

$$c_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad c_p = \sqrt{\frac{E_b}{\rho}}$$

$$\nu = 0 \Rightarrow E_b = E \Rightarrow c_p = c_{p1\text{dimensional}}$$

$$\nu > 0 \Rightarrow E_b > E \Rightarrow c_p > c_{p1\text{dimensional}}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

9

انتشار امواج در سه بعد

حل دوم معادلات الاستودینامیک : موج برشی

$$S \text{ wave} \quad \begin{aligned} \mu \nabla^2 \omega_{xy} &= \rho \frac{\partial^2 \omega_{xy}}{\partial t^2} \\ \mu \nabla^2 \omega_{yz} &= \rho \frac{\partial^2 \omega_{yz}}{\partial t^2} \\ \mu \nabla^2 \omega_{xz} &= \rho \frac{\partial^2 \omega_{xz}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

سرعت موج برشی در محیط سه بعدی با محیط یک بعدی برابر است

امواج برشی و فشاری در محیط سه بعدی منتشر می شوند

Dr. Hasan Ghasemzadeh

10

انتشار امواج در سه بعد

$$\frac{c_s}{c_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} < 1$$

رابطه سرعت امواج برشی و فشاری

با داشتن سرعت امواج برشی و فشاری ثوابت الاستیک خاک به راحتی محاسبه می شود

$$G = 0.5 \frac{(c_p / c_s)^2 - 2}{(c_p / c_s)^2 - 1}$$

سرعت امواج برشی و فشاری مستقل از فرکانس یا طول موج هستند (در حالت الاستیک)

روابط ثوابت الاستیک در حالت همسانگرد

Young's modulus, E	Poisson's ratio, σ	Bulk modulus, k	Shear modulus, μ	Lamé constant, λ	P-wave velocity, α	S-wave velocity, β	Velocity ratio, β/α
(E, σ)		$\frac{E}{3(1-2\sigma)}$	$\frac{E}{2(1+\sigma)}$	$\frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}$	$\left[\frac{E(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)\rho} \right]^{1/2}$	$\left[\frac{E}{2(1+\sigma)\rho} \right]^{1/2}$	$\left[\frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)} \right]^{1/2}$
(E, k)	$\frac{3k-E}{6k}$		$\frac{3kE}{9k-E}$	$3k \left(\frac{3k-E}{9k-E} \right)$	$\left[\frac{3k(3k+E)}{\rho(9k-E)} \right]^{1/2}$	$\left[\frac{3kE}{(9k-E)\rho} \right]^{1/2}$	$\left(\frac{E}{3k+E} \right)^{1/2}$
(E, μ)	$\frac{E-2\mu}{2\mu}$	$\frac{\mu E}{3(3\mu-E)}$		$\mu \left(\frac{E-2\mu}{3\mu-E} \right)$	$\left[\frac{\mu(4\mu-E)}{(3\mu-E)\rho} \right]^{1/2}$	$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$	$\left(\frac{3\mu-E}{4\mu-E} \right)^{1/2}$
(σ, k)	$3k(1-2\sigma)$		$\frac{3k(1-2\sigma)}{2(1+\sigma)}$	$3k \left(\frac{\sigma}{1+\sigma} \right)$	$\left[\frac{3k(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)} \right]^{1/2}$	$\left[\frac{3k(1-2\sigma)}{2\rho(1+\sigma)} \right]^{1/2}$	$\left[\frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)} \right]^{1/2}$
(σ, μ)	$2\mu(1+\sigma)$	$\frac{2\mu(1+\sigma)}{3(1-2\sigma)}$		$\mu \left(\frac{2\sigma}{1-2\sigma} \right)$	$\left[\left(\frac{2\mu}{\rho} \right) \left(\frac{1-\sigma}{1-2\sigma} \right) \right]^{1/2}$	$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$	$\left[\frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)} \right]^{1/2}$
(σ, λ)	$\lambda \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{\sigma}$	$\lambda \left(\frac{1+\sigma}{3\sigma} \right)$	$\lambda \left(\frac{1-2\sigma}{2\sigma} \right)$		$\left[\left(\frac{\lambda}{\rho\sigma} \right) (1-\sigma) \right]^{1/2}$	$\left[\frac{\lambda(1-2\sigma)}{\rho(2\sigma)} \right]^{1/2}$	$\left[\frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)} \right]^{1/2}$
(k, μ)	$\frac{9k\mu}{3k+\mu}$	$\frac{3k-2\mu}{2(3k+\mu)}$		$k-2\mu/3$	$\left(\frac{k+4\mu/3}{\rho} \right)^{1/2}$	$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$	$\left(\frac{\mu}{k+4\mu/3} \right)^{1/2}$
(k, λ)	$9k \left(\frac{k-\lambda}{3k-\lambda} \right)$	$\frac{\lambda}{3k-\lambda}$	$\frac{3}{2}(k-\lambda)$		$\left(\frac{3k-2\lambda}{\rho} \right)^{1/2}$	$\left[\frac{3(k-\lambda)}{2\rho} \right]^{1/2}$	$\left[\frac{1}{2} \left(\frac{k-\lambda}{k-2\lambda/3} \right) \right]^{1/2}$
(μ, λ)	$\mu \left(\frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \right)$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\lambda + \frac{2}{3}\mu$		$\left(\frac{\lambda+2\mu}{\rho} \right)^{1/2}$	$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$	$\left(\frac{\mu}{\lambda+2\mu} \right)^{1/2}$
(α, β)	$\rho\beta^2 \left(\frac{3\alpha^2-4\beta^2}{\alpha^2-\beta^2} \right)$	$\frac{\alpha^2-2\beta^2}{2(\alpha^2-\beta^2)}$	$\rho \left(\alpha^2 - \frac{4}{3}\beta^2 \right)$	$\rho\beta^2$	$\rho(\alpha^2-2\beta^2)$		



انتشار امواج در سه بعد

معادلات ساختاری

قانون هوک

$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3$

Robert Hooke
(1635-1703)

$\sigma = E \epsilon$

تانسور سختی ۸۱ مولفه دارد که با توجه به تقارن ذاتی تانسور تنش و کرنش تنها ۲۱ مولفه مستقل هستند. مولفه ها با سرعت موج قابل تعیین است.

Hooke's Law in Compliance Form

$\sigma_i = \overline{C}_{ij} \epsilon_j$

General Form:

$$\overline{C}_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{34} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix}, \quad V_{ij}^2 = \frac{C_{ij}}{\rho}$$

- Completely anisotropic medium with 21 elastic constants
- Monoclinic (one plane of material symmetry) with 13 independent elastic constants

Dr. Hasan Ghasemzadeh 13

ناهمسانگردی

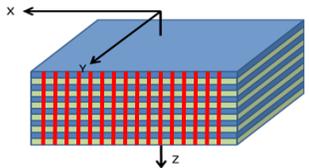
$\sigma_i = \overline{C}_{ij} \epsilon_j$

Orthotropic

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xz}}{E_x} & \frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

- Completely anisotropic medium with 21 elastic constants
- Monoclinic with 13 independent elastic constants

در حالت ماده ارتوتروپیک مثل چوب ۹ مولفه مستقل داریم




Anisotropy means that certain material properties (such as sound velocity, strain etc.) depends on the measurement direction.

Dr. Hasan Ghasemzadeh Utica Shale near Fort Plain, NY (Rygel, 2008) 14

ناهمسانگردی

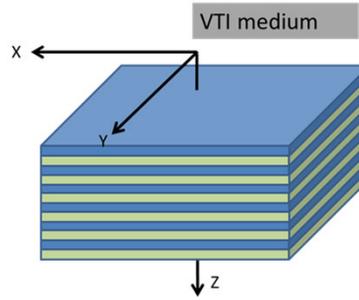
معادلات ساختاری

$$\sigma_i = \overline{C}_{ij} \varepsilon_j$$

Transverse Isotropic

در ایزوتروپیک عرضی مثل سنگهای رسوبی ۵ مولفه مستقل داریم

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2+2\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$



The origin of anisotropy is heterogeneity by some degree of structural order at a length scale much shorter than a wavelength.

Symmetry axis
TI medium

Dr. Hasan Ghasemzadeh

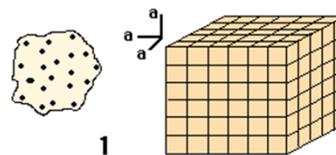
15

ماده همسانگرد

در ماده همسانگرد (ایزوتروپیک) مثل فولاد و دو مولفه مستقل داریم

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

isotropics



$$\overline{C}_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix}$$



$$V_p = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh

16

اصلاح جابجایی

Normal MoveOut (NMO)

$X_0 = R_0 = 0 \rightarrow \text{Wave travel time} = t_0$

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}$$

offset

$$x = X_i + R_i$$

v = velocity of the medium above the reflecting interface;

t_0 = travel time at zero offset, when the source and receiver are in the same place.

