



رفتار خاک دریایی غیر اشباع دارای هیدرات گاز

بهروز گتمیری^۱، مصطفی نظرعلی^۲

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده فنی دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده فنی دانشگاه تهران

E-mail: nazarali@ut.ac.ir

خلاصه

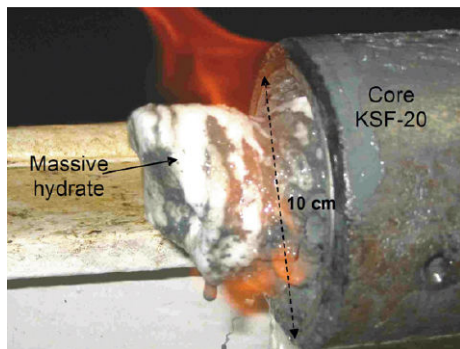
یکی از پدیده‌هایی که در آب عمیق، پاسخ مکانیکی لایه‌های بستر دریا در برابر بار خارجی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، وجود هیدرات گاز و تجزیه آن می‌باشد. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های میدانی در خاک دریایی دارای هیدرات گاز، نشانگر عدم توانایی تئوری‌های موجود در خاک اشباع برای تفسیر آنها می‌باشد. در این مقاله با استفاده از مدل عددی θ -STOCK (گتمیری، ۱۹۹۷) مساله نفوذ پیژوکن در خاک دریایی غیر اشباع مدلسازی شده است. این مدل عددی اندرکنش فازهای مختلف موجود در خاک غیر اشباع را در حضور تغییرات درجه حرارت بصورت کاملاً کوپله در نظر می‌گیرد. همچنین اثر متقابل تغییر شکل بر روی توزیع تنش و حرارت در اسکلت خاک با استفاده از سطوح حالت درجه اشباع و نشانه خلاء در نظر گرفته شده است. رفتار خاک الاستیک غیر خطی بوده و مشخصات مکانیکی و هیدرولیکی محیط متخلخل غیر اشباع وابسته به دما می‌باشد. مدلسازی نفوذ پیژوکن بر مبنای تئوری Cavity Expansion انجام شده است و اجراهای مدل با استفاده از نتایج آزمایش‌های میدانی انجام شده است. آزمایش‌های میدانی مورد استفاده در این تحقیق عمدتاً آزمایش CPTU بوده که در خلیج گینه و طی پروژه مشترک NERIS توسط موسسه تحقیقاتی Ifremer و شرکت نفتی Total انجام شده است. نتایج مدلسازی عددی حاکی از توانایی مدل عددی در پیش‌بینی رفتار مکانیکی خاک دریایی غیر اشباع می‌باشد.

کلمات کلیدی: خاک غیر اشباع، هیدرات گاز، پیژوکن، cavity expansion

مقدمه

هیدرات های گاز ترکیبات ویژه‌ای می‌باشند که دارای ساختاری یخ‌مانند هستند. این ساختار متشکل از یک نوع گاز است (عمدتاً متان می‌باشد) که در بین مولکول‌های آب محصور شده است. هیدرات های گاز در مناطقی به چشم می‌خورند که شرایط فشار، دما و منابع گاز به آنها اجازه پایداری بدهد. به طور عمده چنین شرایطی در مناطق قطبی و یا در خاکهای فلات قاره‌ای دریاها و اقیانوس‌ها در نقاط مختلف دنیا وجود دارد. بعنوان مثال در دریای شمال، خلیج گینه و دریای خزر منابع عظیمی از هیدرات گاز به چشم می‌خورد. علی‌رغم این واقعیت که هیدرات گاز منبعی سرشار از انرژی برای استفاده در آینده می‌باشد، بعنوان یک خطر و ریسک ژئوتکنیکی نیز به حساب می‌آید. گزارشات زیادی از ارتباط بین وجود این ماده در خاک با گسیختگی شیروانی‌های بستر دریا موجود است. هیدرات گاز تحت شرایط فشار بالا و دمای پائین پایدار می‌باشد. ناحیه پایداری هیدرات در محیط دریا تابعی از عمق آب، دمای بستر دریا و گرادیان حرارتی زمین می‌باشد. بدین ترتیب هرگونه تغییر در دما یا فشار در سطح بستر دریا و یا نواحی اطراف آن منجر به تغییر ضخامت ناحیه پایداری هیدرات گاز می‌گردد. در خارج از ناحیه پایداری، حل شدگی هیدرات گاز رخ می‌دهد که منجر به آزاد شدن گاز متان و آب می‌گردد. عوامل موثر در این فرایند شامل دما، زمان، نفوذپذیری خاک و دیفیوژن می‌باشند. با آزاد شدن گاز و آب، خاک افزایش حجم داده که با توجه به شرایط زهکشی آن ممکن است افزایش فشارهای حفره‌ای (هوا و آب) و کاهش تنش موثر نیز رخ دهد.

