

## مدل سازی نفوذ پیژوکن در رسوبات دریایی غیراشباع دارای هیدرات گاز

بهرروز گتمیری<sup>۱</sup>، مصطفی نظرعلی<sup>۲\*</sup> و Vincenzo De Gennaro<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (CERMES, Institut Navier), Paris, France

(تاریخ دریافت ۱۳۸۷/۰۵/۱۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۹/۰۵، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۹/۳۰)

### چکیده

این مقاله یک مدل اجزاء محدود را برای تحلیل آزمایش نفوذ پیژوکن (PCPT) در خاک متخلخل غیراشباع ارائه می‌دهد. لزوم بررسی این آزمایش بخاطر وجود نوعی از خاک‌های غیراشباع می‌باشد که دارای ترکیب هیدرات گاز می‌باشند. این ترکیب در بستر اقیانوس‌ها و در قسمت فلات قاره‌ای یافت می‌شود و تحت شرایط خاصی از فشار و دما پایدار می‌باشد. با توجه به اینکه پس از ناپایداری این ترکیب، نمی‌توان با تئوری‌های موجود برای خاک اشباع رفتار خاک را بدرستی مدل‌سازی کرد، از برنامه  $\theta$ -Stock (گتمیری-۱۹۹۷) و با اعمال تغییراتی در این مدل، استفاده شده‌است. رفتار خاک الاستیک غیرخطی در نظر گرفته شده و عملیات نفوذ پیژوکن در دو مرحله انجام شده‌است. اندرکنش فازهای مختلف موجود در خاک غیراشباع در حضور تغییرات درجه حرارت بصورت کاملاً کوپله در نظر گرفته شده‌است، بطوریکه کلیه خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی محیط وابسته به دما می‌باشد. اطلاعات اولیه این مدل‌سازی از آزمایش‌های میدانی انجام شده در خلیج گینه بدست آمده‌است. نتایج این تحقیق حاکی از توانایی کیفی مدل عددی مذکور در پیش‌بینی رفتار رسوبات دریایی دارای هیدرات گاز می‌باشد و با داشتن داده‌های میدانی کافی می‌توان از آن در کاربردهای واقعی استفاده نمود.

**واژه‌های کلیدی:** هیدرات گاز، پیژوکن، خاک غیراشباع، روش اجزاء محدود، رفتار ترموهیدرومکانیکی

### مقدمه

فشارهای حفره‌ای آب و هوا در رسوبات دریایی و همچنین کاهش تنش مؤثر در خاک می‌شود. در برخی از آزمایشات میدانی که اخیراً توسط همکاری شرکت Ifremer فرانسه و TOTAL در منطقه خلیج گینه انجام گردیده‌است، به علت وجود هیدرات گاز نتایجی بدست آمده‌است که با تئوری خاک‌های اشباع قابل توجیه نمی‌باشد. از جمله این آزمایشات میدانی می‌توان به آزمایش نفوذ مخروط و بطور خاص پیژوکن اشاره کرد که نشان‌دهنده افزایش غیرعادی فشار آب حفره‌ای در محل وجود هیدرات گاز بودند. بدین منظور نیاز به یک مدل عددی که توانایی در نظر گرفتن اندرکنش بین فازهای مختلف موجود در خاک دریایی غیراشباع و در این مورد خاص نفوذ پیژوکن را داشته باشد، آشکار می‌گردد. مدل عددی مورد استفاده می‌بایست حرکت آب و گاز را به همراه اثر گرادیان‌های حرارتی در نظر بگیرد. نمونه‌ای از هیدرات گاز که در مغزه‌گیری‌های پروژه مذکور بدست آمده‌است را در شکل (۱) مشاهده می‌کنید و افزایش فشار آب حفره‌ای در هنگام یکی از آزمایش میدانی پروژه مذکور بدست آمده‌است، نیز در شکل (۲) ملاحظه می‌شود [۲].

هیدرات گاز بوجود آمده در رسوبات دریایی می‌تواند به علت فعالیت‌های گرمایی و بیولوژیکی باشد. هیدرات گاز ترکیبی یخ‌مانند است که دارای ساختار کریستالی متشکل از مولکول‌های آب و گاز متان می‌باشد [۱]. در دو دهه‌ی اخیر توجه زیادی به مطالعه در مورد دینامیک هیدرات‌های گاز دریایی شده است که زمینه‌های اصلی این مطالعات مربوط به استخراج گاز، حفاری‌های اکتشاف منابع نفت و گاز، خطرهای زیست‌محیطی، مخاطرات گرم شدن کره زمین و بحث گسیختگی شیروانی‌های بستر دریا می‌باشد. این ترکیب در قسمت فلات قاره‌ای دریاهای عمیق مانند خلیج مکزیک، شرق قاره آمریکای شمالی و شرق آفریقا و همچنین در دریای خزر یافت می‌شود. هیدرات‌های گاز تحت شرایط خاصی از جمله فشار بالا و دمای پائین پایدار می‌باشند. بدین ترتیب هرگونه تغییری در دما یا فشار در سطح بستر دریا و یا نواحی زیر آن می‌تواند منجر به ناپایداری هیدرات گاز شود. تحت این شرایط، تجزیه هیدرات گاز رخ می‌دهد که منجر به آزاد شدن گاز متان و آب می‌گردد. این فرایند باعث افزایش