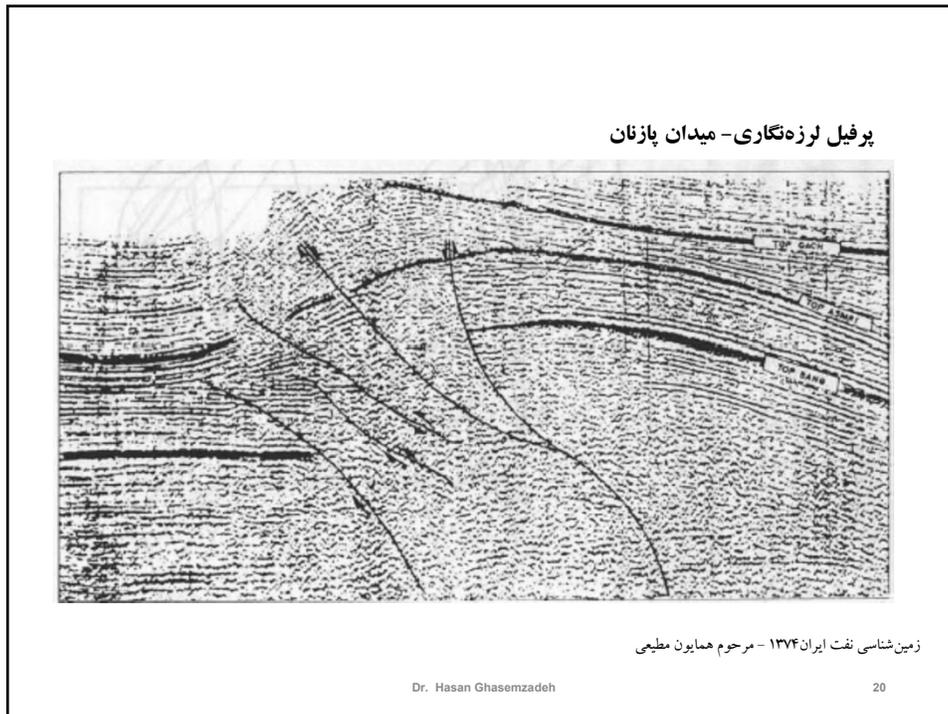
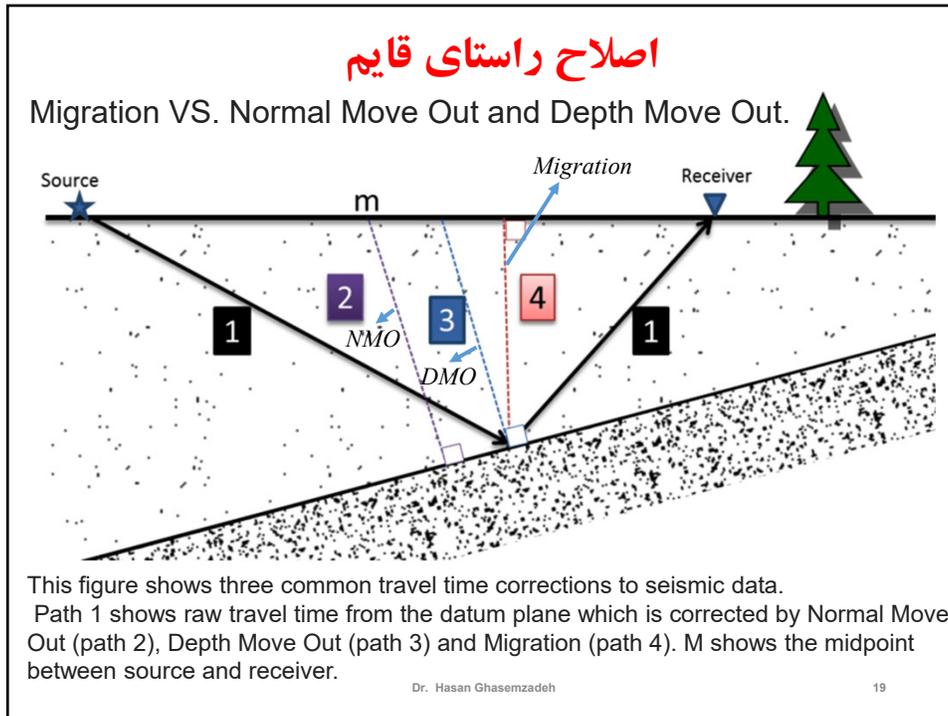
Dr. Hasan Ghasemzadeh 17

اصلاح شیب

Dip MoveOut (DMO)

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} - \frac{x^2 \sin^2 \theta}{v^2}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 18



شکست موج

انکسار و انعکاس موج

امپدانس محیط $Z = \rho v$

v سرعت موج
 ρ جرم حجمی سنگ

در صورت تفاوت امپدانس بین دو محیط باشد انعکاس موج را خواهیم داشت ضریب بازتاب در حالت قایم برابر است با

$$R_{refl} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

قانون اسنل

$$\frac{\sin(i_{inci})}{c_1} = \frac{\sin(i_{refl})}{c_1} = \frac{\sin(i_{refr})}{c_2}$$

Dr. Hasan Ghasemzadeh 21

شکست موج

سرعت موج در برخورد با یک محیط همسانگرد عرضی بسته به زاویه برخورد موج با محور تقارن (θ) تغییر می کند برای حالت ناهمسانگردی ضعیف:

$$c_p(\theta) \approx c_p(1 + \delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \varepsilon \sin^4 \theta)$$

$$c_{SV}(\theta) \approx c_s(1 + (c_p/c_s)^2(\varepsilon - \delta) \sin^2 \theta \cos^2 \theta)$$

$$c_{SH}(\theta) \approx c_s(1 + \gamma \sin^2 \theta)$$

Thomsen (1986)

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})}$$

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad \gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}}$$

$$c_p = \sqrt{C_{33}/\rho} \quad c_s = \sqrt{C_{44}/\rho}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{11} - 2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} - 2C_{66} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}$$

vertical transverse isotropic medium (VTI)

Dr. Hasan Ghasemzadeh

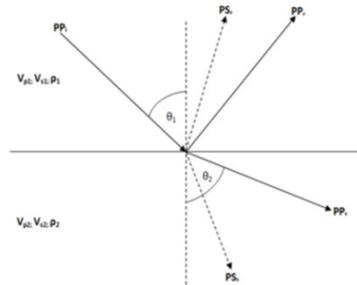
Amplitude Variation with Offset (AVO)

Zoeppritz 1919 derived four equations that determine the amplitudes of **reflected** and **refracted** waves at a planar interface for an incident P-wave as a function of the angle of incidence and six independent elastic parameters.

Zoeppritz equations

$$\begin{bmatrix} R_P \\ R_S \\ T_P \\ T_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}} \cos \phi_1 & \frac{V_{P1}}{V_{P2}} \sin \theta_2 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}} \cos \phi_2 \\ \cos \theta_1 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}} \sin \phi_1 & \frac{V_{P1}}{V_{P2}} \cos \theta_2 & -\frac{V_{P1}}{V_{S1}} \sin \phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & -\frac{V_{P1}^2}{V_{S1}^2} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{S2}^2 V_{P1}^2}{\rho_1 V_{S1}^2 V_{P2}^2} \sin 2\theta_1 & \frac{\rho_2 V_{P1}^2}{\rho_1 V_{S1}^2} \cos 2\phi_2 \\ -\cos 2\phi_1 & -\sin 2\phi_1 & \frac{\rho_2}{\rho_1} \cos 2\phi_2 & -\frac{\rho_2}{\rho_1} \sin 2\phi_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ \cos 2\phi_1 \end{bmatrix}$$

$R_P, R_S, T_P,$ and $T_S,$ are the reflected P, reflected S, transmitted P, and transmitted S-wave amplitude coefficients, respectively.



Dr. Hasan Ghasemzadeh

Amplitude Variation with Offset (AVO)

Ostrander(1980) was the first to introduce a practical application of the AVO effect, showing that a gas sand underlying a **shale exhibited amplitude variation with offset.**

Shuey (1985): Poisson's ratio was the elastic property most directly related to the angular dependence of the reflection coefficient

$$R(\theta) = R(0) + G \sin^2 \theta + F (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta)$$

$$R(0) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)$$

$$G = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} - 2 \frac{\Delta V_s^2}{V_p^2} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + 2 \frac{\Delta V_s}{V_s} \right); F = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p}$$

G, referred to as the AVO gradient

F, describes the behaviour at large angles/far offsets that are close to the critical angle

Shuey Approximation for angle of incidence is less than 30 degrees

$$R(\theta) = R(0) + G \sin^2 \theta$$

- θ angle of incidence;
- V_p P-wave velocity in medium
- ΔV_p P-wave velocity contrast across interface;
- V_s S-wave velocity in edium;
- ΔV_s S-wave velocity contrast across interface
- ρ density in medium;
- $\Delta \rho$ density contrast across interface