^۱ دکترای مهندسی عمران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد



شکل ۱- نمونه‌ای از هیدرات گاز در خلیج گینه

در برخی آزمایشات میدانی که اخیراً توسط همکاری شرکت Ifremer از فرانسه و TOTAL در منطقه خلیج گینه انجام گردیده است، بعلت وجود هیدرات گاز نتایج بدست آمده است که با تئوری خاک‌های اشباع قابل توجیه نمی‌باشد. از جمله این آزمایشات میدانی می‌توان به آزمایش نفوذ مخروط و بطور خاص پیژوکن اشاره کرد. بدین منظور نیاز به یک مدل عددی که توانایی در نظر گرفتن اندرکنش بین فازهای مختلف موجود در خاک دریایی غیراشباع، در این مورد خاص یعنی 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 مغزه-گیری‌های پروژه مذکور بدست آمده است را در شکل ۱ مشاهده می‌کنید.

فرمولاسیون و روش حل مدل عددی

از آنجا که بسیاری از معادلات حاکم بر پدیده مورد مطالعه بصورت کوبله 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 تغییرشکل پذیر می‌باشد، در نظر گرفته شود. 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، 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 پیژوکن بر مبنای تئوری cavity expansion و با استفاده از مدل عددی مناسب که توسط گتیمیری (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. همچنین تئوری Philip و de Vries برای در نظر گرفته اثر تغییرشکل خاک بر روی انتقال حرارت و سیال تغییر یافته است. معادلاتی که باید استخراج و بصورت کوبله حل شوند در ادامه توضیح داده می‌شوند.

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:

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

که D_T ضریب دیفیوژن رطوبت با در نظر گرفتن اثر حرارت، D_θ ضریب دیفیوژن رطوبت در حالت همدما 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 ρ_m مقدار چگالی رطوبت را نشان می‌دهد.

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

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

$$K_w = K_n \cdot 10^{2.25} \cdot \left(\frac{S_r - S_{rk}}{1 - S_{rk}} \right)^4 \cdot \left[\frac{\mu_w(T_r)}{\mu_w(T)} \right] \quad (4)$$

معادلات فاز گاز

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

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



ضریب نفوذپذیری گاز برابر است با:

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} [n \rho_g (1 - S_r + H S_r)] = -div(\rho_g V_g) - div(\rho_g H U) + \rho_v div V \quad (7)$$

با جایگذاری در معادله (۷) می‌توان روابط حاوی سرعت سیال، بخار و گاز را در گرادین‌های 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:

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

قانون بقاء انرژی در این محیط عبارت است از:

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

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

معادلات اسکلت جامد خاک

معادله تعادل برای اسکلت جامد خاک به صورت 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:

$$d(\sigma_{ij} - \delta_{ij} p_g) = D dz - F d(p_g - p_w) - C dT \quad (11)$$

که در معادله فوق پارامترها بصورت زیر می‌باشند:

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

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

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 (۱۹۶۸) و Gatmiri (۱۹۹۷) ارائه گردید، سطح حالت نشانه خلاء با قانون رفتاری هیپربولیک (مدل Duncan-Chen) سازگار می‌باشد.

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

سطح حالت درجه اشباع در حالت غیرهمدما

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

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

که a_s , b_s , c_s و d_s ضرایب ثابت 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 θ -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.

$$A(u) = 0 \quad (16)$$

$$B(u) = 0 \quad (16)$$

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 --- از لحاظ ریاضی مجموع معادله فوق می‌باشد.