دو نوع معادله برای انتقال آنها استفاده شده که شامل قانون Philip و de Vries برای بخار آب و قانون Darcy برای فاز مایع می‌باشد. همچنین قانون Darcy برای فاز هوا نیز در نظر گرفته شده است. در این مقاله تحلیل نفوذ پیروزکن بر مبنای تئوری Cavity Expansion و با استفاده از مدل عددی مناسب که توسط گتمیری (۱۹۹۷) توسعه یافته است، بررسی می‌گردد.

در تئوری مورد استفاده در مدل‌سازی خاک متخلخل غیراشباع، رفتار خاک بصورت الاستیک غیرخطی با احتساب اثر دما در نظر گرفته شده است. این فرض با توجه به مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف از جمله Miazaki و Jakobsen همخوانی دارد [۳،۴]. همچنین تئوری Philip و de Vries برای در نظر گرفتن اثر تغییر شکل خاک بر روی انتقال حرارت و سیال تغییر یافته است. معادلاتی که باید استخراج و بصورت کوپله حل شوند، در ادامه توضیح داده می‌شوند [۵].

### معادلات فاز رطوبت

این معادلات شامل انتقال رطوبت و بقاء جرم می‌باشند. از آنجا که فاز رطوبت هم شامل آب و هم شامل بخار آب می‌باشد، روابط انتقال آنها با هم ترکیب شده و معادله زیر را می‌دهند:

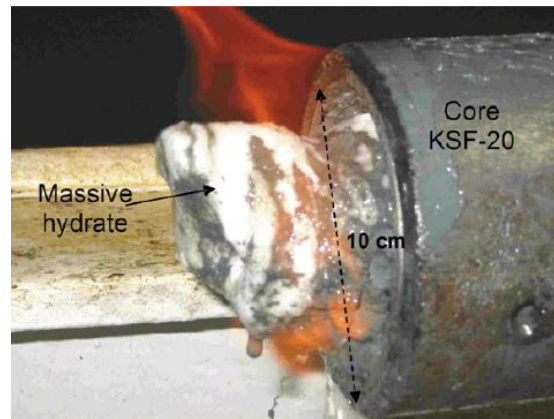
$$\frac{q}{\rho_w} = -D_T \Delta T - D_\theta \Delta \theta - D_W \Delta Z \quad (1)$$

که  $D_T$  ضریب دیفیوژن رطوبت با در نظر گرفتن اثر حرارت،  $D_\theta$  ضریب دیفیوژن رطوبت در حالت همدمما و  $D_W$  نفوذپذیری آب می‌باشند. قانون بقاء جرم برای فاز رطوبت با در نظر گرفتن تبدیل فاز بین مایع و گاز بدین صورت می‌باشد:

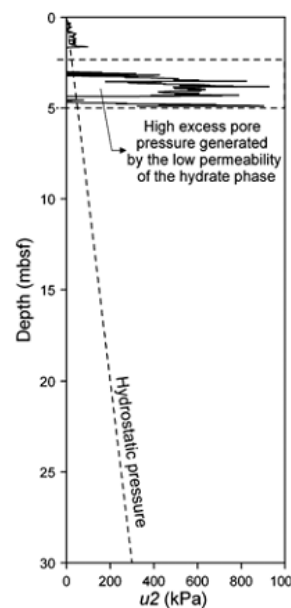
$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -\text{div}(\rho_w(U + V)) \quad (2)$$

پارامتر mp مقدار چگالی رطوبت را نشان می‌دهد.

$$\rho_m = \theta_w \rho_w + (n - \theta_w) \rho_v = n S_r \rho_w + n(1 - S_r) \rho_v \quad (3)$$



شکل ۱: نمونه‌ای از مغزه‌گیری هیدرات گاز در خلیج گینه



شکل ۲: توزیع فشار آب حفره ای (kPa) در برابر عمق (m)

### فرمولاسیون و روش حل مدل عددی

از آنجا که بسیاری از معادلات حاکم بر پدیده مورد مطالعه بصورت کوپله می‌باشند، باید مدل عددی در چندین گام برپا گردد. در اولین گام می‌بایست تعداد کافی از متغیرهای مستقل برای بیان اندرکنش بین فازهای مختلف خاک که بصورت یک محیط متخلخل تغییر شکل پذیر می‌باشد، در نظر گرفته شود. لحاظ کردن تغییر فاز بین مایع و گاز، تبخیر و میعان، حرکت سیال تحت اثر گرادیان حرارت و فشار و تاثیر توزیع رطوبت بر روی حرکت حرارت در این مدل بسیار مهم می‌باشند. معادلات حاکم شامل معادله تعادل، معادله بقاء جرم، قانون رفتاری اسکلت خاک و قانون انتقال و بقاء انرژی می‌باشند. از آنجا که فاز سیال شامل مایع و بخار می‌باشد،