Dr. Hasan Ghasemzadeh

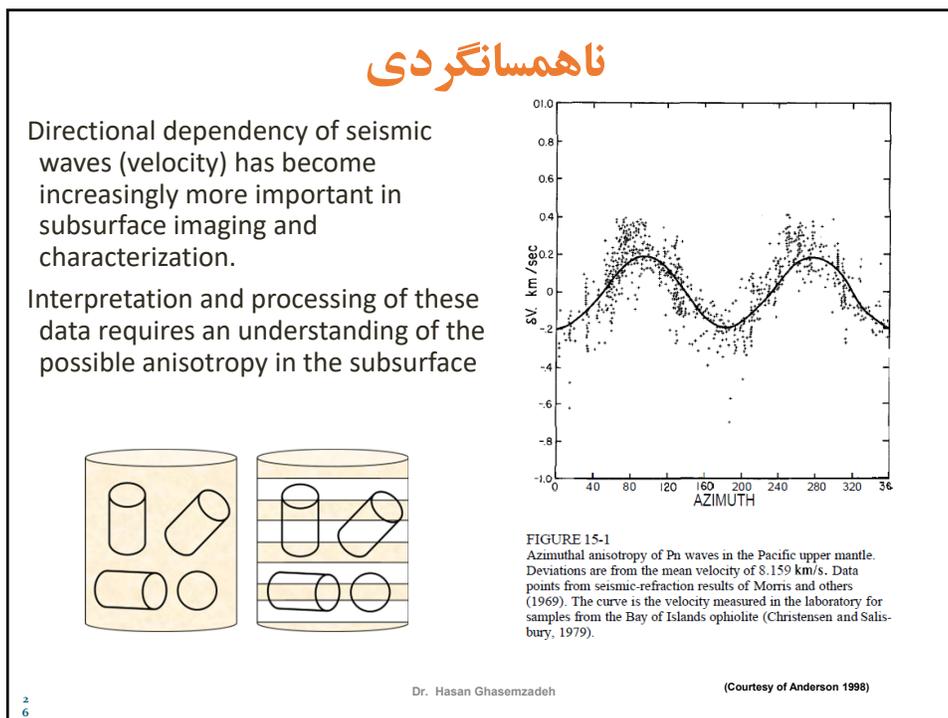
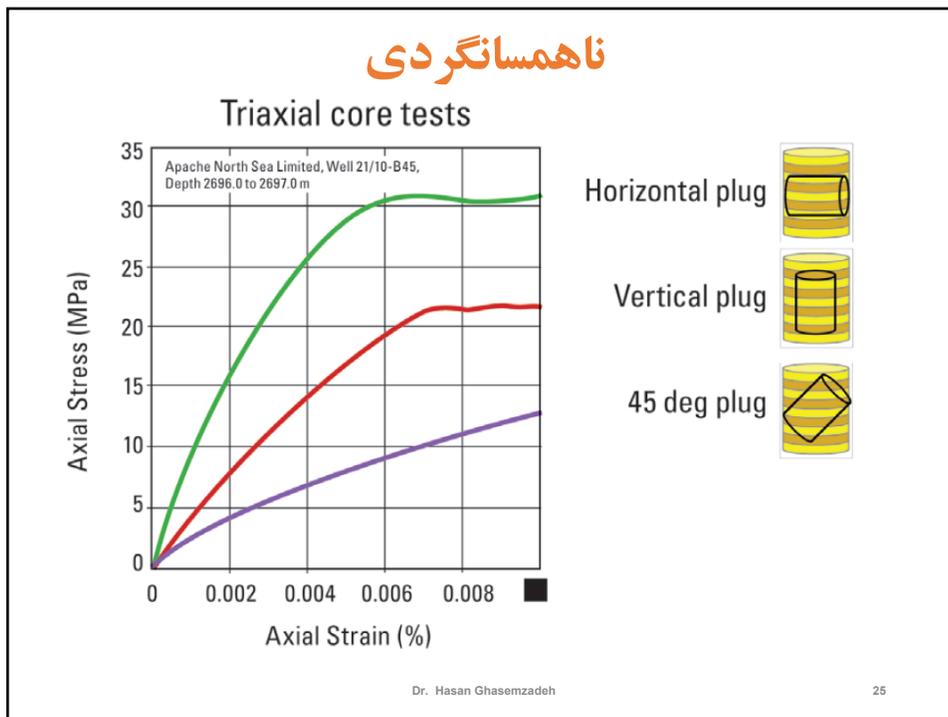


FIGURE 15-1
Azimuthal anisotropy of Pn waves in the Pacific upper mantle. Deviations are from the mean velocity of 8.159 km/s. Data points from seismic-refraction results of Morris and others (1969). The curve is the velocity measured in the laboratory for samples from the Bay of Islands ophiolite (Christensen and Salisbury, 1979).

ناهمسانگردی

Cause of anisotropy

Dr. Hasan Ghasemzadeh 27

ناهمسانگردی

Cause of anisotropy

Inherent or Lithological anisotropy

- Alignment within crystals
- Alignment of clay particles
- Laminations
- Beds

Stress-Induced anisotropy

- Anisotropic stress
- Alignment of cracks and fractures

Unstressed

Stressed

(Armstrong et al. 1994)

Dr. Hasan Ghasemzadeh

Anisotropic effects

- ❑ Well log measurements in deviated wells
 - Different velocities for same rock in wells with different deviations



Petrophysics

- ❑ Seismic wave propagation
 - Require extension to NMO correction
 - Require extension to migration algorithms



Seismic processing

- ❑ Reflectivity: reflectivity variation with angle changes compared with isotropic rocks



AVO analysis and seismic characterization

- ❑ Formation strength is strongly affected by the orientation of weak planes to the axis of loading



Geomechanics

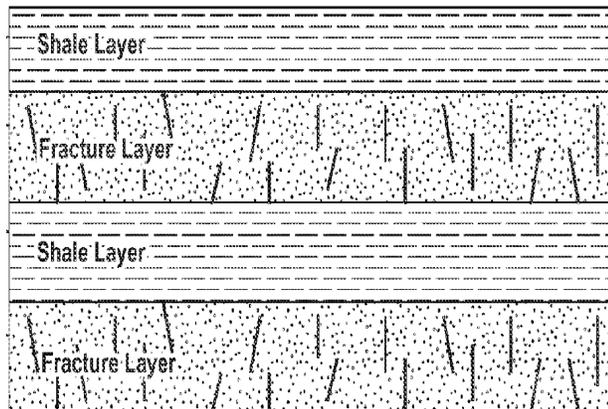
2

Dr. Hasan Ghasemzadeh

9

ناهمسانگردی

Transverse isotropic medium (TI)



TI medium as the closest description of sedimentary rock.

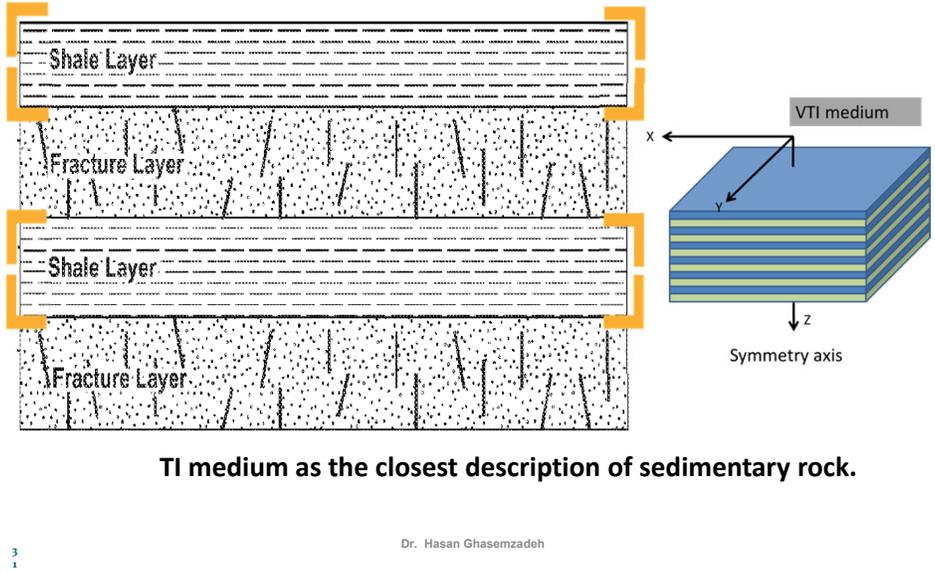
3

Dr. Hasan Ghasemzadeh

0

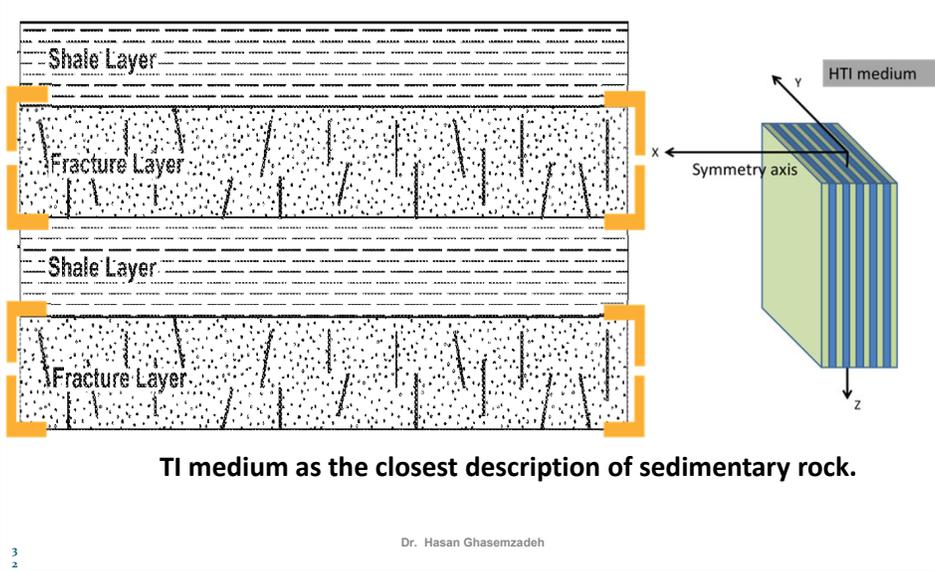
ناهمسانگردی

Transverse isotropic medium (TI)



