



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۲۳ تا ۳۴
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 23-34



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

AmirKabir Journal of Science & Research
Civil and Environmental Engineering
(ASJR-CEE)

تحلیل همبسته ترموهیدرومکانیکی شکست در محیط متخلخل غیر اشباع

مرضیه فتحعلیخانی^۱، بهروز گتمیری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری عمران، گرایش مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی دانشگاه تهران
۲- استاد، دانشکده فنی، عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختهای عمرانی دانشکده مهندسی عمران پردیس دانشکده های فنی،
دانشگاه تهران (استاد، دانشگاه پل و راه پاریس)

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۰۵، پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۲۴)

چکیده

در این مقاله چهارچوب تئوریک یک مدل شکست ترموهیدرومکانیکی (مدل شکست THHMD) برای محیط متخلخل غیراشباع غیرهمدم ارائه شده است. چهارچوب این مدل بر اساس استفاده از متغیرهای حالت مستقل (تنش خالص، مکش و تنش حرارتی) است. قانون رفتاری شکست از مفاهیم میکرومکانیکی و توضیح پدیده‌ای نشات گرفته است. روابط مزدوج ترمودینامیکی تنش- کرنش از انرژی آزاد که جمع انرژی‌های تغییرشکل الاستیک شکست و پتانسیل‌های کرنش باقی‌مانده است گرفته شده است. سختی‌های مکانیکی شکست با اعمال اصل انرژی الاستیک معادل (PEEE) برای هر متغیر حالت تنش محاسبه می‌شود. اثر شکست بر انتقالات آب و بخار با معرفی نفوذپذیری ذاتی ناشی از شکست اعمال شده است. مدل THHMD شکست در برنامه المان محدود θ -Stock وارد شده است. در این مقاله پس از توضیحات مدل گفته شده یک مطالعه عددی برای بررسی اثرات ناحیه شکسته ناشی از حفاری (EDZ) به پاسخ مدفن زباله‌های اتمی در طول فاز حرارت دهی صورت گرفته است. روند مشاهده شده با انتظارات تئوریک تطابق مناسبی دارد.

کلمات کلیدی:

خاک غیراشباع، مدل ترموهیدرومکانیکی شکست، محیط متخلخل چندفاز، روش المان محدود، میکرومکانیک

۱- مقدمه

کاملاً همبسته برای محیط متخلخل غیر اشباع است که در نرم افزار المان محدود θ -Stock، نوشته شده است [۱]، [۲]، [۳]، [۴]، [۵]. این مدل برای ارائه ترکیبی از اثرات مکانیکی، موئینگی و ترک خوردگی حرارتی طراحی شده است. صحت سنجی این مدل قبلاً انجام شده است [۶]، [۷]. در این مطالعه پس از بررسی روابط تئوریک، نتایج حاصل از مدل سازی عددی در مدل THHMD به منظور تعیین عوامل تاثیرگذار در تولید شکست بحث شده است.

۲- برنامه المان محدود θ -stock

θ -Stock، یک کد المان محدود به زبان فرترن به منظور محاسبات ترموهیدرومکانیکی محیط متخلخل چندفازه است. این برنامه می تواند پاسخ خاک را در سه حوزه خشک، اشباع و غیر اشباع به صورت مستقل و یا با هم تحت بارگذاری های مکانیکی و حرارتی تحلیل نماید [۸]. این برنامه توانایی حل مسائل را در دو حالت کرنش مسطح و مقارن محوری دارد. این برنامه شامل تعداد زیادی زیربرنامه است که پس از خواندن ورودی ها، تنش ها و مکش های اولیه محاسبه می شود و سپس بارگذاری اعمال می شود. با محاسبه ماتریس سختی کلی، یکسری محاسبات تکرارشونده صورت می گیرد. بعد از حل معادلات نهایی، محاسبات ثانویه صورت می گیرد. معادلات رفتاری مختلفی برای خاک های خشک، اشباع و غیر اشباع در این برنامه وارد شده است. در حوزه غیر اشباع علاوه بر مدل شکست که در این مقاله آورده شده است، مدل خطی الاستیک، مدل جدید غیرخطی ارائه شده توسط گتمیری و همکاران [۷] و گتمیری [۸]، مدل ترموالاستوپلاستیک که بسط حرارتی مدل BBM (Basic Barcelona Model) است نیز در برنامه وارد شده است.

۳- روابط تئوریک مدل

مدل سازی شکست نقطه دشواری در مطالعه ناحیه شکسته ناشی از حفاری (EDZ) است [۹]، [۱۰]. تفاوت های اساسی بین مدل های جریان در تعداد محیط ها ی شامل شده و نیز در تبادل سیال بین محیط ها است. مدل های میکرومکانیکی شکست هدف ارائه اثر شکست که پدیده ای در مقیاس میکروسکوپی است را بر رفتار مصالح در مقیاس ماکروسکوپی (یا حداقل در مقیاس مزو در REV) دارند مدل های توضیح پدیده ای با استفاده از عبارات های ترمودینامیکی بیان می شوند [۱۱]. این چهارچوب نسبت به تئوری های میکرومکانیکی بسیار انتزاعی تر است، اما برقراری سازگاری ترمودینامیکی فرمولاسیون راحت تر است.