**معادلات اسکلت جامد خاک**

معادله تعادل برای اسکلت جامد خاک به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$(\sigma_{ij} - \delta_{ij}P_g)_{,j} + P_{g,i} + b_i = 0 \quad (10)$$

قانون رفتاری اسکلت جامد به فرم زیر می‌باشد:

$$d(\sigma_{ij} - \delta_{ij}P_g) = Dd\varepsilon - Fd(p_g - p_w) - CdT \quad (11)$$

که در معادله فوق پارامترها بصورت زیر می‌باشند:

$$F = DD_s^{-1}, \quad D_s^{-1} = \beta_s m,$$

$$\beta_s = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial(p_g - p_w)}, \quad m = [1 \ 1 \ 0] \quad (12)$$

$$C = DD_t^{-1}, \quad D_t^{-1} = \beta_t m, \quad \beta_t = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial T} \quad (13)$$

که  $e$  نشانه خلاء محیط،  $T$  دما و  $D$  ماتریس الاستیک رابطه تنش-کرنش می‌باشد.

**سطح حالت نشانه خلاء**

بر مبنای مفهوم سطوح حالت نشانه خلاء و درجه اشباع که توسط (Matyas و Radhakrishna 1968) و (Gatmiri 1997) ارائه گردید، سطح حالت نشانه خلاء که با قانون رفتاری هیپربولیک (مدل Duncan-Chen) سازگار می‌باشد، بصورت زیر ارائه می‌گردد.

$$e = \frac{1+e_0}{\exp\left[\frac{[a_e(\frac{\sigma-p_g}{P_{atm}}) + b_e(1-\frac{\sigma-p_g}{\sigma_c})(\frac{p_g-p_w}{P_{atm}})]^{1-m}}{K_b(1-m)}\right] \exp[c_e(T-T_0)]} - 1 \quad (14)$$

**سطح حالت درجه اشباع در حالت غیرهمدم**

یکی از مواردی که باید در خاک غیر اشباع دقت شود، در نظر گرفتن حالت کوپله محتوای حجمی رطوبت به عنوان تابعی از دما و تحت اثر تنش و مکش وارده می‌باشد. ضمناً رفتار تنش-کرنش نیز باید بصورت کوپله در نظر گرفته شود. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی رابطه زیر برای سطح حالت درجه اشباع پیشنهاد شده است:

$$S_r = 1 - [a_s + b_s(\sigma - p_g)] [1 - \exp(c_s(p_g - p_w))] \exp(d_s(T - T_0)) \quad (15)$$

ترکیب معادلات (۲) و (۳) شکل نهایی انتقال رطوبت را بوجود می‌آورد. همچنین ضریب نفوذپذیری آب  $K_w$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K_w = K_n \cdot 10^{\alpha e} \cdot \left(\frac{S_r - S_{ru}}{1 - S_{ru}}\right)^d \cdot \left[\frac{\mu_w(T_r)}{\mu_w(T)}\right] \quad (4)$$

**معادلات فاز گاز**

در این مدل شکل جدیدی از رابطه معروف Darcy با در نظر گرفتن اثر دما مورد استفاده قرار گرفته است:

$$V_g = \frac{-K_g}{\gamma_g} \frac{\partial P_g}{\partial T} \nabla T - K_g (\nabla \left(\frac{P_g}{\gamma_g}\right) + \nabla Z) \quad (5)$$

ضریب نفوذپذیری گاز،  $K_g$ ، برابر است با:

$$K_g = \frac{-b \cdot \gamma_g}{\mu_g} \cdot [e \cdot (1 - S_r)]^c \quad (6)$$

معادله دیفرانسیل حاکم در مورد قانون بقاء جرم برای یک حجم کنترل از هوا بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t} [n\rho_g(1 - S_r + HS_r)] = -\text{div}(\rho_g V_g) - \text{div}(\rho_g HU) + \rho_w \text{div} V \quad (7)$$

با جایگذاری در معادله (۲) می‌توان روابط حاوی سرعت سیال، بخار و گاز را در گرادیان‌های مختلف حرارت و فشار و بر پایه مقدار مکش محاسبه کرد.