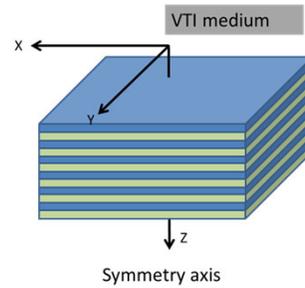
ناهمسانگردی

Transverse isotropic medium (TI)



Stiffness tensor get more complex with 5 independent members:

$$\overline{C}_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$



vertical transverse isotropic medium (VTI)

Dr. Hasan Ghasemzadeh

3

These parameters can be calculated in Laboratories by measuring velocities in different directions:

$$C_{11} = \rho V_{p90}^2$$

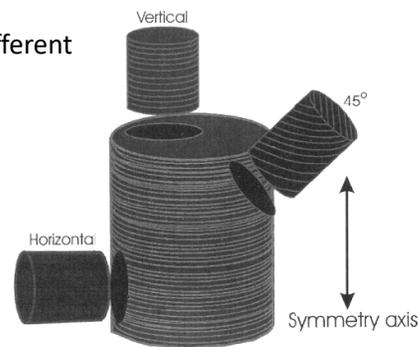
$$C_{12} = C_{11} - 2\rho V_{sh90}^2$$

$$C_{33} = \rho V_{p0}^2$$

$$C_{44} = \rho V_{sh0}^2$$

$$C_{13} = -C_{44} + \sqrt{4\rho^2 V_{p45}^4 - 2\rho V_{p45}^2 (C_{11} + C_{33} + 2C_{44}) + (C_{11} + C_{44})(C_{33} + C_{44})}$$

$$C_{66} = 0.5(C_{11} - C_{12}) = \rho V_{sh90}^2$$

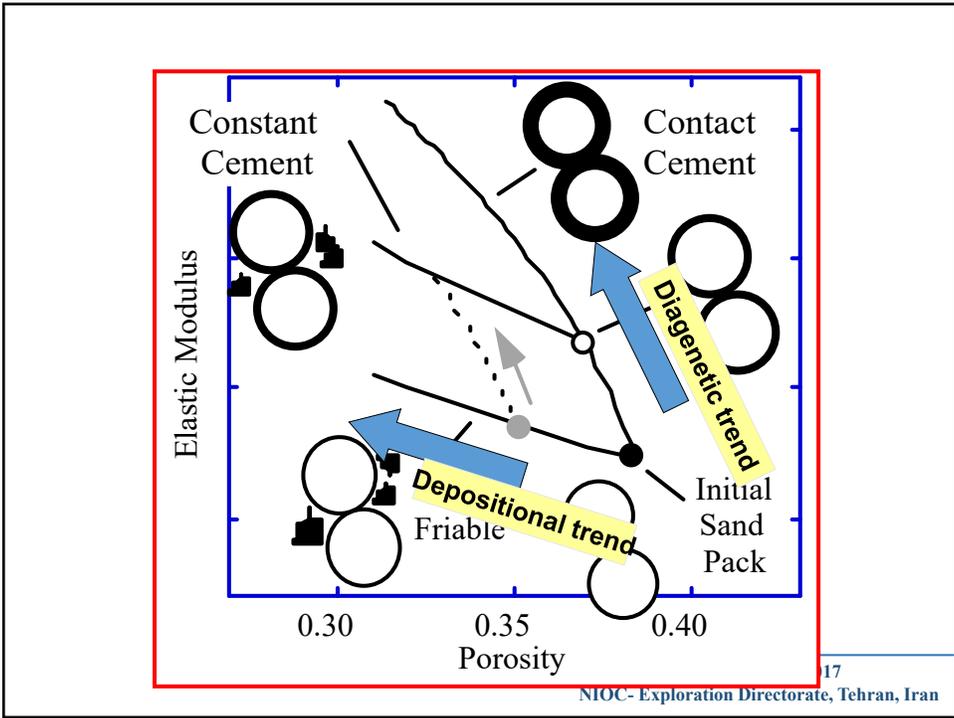
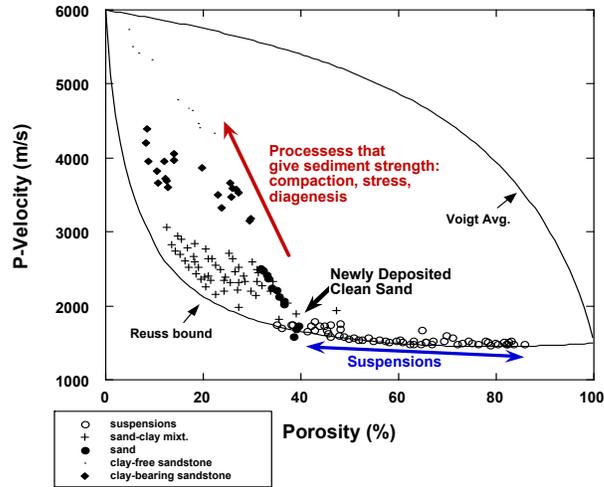


Dr. Hasan Ghasemzadeh

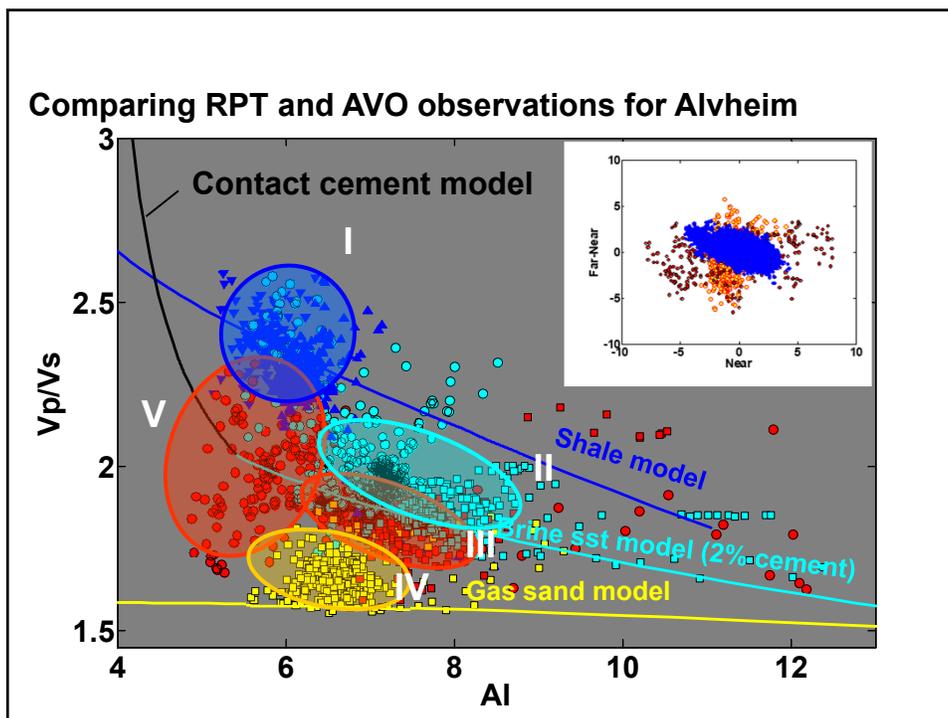
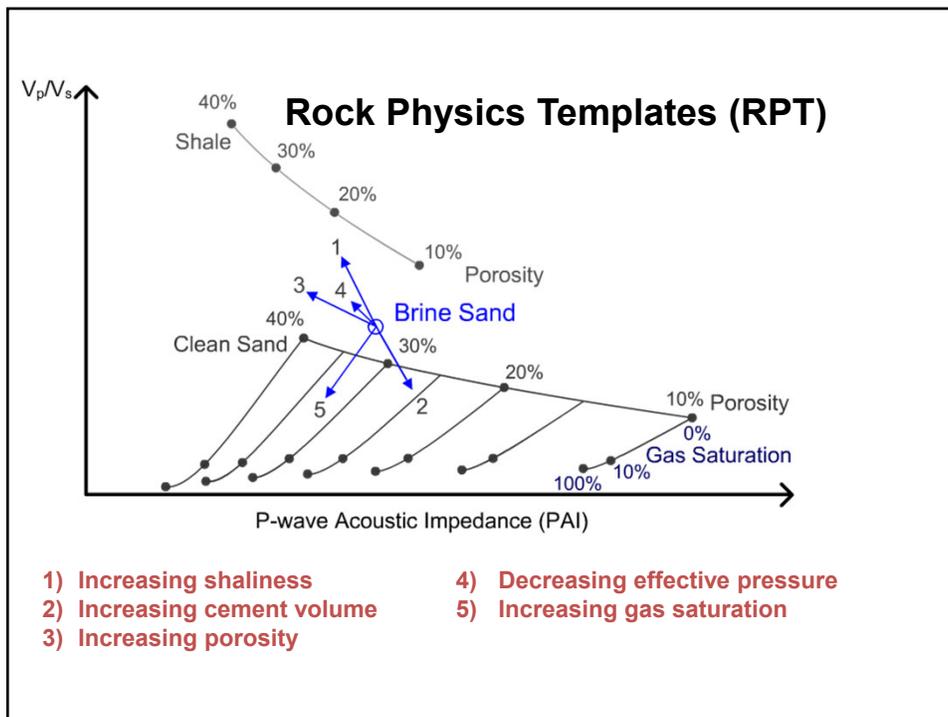
3