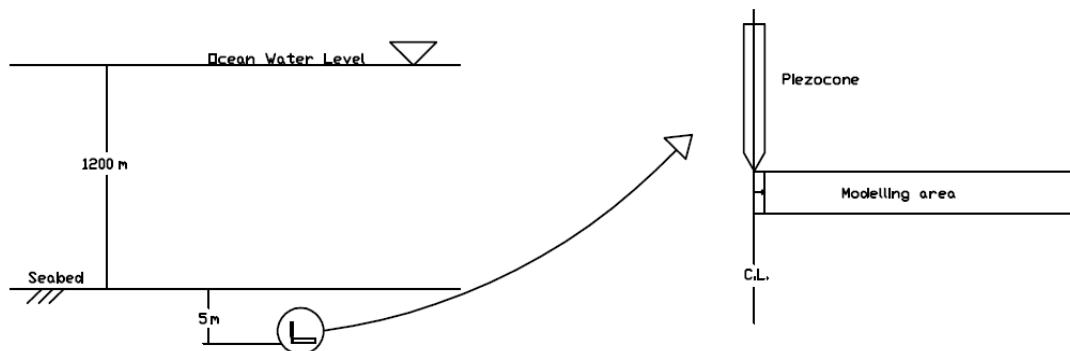
$$\int_{\Omega} \omega^T A(u) d\Omega + \int_{\Gamma} \omega^T A(u) d\Gamma = 0 \quad \forall \omega, \varpi \quad (17)$$

ω, ϖ توابع وزن هستند. در این رویکرد از روش گالرکین استفاده شده است که در آن توابع وزن همان توابع درون‌یابی (N) می‌باشند. برای جداسازی معادلات در مکان از الگوریتم اجزاء محدود استفاده شده است. 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، مستطیلی ۴ گره ای در نظر گرفته شده اند. ساختار نهایی جداسازی شده معادلات در مکان و زمان به شکل زیر است.

$$\begin{bmatrix} [R] & [C_T] & [C_W] & [C_G] \\ [C_{TW}] & [C_{TT}] + \beta \Delta t [K_{TT}] & [C_{TW}] + \beta \Delta t [K_{TW}] & [C_{TG}] + \beta \Delta t [K_{TG}] \\ [C_{WW}] & -[C_{WT}] + \beta \Delta t [K_{WT}] & -[C_{WW}] + \beta \Delta t [K_{WW}] & -[C_{WG}] + 0 \\ [C_{GW}] & [C_{GT}] + \beta \Delta t [K_{GT}] & [C_{GW}] + \beta \Delta t [K_{GW}] & [C_{GG}] + \beta \Delta t [K_{GG}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta T \\ \Delta P_w \\ \Delta P_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F_T \\ \beta \Delta t \Delta F_T \\ \beta \Delta t \Delta F_w \\ -\beta \Delta t \Delta F_g \end{Bmatrix} + \Delta T \begin{Bmatrix} F_{T0} - [K_{TT}]T_0 - [K_{TW}]P_{w0} - [K_{TG}]P_{g0} \\ F_{W0} - [K_{WT}]T_0 - [K_{WW}]P_{w0} \\ F_{G0} - [K_{GT}]T_0 - [K_{GW}]P_{w0} - [K_{GG}]P_{g0} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

تحلیل مدل و نتایج بدست آمده

بارگذاری مدل نفوذ پیزوکن در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول باید شرایط تنشهای محیطی در عمق متری بستر دریا شبیه‌سازی گردد. وضعیت مدل ترسیمی در بستر دریا در شکل ۲ نشان داده شده است. سپس در مرحله بعد می‌توان تنش جانبی را به مدل وارد کرد که این تنشها نمایانگر نفوذ پیزوکن در خاک می‌باشند.



شکل ۲- موقعیت المان مدل‌سازی شده در خاک بستر دریا

**خصوصیات مکانیکی مدل**

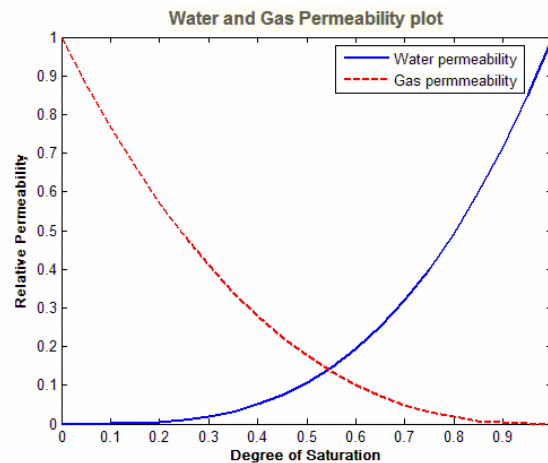
پارامترهای مکانیکی این مدل غیرخطی در جدول ۱ آورده شده است. همچنین پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی خاک در جدول ۲ ذکر شده است. منحنی نفوذپذیری نسبی آب و گاز نیز در شکل شماره ۳ ترسیم شده است.