**معادلات انرژی**

مقدار کل انتقال حرارت در محیط متخلخل غیراشباع بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q = -\lambda \text{grad} T + [C_{p_w} \rho_w U + C_{p_w} \rho_w V + C_{p_g} \rho_g V_g](T - T_0) + \rho_w h_{fg} V + \rho_v V_g h_{fg} \quad (8)$$

قانون بقاء انرژی در این محیط عبارت است از:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \text{div} Q = 0 \quad (9)$$

پارامتر  $Q$  مقدار انتقال حرارت و  $\Phi$  محتوای حرارتی حجمی محیط می‌باشد. با ترکیب روابط فوق معادله دیفرانسیل عمومی انتقال حرارت در محیط متخلخل غیراشباع بدست می‌آید.

که  $a_s, b_s, c_s, d_s$  ضرایب ثابت می‌باشند.

### افزودن قابلیت اعمال شرط مرزی جابجایی

تحلیل یک مساله مهندسی اغلب شامل اعمال قیدهای خاصی بر روی بعضی از متغیرهای حل مساله می‌باشد. دو الگوریتم معروف برای اعمال این قیود در یک مساله اجزاء محدود وجود دارد که شامل روش ضرایب لاگرانژ و روش پنالتی می‌باشد. در این برنامه از روش دوم برای اعمال شرط مرزی جابجایی استفاده شده‌است. به طور خلاصه می‌توان گفت که این روش، برخی از درایه‌های ماتریس سختی را بگونه‌ای تغییر می‌دهد که تأثیر قید جابجایی اعمالی به مرز مدل در نظر گرفته شود. یکی از مزیت‌های این روش، حفظ ابعاد ماتریس سختی در حین اعمال شرط مرزی می‌باشد، در حالی که در روش ضرایب لاگرانژ این اتفاق نمی‌افتد [۷].

### تحلیل مدل و نتایج بدست آمده

با توجه به توضیحات داده شده در فوق، مراحل نفوذ پیروزکن در خاک توسط اعمال جابجایی گره‌ای روی مرز مدل صورت می‌گیرد که این جابجایی‌ها متناظر با هندسه پیروزکن در حال نفوذ می‌باشند [۸].

نفوذ پیروزکن در دو مرحله صورت می‌گیرد در مرحله اول در عمق مشخصی از خاک، پیروزکن به صورت شعاعی از شعاع اولیه‌ای نزدیک به صفر (برابر با یک‌دهم شعاع پیروزکن) تا شعاع پیروزکن گسترش می‌یابد (گسترش حجمی پیروزکن). نرخ افزایش حجم پیروزکن در این مرحله طوری تنظیم شده‌است تا زمان مورد نیاز برای این کار متناظر با سرعت نفوذ پیروزکن باشد. استفاده از این مرحله برای جلوگیری از فرض وجود یک حفره مخروطی موجود در ابتدای مدل‌سازی می‌باشد. زیرا در این صورت تنش‌های موجود در خاک با شرایط واقعی تفاوت خواهند داشت. این مرحله از مدل‌سازی، شرایط اولیه برای مرحله دوم که نفوذ پیوسته پیروزکن با اعمال جابجایی قائم به گره‌ها می‌باشد را بوجود می‌آورد. جابجایی قائم گره‌ها با سرعت ۲ سانتیمتر بر ثانیه صورت می‌گیرد. بعد از اتمام مرحله نفوذ، به بررسی استهلاک اضافه فشارهای حفره‌ای در طول زمان پرداخته می‌شود. مراحل دو گانه فوق در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند.

محدوده مدل‌سازی، مستطیلی با ابعاد ۲۰ در ۱۰ سانتیمتر می‌باشد. تعداد کل گره‌ها و المان‌های بکار رفته در این مدل بترتیب برابر با ۸۶۸ و ۸۱۰ عدد می‌باشند.

### فرایند حل معادلات

با توجه به پیچیدگی معادلات دیفرانسیل حاکم در مدل پیشنهادی، بدست آوردن یک جواب تحلیلی حتی برای شرایط ساده سازی شده، بسیار مشکل می‌باشد. به همین خاطر در کد برنامه  $\theta$ -STOCK، معادلات دیفرانسیل حاکم در مکان با استفاده از روش اجزاء محدود و در زمان با استفاده از روش تفاضل محدود حل شده‌اند. ساختار کلی معادلات انتشار آلودگی در محیط متخلخل غیراشباع که باید حل شوند به شکل زیر است.

$$A(u) = 0 \quad \text{و} \quad B(u) = 0 \quad (16)$$

دسته معادله  $A$  نتیجه برهم نهی شده معادلات مربوط به هریک از فازها داخل محیط و دسته  $B$  نتیجه بر هم نهی شده معادلات مربوط به هریک از فازها روی مرز محیط است. معادله (۱۷) از لحاظ ریاضی مجموع معادلات فوق می‌باشد.