۳-۱- ارائه شکست

۳-۱-۱- مفهوم میکرومکانیکی تانسور شکست

فرض می شود که حجم پایه شاهد (RVE) شامل شبکه ای از میکروترک بدون اندرکنش است. اگر RVE با N میکرو ترک شکسته شود، تغییرات انرژی تغییر شکل الاستیک به صورت رابطه ی (۱) است [۱۲]، [۱۳]:

لزوم مطالعات خاک های غیر اشباع با توجه به آب و هوای خشک و یا نیمه خشک حاکم بر قسمت های مختلف کره زمین که خاک در معرض سیکل های مختلف خشک و تر شدن قرار دارد، حاصل می شود. اثرات حرارت بر روی خاک سبب تغییر در ویژگی های هیدرولیکی و مکانیکی و همبستگی این اثرات می شود. از کاربردهای آن می توان به استخراج انرژی گرمایی زمین، مطالعه اثر دوره های سرد شدن-گرم شدن متوالی بر روی لایه های راه ها و جاده ها، دفن کابل های فشار قوی در خاک و نیز دفن زباله های اتمی اشاره کرد. در حال حاضر ایمن ترین روش برای دفن زباله های اتمی، دفن در اعماق زمین و سازندهای سنگی است. برای کاهش اثرات حرارت بر محیط اطراف مدفن، محافظی رسی در اطراف چاه های دفن احداث می شود. بررسی اثرات حرارت بر این محافظ که مانع مهندسی نام دارد و همین طور اثر آن بر روی سازند سنگی ساختگاه دفن زباله که مانع طبیعی نامیده می شود، اهمیت ویژه ای دارد [۱].

در طی مرحله حفاری، منطقه ای که اطراف گالری های ذخیره سازی آسیب می بیند (EDZ) اهمیت ویژه ای می یابد. در طی عملیات حفاری، آب به سمت حفره زهکشی می شود که در طی این فرآیند شبکه ترک ها گسترش می یابد و در نتیجه نفوذپذیری افزایش خواهد یافت. پس از ساخت تکیه گاه، آب پشت بتن باقی می ماند و سبب اشباع شدن خاک اطراف گالری می شود و به پشت مانع، فشاری وارد می شود بدین ترتیب جهت جریان در توده خاک عکس می شود. هم چنین جریان آب منجر به نشست کانی های موجود در توده رس پلاستیک در مسیر جریان (ترک ها) شده که این فرآیند نیز سبب افزایش نفوذپذیری محیط می شود. پس از قرارگیری زباله ها داخل مخزن، حرارت حاصله تولید مکش می نماید، باز توزیع تنش های حاصل از آن باعث ایجاد ترک های مجدد در مانع می شود. پس از کاهش درجه حرارت در محیط خاکی، مکش کاهش می یابد و درجه اشباع افزایش می یابد [۱].

این مطالعه به سبب ضرورت پیش بینی رفتار EDZ (ناحیه ترک خورده ناشی از حفاری) اطراف مخازن دفن زباله های اتمی انجام شده است. مانع های طبیعی که معمولاً از مصالح نیمه شکننده، مانند گرانیت و سنگ رس هستند، در طول فاز حفاری متحمل شکست می شوند. برهم کنش های میکرومکانیکی، در همسایگی مانع های مهندسی که عموماً از رس متراکم غیر اشباع تشکیل شده است، رخ می دهد. ناحیه شکسته شده ناشی از حفاری (EDZ) تولید شده در چنین مصالحی به منظور طراحی امکانات زیرزمینی امن باید مورد بررسی قرار گیرند. سنگ های متخلخل میزبان دارای سیالات حفره ای مختلف هستند که مسائل مهندسی را بسیار پیچیده می کند و اثرات موئینگی رفتار سنگ رس را تغییر می دهد. به علاوه گرادیان های حرارتی باعث تغییر فاز می شود که سینماتیک انتقال را تحت تاثیر قرار می دهد. زباله های اتمی منبع حرارتی هستند که می توانند سبب باز توزیع تنش شوند و در نتیجه تولید ترک نمایند. مدل ترموهیدرومکانیکی شکست THHMD، مدلی

با پیروی از روش مدل سازی گتمبری [۱]، [۳]، [۴] فرض شده است که پدیده های موئینگی و حرارتی ایزوتروپیک هستند و با متغیرهای حالت تنش مستقل (به ترتیب، مکش s و تنش حرارتی p_T) کنترل می شوند. تنش خالص و مکش به ترتیب به صورت $\sigma_{ij} = p_a \delta_{ij}$ و $s = p_a - p_w$ تعریف می شوند که در آن σ_{ij} تانسور تنش کل و δ_{ij} تانسور واحد مرتبه دوم، فشار آب حفره ای و p_a فشار هوای حفره ای است. تنش خالص، مکش و تنش حرارتی متغیرهای حالت تنش مستقل هستند و تانسور کرنش به سه مولفه تقسیم می شود که هر یک به صورت ترمودینامیکی با یکی از متغیرهای حالت تنش مذکور مزدوج هستند. با فرض این که هر سهم کرنش دارای دو مولفه الاستیک و غیرالاستیک مرتبط با شکست است، در نتیجه:

$$d\varepsilon_{ij} = (d\varepsilon_{Mij}^e + d\varepsilon_{Mij}^d) + \frac{1}{3}(d\varepsilon_{Sv}^e + d\varepsilon_{Sv}^d)\delta_{ij} + \frac{1}{3}(d\varepsilon_{Tv}^e + d\varepsilon_{Tv}^d)\delta_{ij} \quad (7)$$