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

۱۶۷۰	ضریب مدول بارگذاری خاک	K_1
۱۶۷۰	ضریب مدول باربرداری خاک	K_u
۳۲۰۰	ضریب در رابطه مدول بالک	K_b
۰/۷۵	ضریب ثابت	R_f
۰/۶	توان رابطه بارگذاری و باربرداری	n
۰/۴	توان در رابطه مدول بالک	m

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی خاک

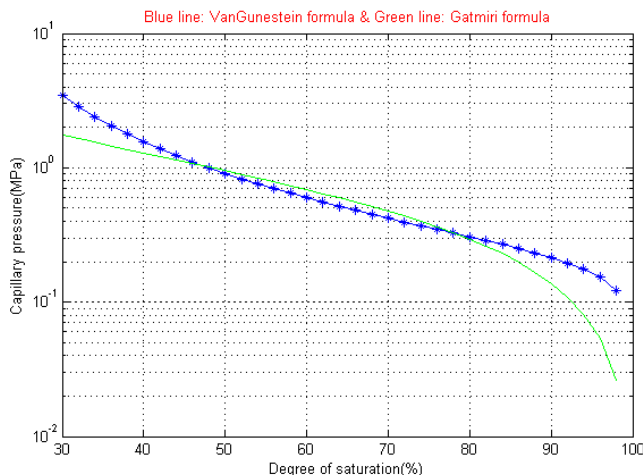
پارامتر ضریب- نفوذپذیری	ظرفیت گرمای ویژه	ضریب هدایت گرمایی	فاز مربوطه
---	۹۲۰	۲,۵	اسکلت جامد خاک
$۰/۱۲ * ۱۰^{-۱۶}$	۴۱۸۷	۰,۵۸	آب
$۰/۳۵ * ۱۰^{-۱۴}$	۱۰۰۰	۰,۰۳	گاز متان



شکل ۳- 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 شده است. نتایج کالیبراسیون فرمول ۱۵ و ضرایب بدست آمده به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۳ آورده شده است.



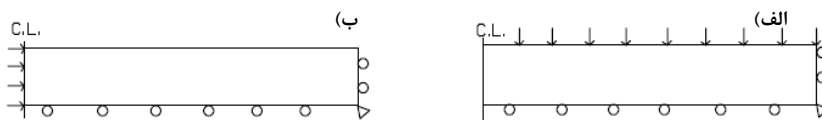
شکل ۴- نتیجه کالیبراسیون سطح حالت درجه اشباع (منحنی آبی رنگ حاوی مقادیر نمونه های آزمایشگاهی و منحنی سبز نتیجه کالیبراسیون مدل پیشنهادی گتمیری)

جدول ۳- پارامترهای مکانیکی مورد استفاده برای بیان سطح حالت درجه اشباع و سطح حالت تخلخل

a_s	ضریب ثابت در فرمول ۱۵	
b_s	ضریب ثابت در فرمول ۱۵	0.15×10^{-7}
c_s	ضریب ثابت در فرمول ۱۵	0.16×10^{-6}
d_s	ضریب ثابت در فرمول ۱۵	0.16×10^{-2}
a_e	ضریب ثابت در فرمول ۱۴	۰/۵
b_e	ضریب ثابت در فرمول ۱۴	0.15×10^{-3}
c_e	ضریب ثابت در فرمول ۱۴	0.19×10^{-6}