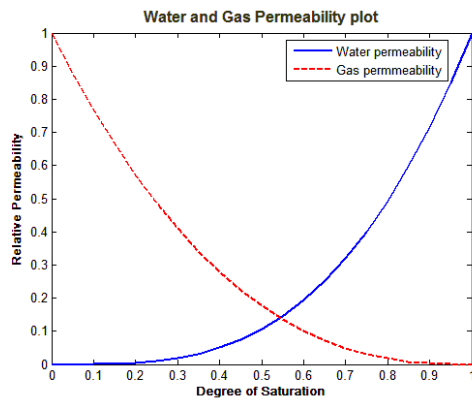
$$\int_{\Omega} \omega^T A(u) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{\omega}^T A(u) d\Gamma = 0 \quad \forall \omega, \bar{\omega} \quad (17)$$

$\omega, \bar{\omega}$  توابع وزن هستند. در این رویکرد از روش گالرکین استفاده شده‌است که در آن توابع وزن همان توابع درونیایی ( $N$ ) می‌باشند. برای جداسازی معادلات در مکان از الگوریتم اجزاء محدود استفاده شده‌است. برای این منظور محیط مسئله به المان‌های مجزا با اشکال هندسی ساده تبدیل می‌شود. معادلات در سطح هر المان حل می‌شوند، سپس نتایج حاصل برای کلیه المان‌ها برهم نهی شده و جواب‌ها برای یک گام زمانی در کل فضا بدست می‌آیند. در این تحقیق، المان‌ها به شکل مستطیلی ۴ گره‌ای در نظر گرفته شده‌اند. ساختار نهایی جداسازی شده‌ی معادلات در مکان و زمان به شکل زیر است [۶].

$$\begin{bmatrix} [R] & [C_T] & [C_w] & [C_g] \\ [C_{T_u}] & [C_{TT}] + \beta \Delta t [K_{TT}] & [C_{T_w}] + \beta \Delta t [K_{T_w}] & [C_{T_g}] + \beta \Delta t [K_{T_g}] \\ [C_{w_u}] & -[C_{w_T}] + \beta \Delta t [K_{w_T}] & -[C_{w_w}] + \beta \Delta t [K_{w_w}] & -[C_{w_g}] + 0 \\ [C_{g_u}] & [C_{g_T}] + \beta \Delta t [K_{g_T}] & [C_{g_w}] + \beta \Delta t [K_{g_w}] & [C_{g_g}] + \beta \Delta t [K_{g_g}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta T \\ \Delta P_w \\ \Delta P_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta F_r \\ \beta \Delta t \Delta F_T \\ \beta \Delta t \Delta F_w \\ -\beta \Delta t \Delta F_g \end{pmatrix} + \Delta T \begin{pmatrix} 0 \\ F_{T0} - [K_{TT}]T_0 - [K_{T_w}]P_{w0} - [K_{T_g}]P_{g0} \\ F_{w0} - [K_{w_T}]T_0 - [K_{w_w}]P_{w0} - [K_{w_g}]P_{g0} \\ F_{g0} - [K_{g_T}]T_0 - [K_{g_w}]P_{w0} - [K_{g_g}]P_{g0} \end{pmatrix} \quad (18)$$

جدول ۲: پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی خاک

پارامتر ضریب نفوذپذیری	ظرفیت گرمای ویژه	ضریب هدایت گرمایی	فاز مربوطه
-	۹۲۰	۲/۵	اسکلت جامد خاک
$1/2 \times 10^{-16}$	۴۱۸۷	۰/۵۸	آب
$3/5 \times 10^{-14}$	۱۰۰۰	۰/۰۳	گاز متان



شکل ۵: منحنی نفوذپذیری نسبی آب و گاز

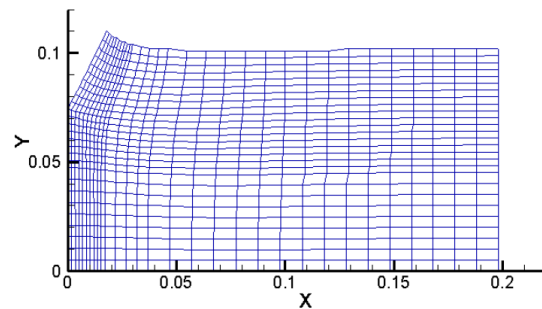
### کالیبراسیون سطح حالت درجه اشباع

با توجه به اینکه در خاک متخلخل غیراشباع رابطه‌ای منطقی بین مقدار آب و گاز موجود در نمونه خاک با مکش وجود دارد، با افزایش درصد گاز موجود، فشار مکشی نیز افزایش می‌یابد و آب به حفره‌های کوچکتر رانده می‌شود. همانطور که قبلاً اشاره شد، فرمول مورد استفاده برای تعریف رابطه بین درجه اشباع خاک و فشار مکشی ارائه شده توسط گتمیری (رابطه شماره ۱۵) باید کالیبره شود. بدین منظور از نتایج کارهای آزمایشگاهی De Gennaro et al. بر روی خاک دارای هیدرات گاز که از منطقه غرب آفریقا برداشت شده، استفاده شده‌است [۹]. نتایج کالیبراسیون فرمول (۱۵) و ضرایب بدست آمده به ترتیب در شکل (۶) و جدول (۳) آورده شده‌است.