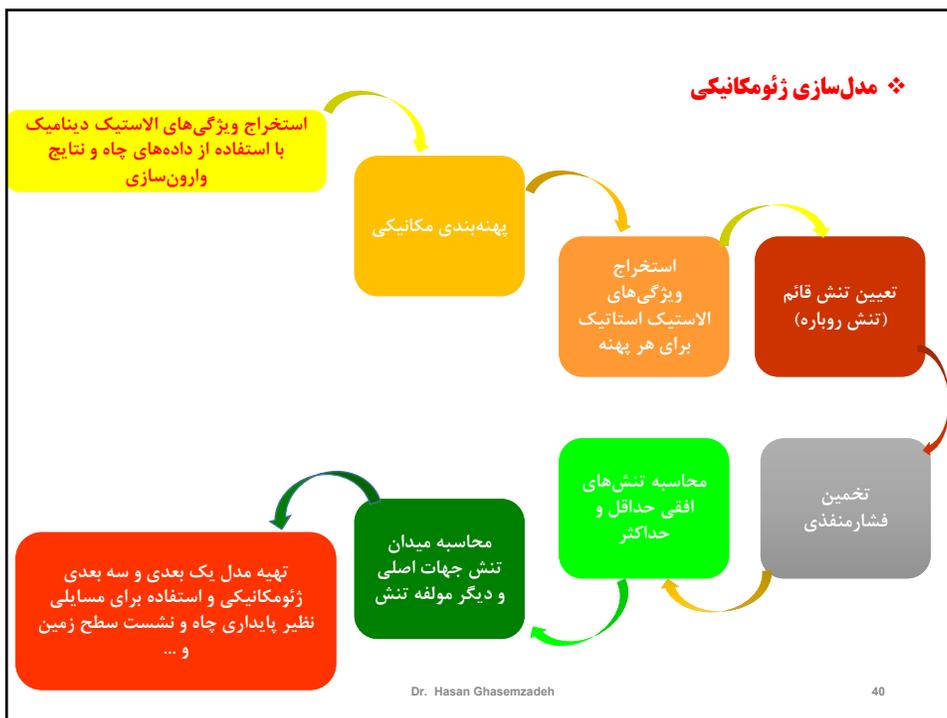
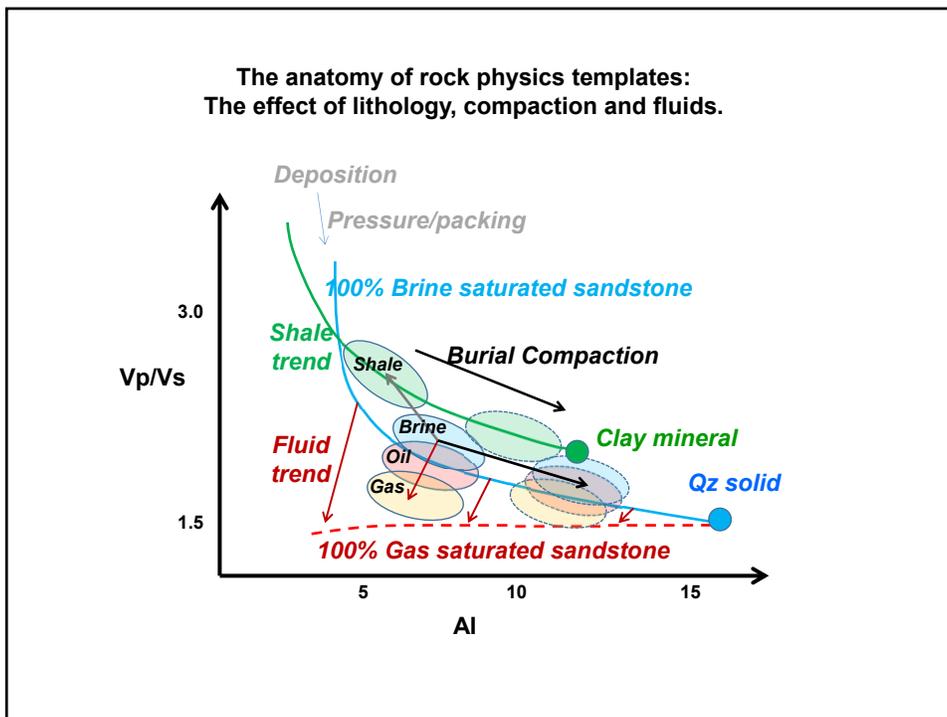
4

Rock physics and geological processes



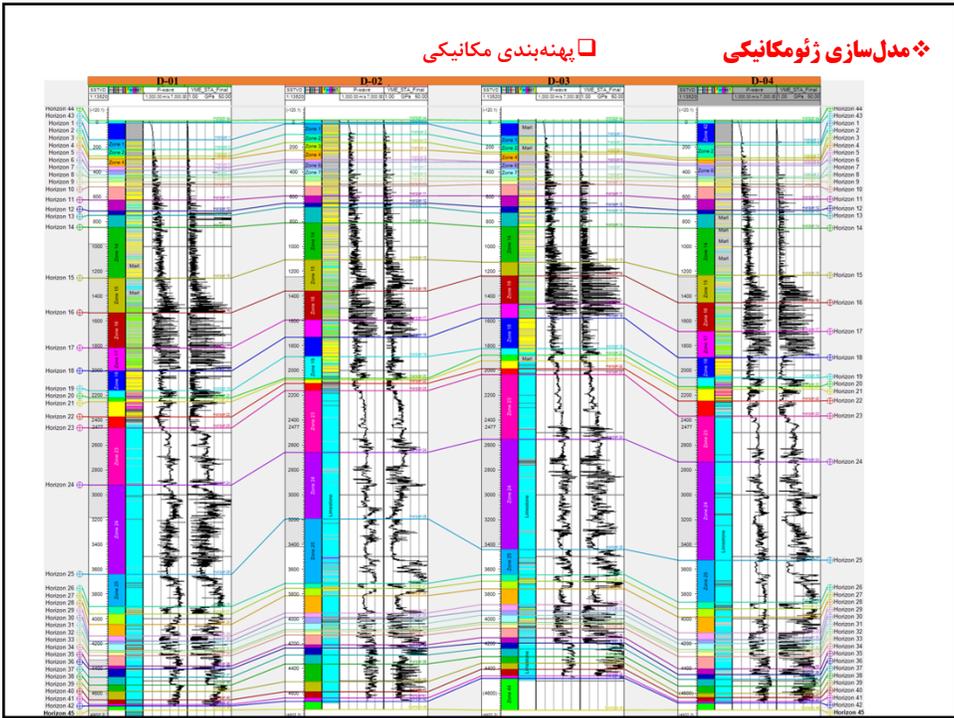
17
NIOC- Exploration Directorate, Tehran, Iran





❖ مدل سازی ژئومکانیکی
 □ برآورد ویژگی های الاستیک دینامیک با استفاده از داده های چاه و نتایج وارون سازی

پارامتر	واحد	رابطه برحسب DT	رابطه برحسب سرعت امواج صوتی
نسبت پواسون	-	$\frac{1}{2} \left(\frac{DTS}{DTC} \right)^2 - 1$ $\left(\frac{DTS}{DTC} \right)^2 - 1$	$V_D = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2V_P^2 - 2V_S^2} = \frac{(V_P/V_S)^2 - 2}{2(V_P/V_S)^2 - 2}$
مدول یانگ	Psi & Pa	$2\mu(1+\nu)$	$E_D = \rho \times V_S^2 \times \frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{V_P^2 - V_S^2}$
مدول برشی	Psi & Pa	$\frac{\rho_b}{(DTS)^2} \times V_P^*$	$\mu_D = \rho \times V_S^2$
مدول حجمی	Psi & Pa	$\rho_b \left(\frac{1}{(DTC)^2} - \frac{4}{3(DTS)^2} \right)$	$K_D = \rho \left(V_P^2 - \left(\frac{4}{3} \right) V_S^2 \right)$



❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ استخراج ویژگی های الاستیک استاتیکی برای هر پهنه

روابط موجود برای استخراج پارامتر E استاتیکی در ایران

رابطه بر حسب (GPa)	نوع سنگ	مرجع
$E_D = 0.845E_S + 18.5$	سنگ آهک (سد سیمره)	(واحدی، ۱۳۸۰)
$E_D = 1.1714E_S + 30.475$	سنگ آهک نکا	(فولادچی، 1385, et al.)
$E_D = 0.969E_S + 32.73$	آهک دولومیتی (سد رودبار)	(زارعی & داودی جاجرم، ۱۳۸۸)
$E_S = 0.581 E_D + 4.71$	آهک و آهک مارنی (سد بافت)	(صالحی، ۱۳۸۹)
$E_S = 1.082E_D - 13.04$	سنگ های مختلف	(کریم نژاد، ۱۳۹۲)
$E_D = 100751 \exp(757710E_S)$ $E_D = 95.8E_S$	آبرفت های شهر قم	(نجیبی، 1390, et al.)
$E_S = 0.014E_D^{1.96}$	سنگ آهک (مناطق نفتی جنوب)	(Najjibi et al., 2015)
$E_S = 0.0811E_D^{1.491}$	سنگ آهک (سازند آسماری)	(دارای & زارع، ۱۳۹۷)