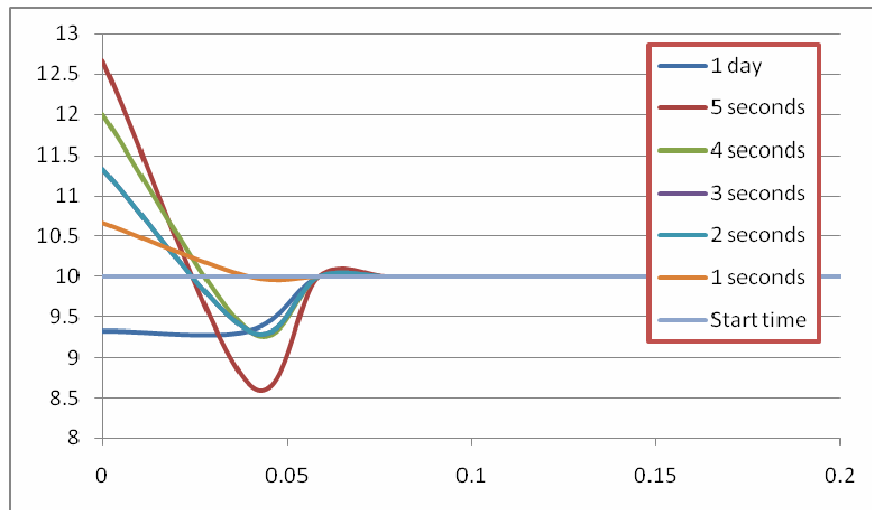
شرایط اولیه و شرایط مرزی

دمای اولیه برای کل محدوده مدل سازی با توجه به شرایط حرارتی بستر دریا برابر با ۵ درجه سانتیگراد فرض شده است. همچنین مقدار مکش اولیه در این محدوده برابر با 10KPa در نظر گرفته شده است. ضخامت مدل 2cm و طول آن 1m در نظر گرفته شده است.



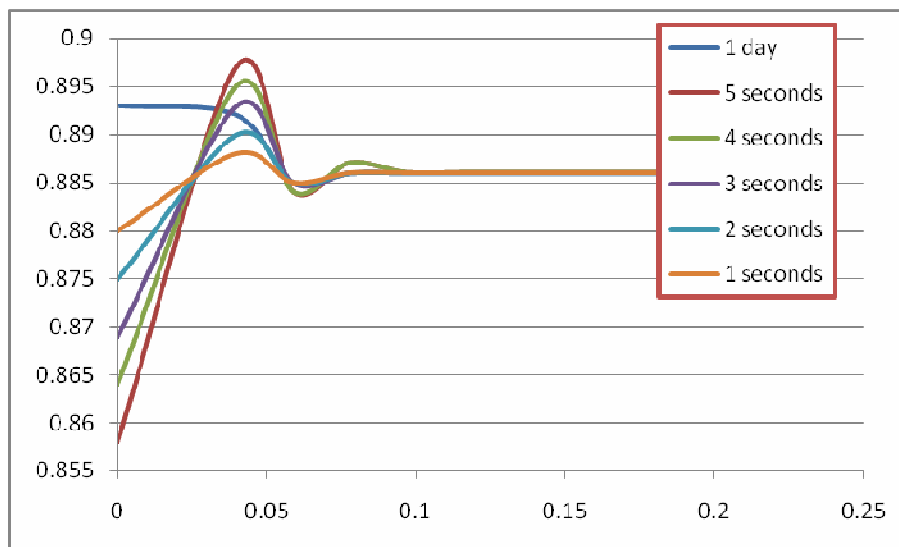
شکل ۵- الف) محدوده مدل سازی در مرحله اول، ب) محدوده مدل سازی در مرحله دوم

همانطور که در شکل ۵-الف مشاهده می شود در مرحله اول مدل سازی با اعمال شرایط مرزی مناسب، سرباری معادل ستون آب بالای المان (که برابر با عمق آب دریا می باشد) و علاوه وزن خاک بالای المان مورد بررسی وارد می گردد. تنش های واقعی موجود در المان خاک با در نظر گرفتن شرایط محیطی موجود در این مرحله از بارگذاری ایجاد می گردند. نتایج این مدل برای استفاده در مرحله دوم بارگذاری استفاده می گردد. در مرحله دوم بارگذاری که مرحله اصلی نیز می باشد (شکل ۵-ب)، با استفاده از تئوری cavity expansion، بار جانبی متناظر با فشار پیروزکن در حین نفوذ از سمت چپ وارد می گردد. با توجه به اینکه مدل عددی مورد استفاده دارای تقارن محوری می باشد، مختصات اولین ستون از گره های تعریف شده برای مدل، برابر با $0.1 * r$ قرار داده می شود که r برابر با شعاع پیروزکن استاندارد (1.78 cm) است. با توجه به سرعت نفوذ پیروزکن که معمولاً برابر با 2 cm/s می باشد، بار جانبی طوری کالیبره می گردد که مرز جانبی مدل در مدت زمان ۱ ثانیه به حداکثر جابجایی مورد نظر یعنی $r=1.78$ cm برسد. بدین ترتیب شرایط جابجایی پدیده مورد بررسی ارضاء شده است و می توان به بررسی توزیع مکش و درجه اشباع در نواحی مجاور منطقه نفوذ پیروزکن پرداخت.