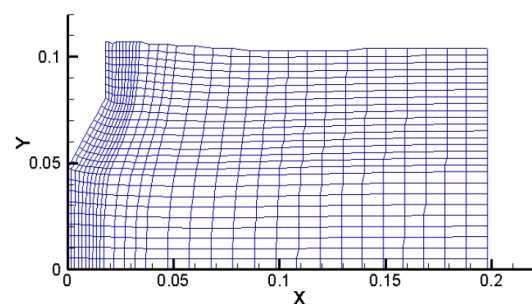
### شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل

دمای اولیه محیط برابر با ۴ درجه سانتیگراد فرض شده است. همچنین مقدار تنش‌های اولیه محیط در دو راستای X و Y به ترتیب برابر با ۶۰ و ۱۲۰ کیلوپاسکال قرار داده شده‌است. این مدل با فرض فشار آب حفره‌ای اولیه برابر با ۱۰ کیلوپاسکال و فشار هوای حفره‌ای برابر با ۴۰ کیلوپاسکال اجرا شده‌است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، بارگذاری مدل در دو مرحله صورت می‌گیرد. در هر دو

همچنین مرز سمت چپ مدل به عنوان محور تقارن محسوب می‌شود.



شکل ۳: هندسه مدل پس از مرحله اول نفوذ پیروکن



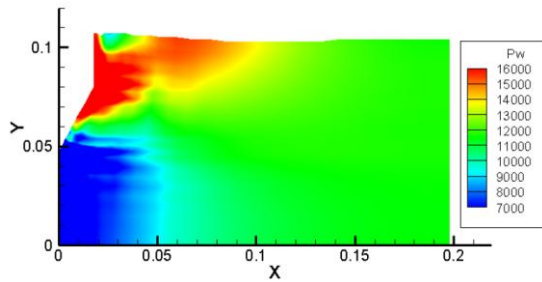
شکل ۴: هندسه مدل پس از مرحله دوم نفوذ پیروکن

### خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی مدل

همانطور که قبلاً گفته شد، رفتار خاک به صورت الاستیک غیرخطی در نظر گرفته شده‌است. لذا در جدول (۱) پارامترهای مکانیکی مربوط به ضرایب این روابط آورده شده‌اند. همچنین پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی خاک در جدول (۲) ذکر شده‌است. با توجه به روابط (۴) و (۶) و همچنین شکل شماره (۵) می‌توان تغییرات نفوذپذیری نسبی آب و گاز را مشاهده کرد.

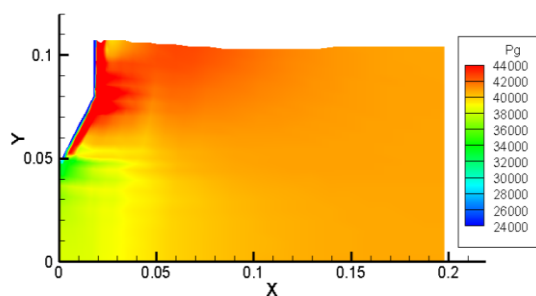
جدول ۱: پارامترهای مکانیکی مورد استفاده برای بیان رفتار الاستیک غیرخطی

$K_L$	ضریب مدول بارگذاری خاک	۱۵۰۰
$K_U$	ضریب مدول باربرداری خاک	۱۵۰۰
$K_B$	ضریب در رابطه مدول بالک	۲۵۰۰
$R_f$	ضریب ثابت در رابطه رفتاری E	۰/۸
n	توان رابطه بارگذاری و باربرداری	۰/۷۵
m	توان در رابطه مدول بالک	۰/۴
e	نشانه خلاء اولیه	۲