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ استخراج ویژگی های الاستیک استاتیکی برای هر پهنه

روابط بین پارامترهای الاستیکی دینامیکی و استاتیکی خارج از ایران

رابطه بر حسب (GPa)	نوع سنگ	مرجع
$E_S = aE_D$	سنگ های مختلف	(b Heerden, 1987)
$E_S = 0.74E_D - 0.82$	انواع سنگ های رسوبی	(Eissa & Kazi, 1988)
$\log_{10}(E_S) = 0.02 + 0.7 \log_{10}(E_D)$	انواع سنگ های رسوبی	(Eissa & Kazi, 1988)
$E_S = 0.076V_p^{2.23}$	شیل	(Horsrud, 2001)
$E_S = 0.0158E_D^{2.74}$	شیل	(Ohen, 2003)
$E_S = 0.018E_D^2 + 0.422E_D$	ماسه سنگ، شیل، دولومیت، آهک	(Lacy, 1997)
$E_S = 1.15E_D - 15.2$	سنگ سخت ($E_D > 15 \text{GPa}$)	(Nur & Wang, 1989)
$E_S = 0.77E_D + 5.85$	سنگ های مختلف	(Mocková & Pandula, 2003)
$E_S = 0.541E_D + 12.852$	سنگ آهک	(Ameen et al., 2009)
$E_S = 0.564E_D - 3.4941$	ماسه سنگ	(Fei et al., 2016)
$\log E_S = 2.137 + 0.6612 * \log E_D$ (Porosity 10%–15%) $\log E_S = 1.829 + 0.6920 * \log E_D$ (Porosity 15%–25%) $\log E_S = -0.4575 + 0.9404 * \log E_D$ (Porosity > 25%) Unit of E_S and E_D : psi	-	(Morales & Marcinew, 1993)
$E_s = 0.0018 \times E_D^{2.7}$	-	(Bradford et al., 1998)
$V_s = V_p \times \text{multiplier}$	-	-
$M_s = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)}$, and $K_s = \frac{E_s}{3(1+2\nu_s)}$	-	-

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ استخراج ویژگی های الاستیک استاتیک برای هر پهنه

روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک محوره و سایر خواص فیزیکی در سنگ آهک و دولومیت

رابطه برحسب (MPa)	نوع سنگ	مرجع
$UCS = (122.11 * E_s) / (39.37 + E_s)$	رسوبی	(Moradian & Behnia, 2009)
$UCS = 12.8 * (E_D / 10)^{1.32}$	رسوبی	(Najibi et al., 2015)
$USC = 13.8E^{0.51}$	سنگ آهک با $10 < UCS < 300$ MPa	(Chang et al., 2006)
$USC = 25.1E^{0.34}$	دولومیت با $60 < UCS < 100$ MPa	(Chang et al., 2006)
$\sigma_c = (2.280) + (4.1089 * E_s)$	Unit: MPa, E: GPa	(Bradford et al., 1998)
$USC = 143.8 \exp(-6.95 \phi)$	تخلخل کم تا متوسط ($0.05 < \phi < 0.2$) و مقاومت بالا UCS ($30 < UCS < 150$ MPa)	(Chang et al., 2006)
$USC = 135.9 \exp(-4.8 \phi)$	تخلخل کم تا متوسط ($0 < \phi < 0.2$) و مقاومت بالا ($10 < UCS < 300$ MPa)	(Chang et al., 2006)
$\sigma_c = 276 \times (1 - (3 \times \phi))^2$	کانسار کورویچف روسیه	(Rzhevskii'ui, 1971)

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ استخراج ویژگی های الاستیک استاتیک برای هر پهنه

روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک محوره و سایر خواص فیزیکی در شیل

رابطه برحسب (MPa)	نوع سنگ	مرجع
$\sigma_c = 0.77 \left(\frac{304.8}{DTC} \right)^{2.53}$	بیشتر شیل های ترسیری با تخلخل بالا	(Horsrud, 2001)
$USC = 7.97 E_s^{0.91}$	بیشتر شیل های ترسیری با تخلخل بالا	(Horsrud, 2001)
$USC = 1.001 \phi^{-1.143}$	شیل های با تخلخل پایین ($0.1 < \phi$) و مقاومت بالا (~79 MPa)	(Lashkaripour & Dusseault, 2020)
$USC = 2.922 \phi^{-0.96}$	بیشتر شیل های ترسیری با تخلخل بالا	(Horsrud, 2001)
$USC = 0.286 \phi^{-1.762}$	شیل های با تخلخل بالا ($\phi > 0.27$)	
$USC = 0.0084 E_s$	رسوبی (ماسه سنگ)	(Malik & Rashid, 1997)
$USC = 0.0073 E_s$	رسوبی (سیلت سنگ)	(Malik & Rashid, 1997)
$USC = 0.0072 E_s$	رسوبی (رس سنگ)	(Malik & Rashid, 1997)
$USC = 2.28 + 4.0189 E_s$	سنگ های نرم	(Bradford et al., 1998)
$USC = -2.135 \phi^2 + 28.74 \phi + 18.82$	رسوبی (سیلت سنگ)	(Yaşar et al., 2010)
$USC = -0.663 \phi^2 + 9.648 \phi + 21.01$	رسوبی (گل سنگ)	(Yaşar et al., 2010)
USC or $\sigma_c = 0.0866 \times \frac{E_D}{\mu_D} \times (0.008^{V_{shale}} + 0.0045(1 - V_{shale}))$ $\mu_D = \frac{1}{K_D}$	شیل	(Coates & Denoo, 1981)
$USC = 7.22 E_s^{0.712}$	شیل های مقاوم و متراکم	(Chang et al., 2006)
$TSTR$ or $\sigma_T = \sigma_c \times multiplier$	$multiplier = 0.1$	

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ استخراج ویژگی‌های الاستیک استاتیک برای هر پهنه
روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و سایر خواص فیزیکی در ماسه‌سنگ

رابطه بر حسب (MPa)	نوع سنگ	مرجع
$USC=46.2exp(0.027E)$	-	(Chang et al., 2006)
$USC=2.28+4.1089E$	-	Bradford et al.,) (1998)
$USC=254(1-2.7\phi)^2$	ماسه‌سنگ‌های بسیار تمیز، متراکم $\phi < 0.3$	(Vernik et al., 1993)
$USC=277exp(-10\phi)$	ماسه‌سنگ $2 < UCS < 360$ MPa و $< 0.002\phi < 0.33$	(Chang et al., 2006)
$USC=-2.270\phi^2+33.88\phi+16.30$	رسوبی (ماسه‌سنگ)	(Yaşar et al., 2010)

روابط تجربی بین زاویه اصطکاک داخلی و سایر خصوصیات

رابطه بر حسب (درجه)	نوع سنگ	مرجع
$\phi = \sin^{-1}((V_p-1000)/(V_p+1000))$	شیل	(Lal, 1999)
$\phi = 57.8 - 105\phi$	ماسه‌سنگ	(Weingarten & Perkins, 1995)
$\phi = \tan^{-1}(((GR-GR_{sand})\mu_{shale} + (GR_{shale}-GR)\mu_{sand}) / (GR_{shale}-GR_{sand}))$	سنگ‌های رسوبی شیل‌دار	(Aladejare et al., 2021)
$\phi = 26.5 - 37.4 \times (1 - \phi - V_{shale}) + 62.1 \times (1 - \phi - 2 V_{shale})^2$		(Aladejare et al., 2021)
$\phi = (58) - (135 \times \phi)$		(Weingarten & Perkins, 1995)

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ محاسبه تنش قائم و فشار منفذی

• تنش روباره

$$\sigma_v = \int_0^z \rho g z dz = \bar{\rho} g z$$

σ_v تنش روباره، ρ جرم حجمی متوسط سازند، g شتاب گرانش زمین و z عمق است.

• فشار منفذی نرمال

$$P_H = P_0 + \chi(z - z_0)$$

در رابطه فشار منفذی نرمال، P_0 فشار رفرنس در عمق عمودی واقعی بر حسب psi، χ گرادیان فشار (معمولا بر حسب psi/ft) است. z_0 عمق عمودی واقعی بر حسب فوت و z عمق واقعی عمودی مرجع (معمولا بر حسب psi) بر حسب فوت است.