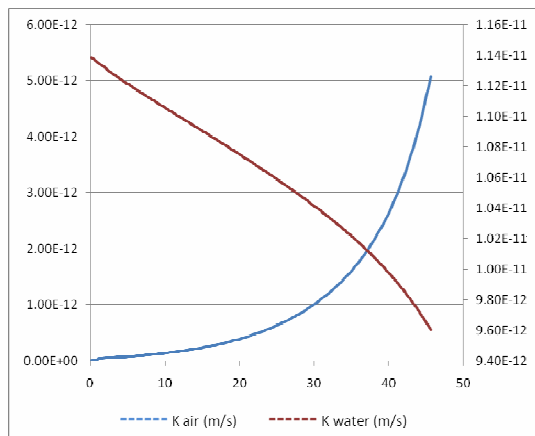
شکل ۶- تغییرات مکش با زمان در فواصل مختلف از محور تقارن (محور عمودی مقدار مکش بر حسب KPa و محور افقی فاصله بر حسب متر است).

همانطور که در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد، در ابتدای اعمال بار جانبی مقدار مکش در روی مرز و یا همان محور تقارن افزایش پیدا می‌کند ولی در فواصل دورتر از محور شاهد کاهش این پارامتر هستیم. همچنین از حدود 10 سانتی متری محور، گره‌ها تحت تاثیر اضافه مکش قرار نمی‌گیرند. بطور کلی به نظر می‌رسد که با اعمال اضافه فشار جانبی در مرحله اول اضافه فشار آب و هوای حفره‌ای بوجود می‌آید که مقدار اضافه فشار هوای حفره‌ای بیشتر از اضافه فشار آب حفره‌ای است. به همین خاطر مقدار اضافه مکش مثبت است. اما بعد از گذشت زمان به علت پدیده تحکیم ابتدا فشار هوای حفره‌ای و سپس فشار آب حفره‌ای زائل می‌گردد.



شکل ۷- تغییرات درجه اشباع در فواصل مختلف از محور تقارن مدل

این منحنی (شکل ۷) کاملاً رفتار اندرکنشی مدل را نمایش می‌دهد. بدین صورت که با افزایش مکش در نمودار (۶) مقدار درجه اشباع کاهش می‌یابد. برای دستیابی به چنین تطابقی می‌بایست ضرایب نفوذپذیری آب و هوای حفره‌ای گاز دارای اندرکنش متقابل باشند که در شکل زیر این مساله مشاهده می‌شود.



شکل ۸ - تغییرات ضرایب نفوذپذیری آب و هوا در طول زمان (بر حسب متر بر ثانیه)

نتیجه گیری

مهمترین هدف این مطالعه مدلسازی نفوذ پیروزکن در خاک غیر اشباع و همچنین مطالعه رفتار هیدرومکانیکی خاک در حین این فرایند بوده است. این خواسته با بکارگیری برنامه عددی θ -stock انجام شده است. پارامترهای مستقل در این راستا، مکش و تنش نرمال خالص بوده اند. روند نزولی نشان داده شده در شکل ۵ بیانگر تغییرات مکش در مکان و زمان می باشد.

قدردانی

درانتها از آقای Nabil Sultan از موسسه Ifremer فرانسه بخاطر همفکری سازنده و در اختیار قرار دادن نتایج آزمایشات میدانی موردنیاز تشکر می-گردد.

مراجع

1. Gatmiri, B., Seyedi, M., Delage, P., Fry, J.J., (1997) A new suction-based mathematical model for thermohygro-mechanical behaviour of unsaturated porous media. NUMOG VI, Montreal, Canada.
2. Sultan N., Voisset M., Marsset T, Vernant A.M., Cauquil E.(2007) Detection of free gas hydrate based on 3D seismic data and cone penetration testing: An example from the Nigerian Continental Slope, *Marine Geology*, 240, page 235-255
3. Matyas, E.L., Radhakrishna, R.S., 1968. Volume change characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique* 18 (4), 432-448.
4. Gatmiri, B., (1997) Analysis of fully coupled behavior of unsaturated porous media under stress, suction and temperature gradient. *CERMES, Final report* (1997)
5. Vanoudheusden E., Sultan N. and Cochonat P.(2004) Mechanical behaviour of unsaturated marine sediments: experimental and theoretical approaches, *Marine Geology*, 213(1-4) : 323-342
6. Yu H.S., Mitchell J.K. , Analysis of cone resistance: Review of Methods (1998), *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol 124 No.2 page 140-149