شکل ۷: توزیع فشار آب حفره‌ای در پایان مرحله اول نفوذ

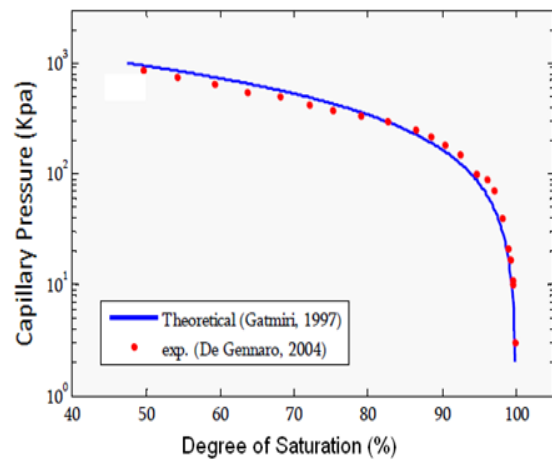
همانطور که ملاحظه می‌شود، در بیشتر نقاط اطراف پیژوکن که تقریباً از نوک مخروط شروع می‌شود و تا بالای آن ادامه پیدا می‌کند، شاهد افزایش فشار آب حفره‌ای هستیم که با فیزیک مساله تطابق دارد. این افزایش فشار آب حفره‌ای در آزمایش‌های میدانی انجام شده در خلیج گینه نیز مشاهده شده‌است [۲۰ و ۲۱]. در ناحیه پائین نوک مخروط نیز کاهش فشار ملاحظه می‌شود. این کاهش فشار می‌تواند به دلیل شرایط مرزی تعریف شده بر روی محور تقارن باشد. بدین صورت که از نوک پیژوکن تا پائین مدل، برای جلوگیری از حرکت المان‌ها به سمت داخل مدل و حفظ پیوستگی خاک، درجه آزادی حرکت در جهت افقی بسته شده‌است. در نتیجه یک تنش کششی مجازی در المان‌های مجاور مرز سمت چپ اعمال شده‌است که باعث افزایش حجم این المان‌ها گشته و در نهایت باعث کاهش فشار آب و هوای حفره‌ای می‌شود. توزیع هوای حفره‌ای نیز در شکل (۸) نمایش داده شده‌است.



شکل ۸: توزیع فشار هوای حفره‌ای در پایان مرحله اول نفوذ

در المان‌های نزدیک به مرز بجز المان سطح تماس پیژوکن و خاک، شاهد افزایش هوای حفره‌ای هستیم. در شکل (۹) استهلاک دما در کل محیط ملاحظه می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود، دمای اعمال شده بر روی مرز مدل چندان به داخل محیط پخش نشده است. این امر به دلیل زمان بسیار کوتاه اعمال شرط مرزی

مرحله شرط مرزی درجه حرارت در دیواره پیژوکن برابر با ۲۰ درجه سانتیگراد اعمال می‌گردد. این منبع حرارتی پس از اتمام عملیات نفوذ قطع می‌گردد.



شکل ۹: نتیجه کالیبراسیون سطح حالت درجه اشباع

جدول ۳: پارامترهای مکانیکی مورد استفاده برای بیان سطح حالت درجه اشباع و سطح حالت نشانه خلاء

$a_s$	ضریب ثابت در فرمول ۱۵	۱
$b_s$	ضریب ثابت در فرمول ۱۵	$0.15 \times 10^{-7}$
$c_s$	ضریب ثابت در فرمول ۱۵	$0.6 \times 10^{-6}$
$d_s$	ضریب ثابت در فرمول ۱۵	$0.6 \times 10^{-2}$
$a_e$	ضریب ثابت در فرمول ۱۴	۰/۵
$b_e$	ضریب ثابت در فرمول ۱۴	$0.15 \times 10^{-3}$
$c_e$	ضریب ثابت در فرمول ۱۴	$0.9 \times 10^{-6}$

## نتایج مدل

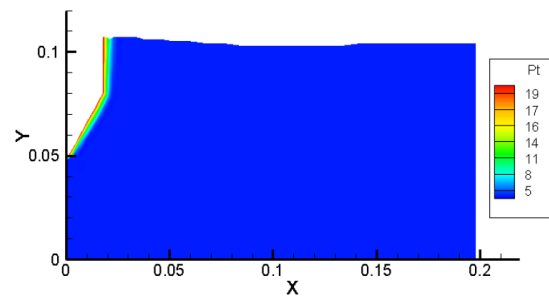
پس از پایان مرحله اول نفوذ پیژوکن که متناظر با جابجایی افقی پیژوکن و گسترش یک حفره استوانه‌ای می‌باشد، المان‌های اطراف پیژوکن به سمت راست و اندکی به سمت بالا متمایل می‌شوند که این امر بخاطر تراکم‌پذیری محدود خاک در واقعیت و در نتیجه مدول بالک تعریف شده برای مدل می‌باشد (شکل ۳). بعد از انجام مرحله دوم نفوذ، جابجایی‌های هندسی مورد نظر در گره‌های مرزی بوجود می‌آیند. در ادامه مقادیر فشارهای حفره‌ای در پایان این مرحله مورد بررسی قرار می‌گیرند. در شکل (۷) توزیع فشار آب حفره‌ای در نقاط اطراف محل نفوذ پیژوکن دیده می‌شود.