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

• فشار منفذی

○ رابطه ایتون

$$\text{Velocity-base: } P_p = P_{ov} - (P_{ov} - P_H) \left(\frac{V_n}{(V_i)_{or} (V_{Log})} \right)^k, \text{ sandstone } k=3$$

$$\text{Resistivity-base: } P_p = P_{ov} - (P_{ov} - P_H) \left(\frac{(R_{Log})}{(R_n)} \right)^k, \text{ sandstone } k=1.2$$

P_H فشار هیدرو استاتیک در عمق مورد نظر

P_{ov} فشار روباره

P_p فشار منفذی برآورد شده

V_n سرعت عمودی برای افق شیلی با روند تراکم نرمال

V_i سرعت بازه ای

t_1 و t_2 زمان سفر پرتور یک و دو

V_{rms1} و V_{rms2} سرعت مربع میانگین ریشه

$$V_i = \sqrt{(t_2 V_{rms2}^2 - t_1 V_{rms1}^2) / (t_2 - t_1)}$$

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

• فشار منفذی

○ رابطه باورز- مناسب برای سنگهای کربناته

$$V = V_0 + AP_{ef}^B$$

$$V = V_0 + A \left(\frac{P_{ef}}{P_{ef-max}^{1-u}} \right)^B,$$

$$P_{ef-max} = \left(\frac{V_{max} - V_0}{A} \right)^{\frac{1}{B}}.$$

تصحیح برای فرایند باربرداری

حداکثر فشار مؤثر برای شروع باربرداری

V_0 میزان سرعت در رسوبات نامتراکم و اشباع از سیال

P_{ef} فشار مؤثر

A, B ضرایب کنترل کننده تغییرات سرعت در نتیجه افزایش فشار مؤثر

u ثابت باربرداری

V_{max} حداکثر سرعت مشاهده ای

$$\bullet \text{ گرادیان شکست } FG = CSR \times (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p$$

FG گرادیان شکست، P_p فشار منفذی، α ضریب بیو، CSR نسبت تنش (تنش مؤثر افقی بر تنش مؤثر عمودی) است.

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ محاسبه تنش های افقی و پایداری چاه

• معادلات پوروالاستیک برای محاسبه تنش های افقی

$$\sigma_h = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v \right) + \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p \right) + \left(\frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_x \right) + \left(\frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \right),$$

$$\varepsilon_x = \left(\frac{\nu \sigma_v}{E} \right) \left(\frac{1}{1-\nu} - 1 \right),$$

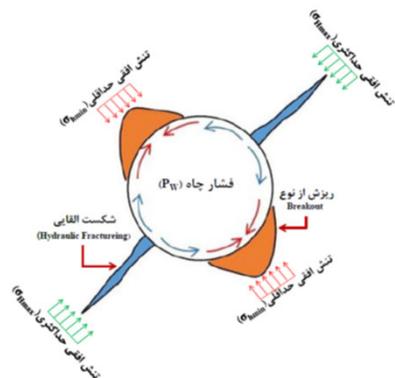
$$\varepsilon_y = \left(\frac{\nu \sigma_v}{E} \right) \left(1 - \frac{\nu^2}{1-\nu} \right).$$

$$\sigma_H = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v \right) + \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p \right) + \left(\frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \right) + \left(\frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_x \right)$$

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ محاسبه تنش های افقی و پایداری چاه

• بررسی پایداری چاه

حد پایینی فشار بحرانی داخل چاه (P_{WDC}) جهت جلوگیری از بیرون ریختگی؟حد بالایی فشار بحرانی داخل چاه (P_{WFC}) جهت جلوگیری از شکست هیدرولیکی؟

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ محاسبه تنش های افقی و پایداری چاه

• بررسی پایداری چاه با معیار شکستگی موهر-کلمب

روابط برآورد بیشترین فشار گل به عنوان حد پایینی فشار طبق معیار موهر-کلمب (بروز بیرون ریختگی در اثر فشار)

جایگشت	برحسب تنش اصلی $(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3)$	اگر مقادیر $P_{wf} \leq P_{wbc}$ شود، در چاه ریزش رخ خواهد داد
۱	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr}$	$P_{wbc1} = \left(\frac{B-C}{q} \right) = \left(\frac{B + P_p(q-1) - \sigma_c}{q} \right)$
۲	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{rr}$	$P_{wbc2} = \left(\frac{A-C}{1+q} \right) = (A - \sigma_c - qB + P_p(q-1))$
۳	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{zz}$	$P_{wbc3} = A - C - aB = \left(\frac{A + P_p(q-1) - \sigma_c}{q+1} \right)$
$\sigma_w = P_w - P_p, \sigma_{\theta\theta} = A - P_w - P_p, \sigma_{zz} = B - P_p, A = 3\sigma_H - \sigma_h, B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), C = \sigma_c - P_p,$ $q = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$		

روابط برآورد کمترین فشار گل به عنوان حد بالایی فشار طبق معیار موهر-کلمب (بروز شکافت در اثر کشش)

جایگشت	برحسب تنش اصلی $(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3)$	اگر مقادیر $P_{wf} \geq P_{wfc}$ شود، در چاه شکافت رخ خواهد داد
۱	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz}$	$P_{wfc1} = C + qE = \left(\frac{\sigma_c + qD + P_p(1-q)}{q+1} \right)$
۲	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_{wfc2} = \left(\frac{C+qD}{1+q} \right) = (\sigma_c + qE + P_p(1-q))$
۳	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_{wfc3} = \left(\frac{C-E+D}{q} \right) = \left(\frac{\sigma_c - E + P_p(1-q) + qD}{q} \right)$
$\sigma_{rr} = P_w - P_p, \sigma_{\theta\theta} = D - P_w - P_p, \sigma_{zz} = E - P_p, D = 3\sigma_{\gamma\gamma} - \sigma_{xx}, B = \sigma_{zz} - 2\nu(\sigma_{xx} - \sigma_{\gamma\gamma}).$		

❖ مدل سازی ژئومکانیکی

➤ محاسبه تنش های افقی و پایداری چاه

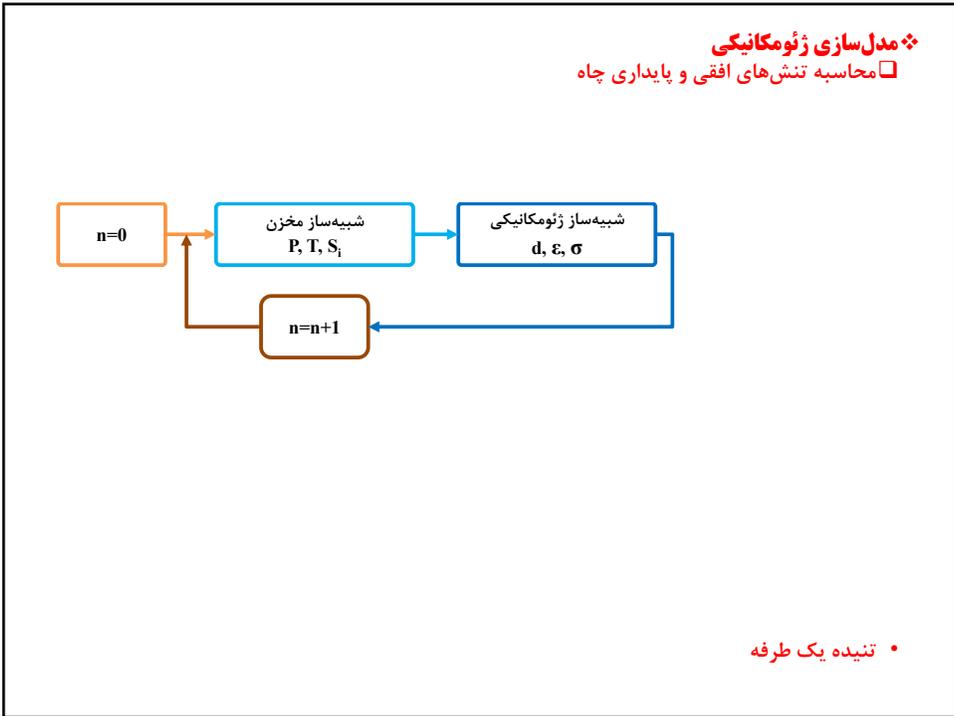
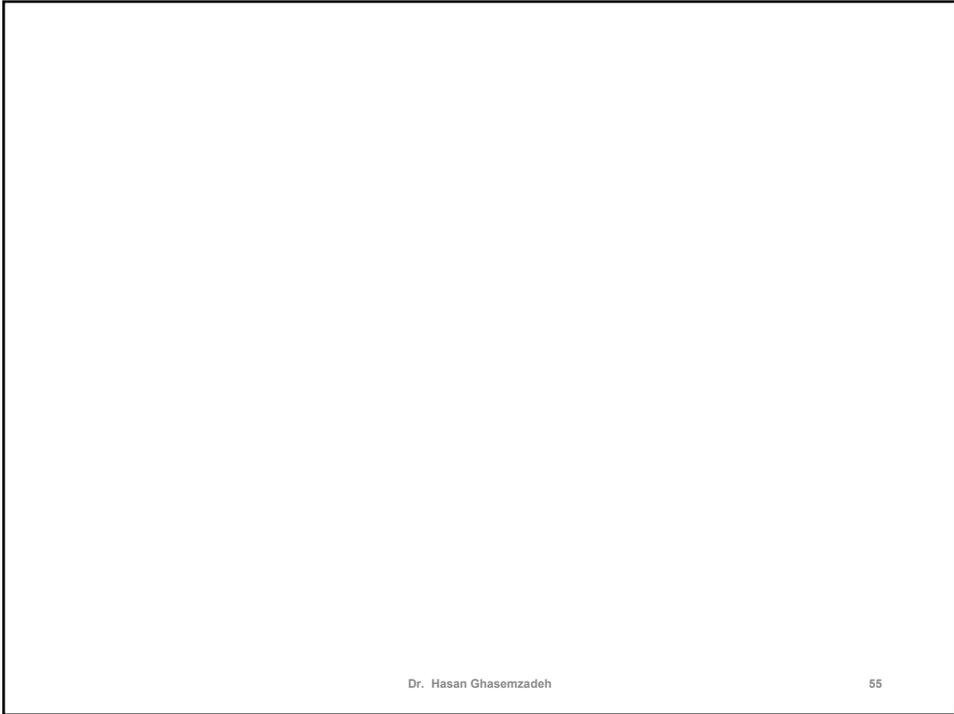
• بررسی پایداری چاه با معیار شکستگی موگی-کلمب