بالای مدل می‌باشد، زیرا در این حالت ضریب نفوذپذیری گاز در محیط متخلخل سه فازه کاهش می‌یابد و در نتیجه زمان بیشتری برای استهلاک اضافه فشار هوای حفره‌ای مورد نیاز می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

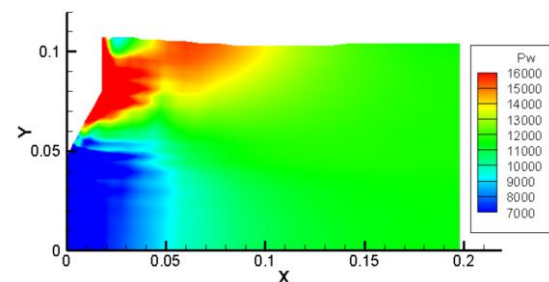
در این مقاله با توسعه مدل عددی  $\theta$ -Stock (گتمیری، ۱۹۹۷) برای شرایط خاص نفوذ پیزوکن در خاک‌های دارای هیدرات گاز، به بررسی روند تغییرات تنش و فشار در اطراف آن پرداخته شد. در این راستا تمامی پدیده‌های مؤثر در عملیات نفوذ پیزوکن در این مدل عددی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج این مدل عددی نشانگر توانایی برنامه در مدل‌سازی فرایند نفوذ پیزوکن در خاک غیراشباع می‌باشد. در این رابطه به بررسی سرعت ایجاد و استهلاک دما، اضافه فشار آب و هوای حفره‌ای پرداخته شد. مطمئناً در صورت وجود اطلاعات کافی راجع به مقادیر فشارهای حفره‌ای و روند استهلاک آنها می‌توان نتایج این مدل را از حالت کیفی به کالیبراسیون دقیق تبدیل نمود.

درجه حرارت می‌باشد، زیرا کل عملیات نفوذ پیزوکن تا پایان مرحله دوم کمتر از ۵ ثانیه به طول انجامیده است.

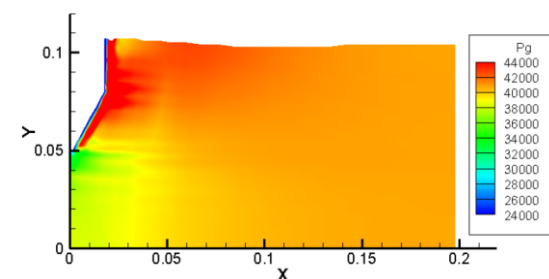


شکل ۹: توزیع دما پس از مرحله دوم بارگذاری

فرایند استهلاک دما با سرعت نسبتاً زیادی انجام می‌گیرد. بطوریکه در گام زمانی دهم پس از پایان نفوذ، دما بر روی مرز پیزوکن از ۲۰ به ۸ درجه سانتیگراد افت پیدا می‌کند. البته مقدار این استهلاک با گذشت زمان کاهش می‌یابد. استهلاک فشار آب و هوای حفره‌ای در گام زمانی سی‌ام شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌است.



شکل ۱۰: توزیع فشار آب حفره‌ای در گام زمانی سی‌ام



شکل ۱۱: توزیع فشار هوای حفره‌ای در گام زمانی سی‌ام

با توجه به درصد حجمی هوا و آب موجود در خاک غیراشباع، استهلاک آب حفره‌ای با سرعت نسبتاً بیشتری نسبت به هوای حفره‌ای صورت می‌پذیرد. سرعت نسبتاً پائین استهلاک فشار هوای حفره‌ای به دلیل درجه اشباع

## مراجع

1. Sultan, N. Fouchera, J.P. Cochonat, P. (2004). "Dynamics of gas hydrate: case of the Congo continental slope." *Marine Geology*, Vol. 206, PP. 1– 18.
2. Sultan, N. Voisset, M. Marsset, T. Vernant A.M. (2007). "Detection of free gas and gas hydrate based on 3D seismic data and cone penetration testing: An example from the Nigerian Continental Slope." *Marine Geology*, Vol. 240, PP. 235–255.
3. Gatmiri, B. Hoor, A. (2007). "Effect of excavation on the thermo-hydro-mechanical behaviour of a geological barrier." *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 32, PP. 947–956.
4. Miyazaki, K. Aoki, K. Tenma, N. Sakamoto, Y. Yamaguchi, T. (2011). "Application of Nonlinear Elastic Constitutive Model to Artificial Methane-hydrate-bearing Sediment Sample." *Proceedings of the Ninth (2011) ISOPE Ocean Mining Symposium*.
5. Jakobsen, M. Hudson, J. A. Minshull, T. A. Singh, S. C. (2000). "Elastic properties of hydrate-bearing sediments using effective medium theory." *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B1, PP. 561-577.
6. Gatmiri, B. (2002). "Framework of a non linear fully coupled thermohydromechanical behavior of unsaturated porous media." *Proceedings of the 3rd Iranian International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*.
7. Bathe, Klaus-Jurgen. (1996) "Finite Element Procedure.", *Prentice Hall*, PP. 143-146.
8. Nazarali, Mostafa. (2008) "Behavior of unsaturated marine sediments containing gas hydrate." *M.Sc. thesis, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran*.
9. De Gennaro, V., Delage, P., De Laure, E., (2004). "Comportement des sols marins grande profondeur". *Projet CLAROM no. CEP&M 7510/02*, Final Report. PP. 41