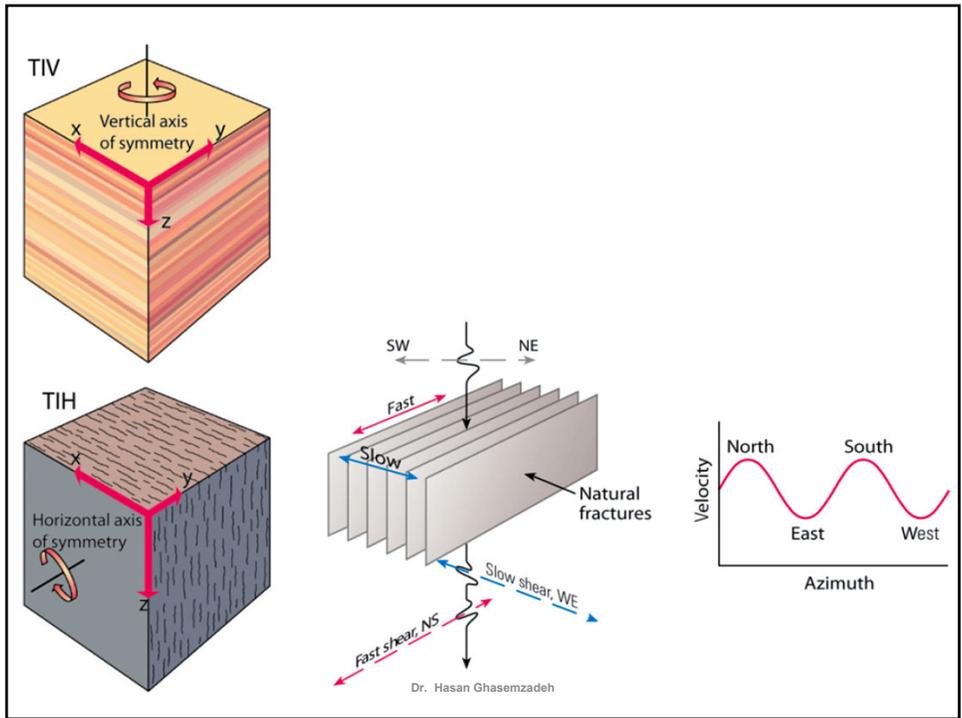
روابط برآورد کمترین فشار گل به عنوان حد بالایی فشار طبق معیار موگی-کلمب (بروز بیرون ریختگی در اثر فشار)

جایگشت	برحسب تنش اصلی $(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3)$	اگر مقادیر $P_{wf} \leq P_{wbc}$ شود، در چاه ریزش رخ خواهد داد
۱	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr}$	$P_{wbc1} = \left(\frac{1}{6-2b^2} \right) (3A + 2bK - \sqrt{H + 12(K^2 + bAK)})$
۲	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{rr}$	$P_{wbc2} = \left(\frac{A}{2} \right) - \frac{1}{6} \left(\sqrt{12(a+b(A-2P_p))^2 - 3(A-2B)^2} \right)$
۳	$\sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{zz}$	$P_{wbc3} = \left(\frac{1}{6-2b^2} \right) (3A - 2bG - \sqrt{H + 12(G^2 + bAG)})$
<p>پارامترها</p> $A = 3\sigma_x - \sigma_y, B = \sigma_z + 2\nu(\sigma_x - \sigma_y), K = a + b(B - 2P_p),$ $H = A^2(4b^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b^2 - 12), G = K + bA$		

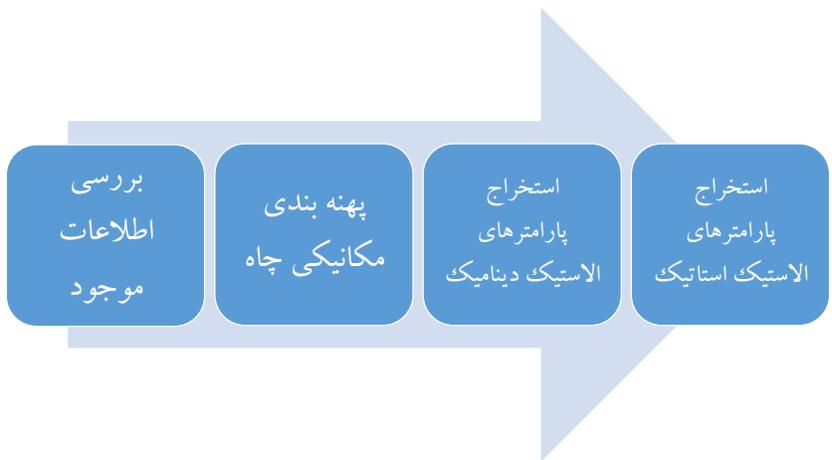
روابط برآورد کمترین فشار گل به عنوان حد بالایی فشار طبق معیار موگی-کلمب (بروز شکافت در اثر کشش)

جایگشت	برحسب تنش اصلی $(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3)$	اگر مقادیر $P_{wf} \geq P_{wfc}$ شود، در چاه ریزش رخ خواهد داد
۱	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta} \geq \sigma_{zz}$	$P_{wfc1} = \left(\frac{1}{6-2b^2} \right) (3D + 2bN + \sqrt{J + 12(N^2 + bDN)})$
۲	$\sigma_{rr} \geq \sigma_{zz} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_{wfc2} = \left(\frac{D}{2} \right) + \frac{1}{6} \left(\sqrt{12(a+b(D-2P_p))^2 - 3(D-2E)^2} \right)$
۳	$\sigma_{zz} \geq \sigma_{rr} \geq \sigma_{\theta\theta}$	$P_{wfc3} = \left(\frac{1}{6-2b^2} \right) (3D - 2bM - \sqrt{J + 12(M^2 + bDM)})$
<p>پارامترها</p> $D = 3\sigma_x - \sigma_y, E = \sigma_z - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y), N = a' + b'(E - 2P_p),$ $J = D^2(4b^2 - 3) + (E^2 - DE)(4b^2 - 12), M = N + b'D$		





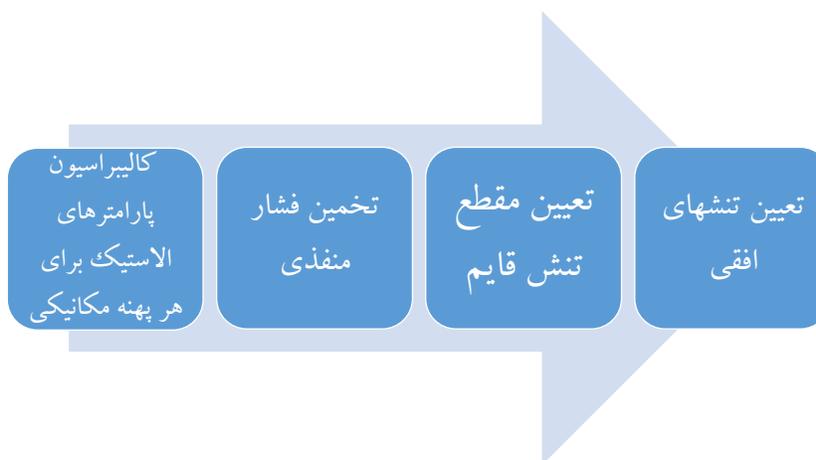
مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی مخزن



Dr. Hasan Ghasemzadeh

58

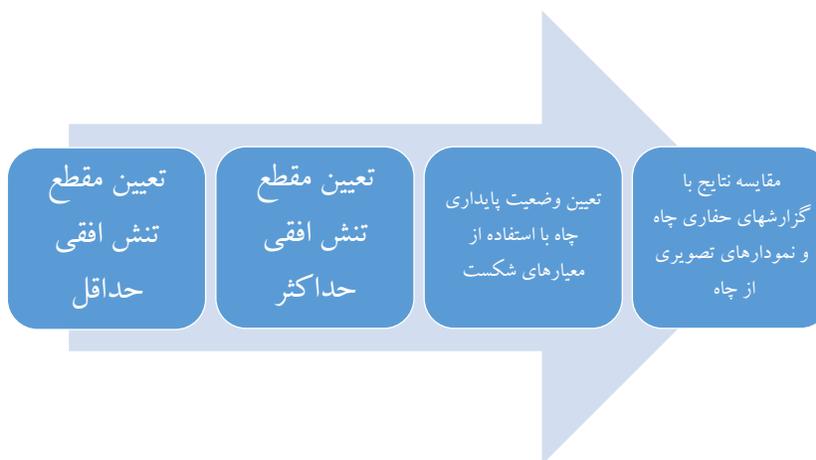
مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی مخزن



Dr. Hasan Ghasemzadeh

59

مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی مخزن



Dr. Hasan Ghasemzadeh

60