زیرنویس های S، M و T به ترتیب مربوط به مزدوج های ترمودینامیکی تنش خالص، مکش و تنش حرارتی هستند. انرژی آزاد استفاده شده توسط دراگون^۲ و همکارانش برای مصالح شکسته خشک [۱۷]، به محیط چندفازه تعمیم و بسط داده شده است:

$$\Psi_s(\varepsilon_{Mij}, \varepsilon_{Sv}, \varepsilon_{Tv}, \Omega_{ij}) = \frac{1}{2}\varepsilon_{Mji} : D_{eijkl}(\Omega_{ij}) : \varepsilon_{Mlk} + \frac{1}{2}\varepsilon_{Sv}\beta_s(\Omega_{ij})\varepsilon_{Sv} + \frac{1}{2}\varepsilon_{Tv}\beta_T(\Omega_{ij})\varepsilon_{Tv} - g_M \Omega_{ij} \varepsilon_{Mji} - \frac{g_S}{3}\delta_{ij}\Omega_{ji} - \frac{g_T}{3}\delta_{ij}\Omega_{ji} \quad (8)$$

سه جمله اول رابطه بالا به ترتیب انرژی های الاستیک زوال یافته مکانیکی، موئینگی و حرارتی هستند که به ترتیب به سختی های شکست مکانیکی $(D_{eijkl}(\Omega_{ij}))$ ، موئینگی $(\beta_s(\Omega_{ij}))$ و حرارتی $(\beta_T(\Omega_{ij}))$ وابسته هستند. سه ترم آخر رابطه فوق پتانسیل های ترک باقی مانده هستند که بازشدگی های باقی مانده ایجاد شده به سبب ترک بعد از باربرداری را کمی می نمایند. g_M ، g_S و g_T عوامل اسکالر مصالح شبیه به سختی هستند. با مشتق گیری از انرژی آزاد $\Psi_s(\varepsilon_{Mij}, \varepsilon_{Sv}, \varepsilon_{Tv}, \Omega_{ij})$ تمامی روابط تنش - کرنش بدست می آیند. تنش شکست Y_d که با عامل شکست مزدوج است، عبارت است از:

$$Y_{dij} = -\frac{1}{2}\varepsilon_{Mmn} \frac{\partial D_{e nmij}(\Omega_{kl})}{\partial \Omega_{qp}} \varepsilon_{Mpq} - \frac{1}{2}\varepsilon_{Sv} \frac{\partial \beta_s(\Omega_{kl})}{\partial \Omega_{ij}} \varepsilon_{Sv} - \frac{1}{2}\varepsilon_{Tv} \frac{\partial \beta_T(\Omega_{kl})}{\partial \Omega_{ij}} \varepsilon_{Tv} + g_M \varepsilon_{Mij} + \frac{g_S}{3}\varepsilon_{Sv}\delta_{ij} + \frac{g_T}{3}\varepsilon_{Tv}\delta_{ij} \quad (9)$$

$$\Delta W^e = \frac{1}{2V_{REV}} \sum_{k=1}^N n^k \cdot \sigma \cdot \langle b^k \rangle S^k \quad (1)$$

که در آن s^k و n^k به ترتیب سطح k -امین ترک و بردار نرمال صفحه ترک هستند. V_{REV} حجم المان شاهد است و σ_{ij} تانسور تنش کوشی است. $\langle b^k \rangle$ جابجایی بازشدگی ترک k -ام است. در سه بعد، بازشدگی ترک دارای دو مولفه برشی است. در نتیجه تانسور میکروتُرک متناظر شامل جمله های درجه چهار است. با این وجود از سهم برشی تانسور تنش می توان صرف نظر کرد [۱۴]. از تانسور چگالی ترک مرتبه دو به منظور نمایش ترک در این مدل استفاده می شود. این تانسور به فرم پایه ای خود به شکل رابطه ی (۲) بیان می شود:

$$\Omega_{ij} = \sum_{k=1}^3 d^k n_i^k n_j^k \quad (2)$$

فرض شده است که تنش و شکست دارای جهات اصلی یکسان هستند. به صورت فیزیکی رفتار حجم شاهد شکسته شده توسط سه مزوترک که نشانگر سه دسته اصلی ترک ها هستند بیان می شود. هر مزوترک با یک جهت Π^k (عمود بر صفحه ترک) و نسبت حجمی d^k مشخص می شود. با فرض این که ترک ها سکه ای شکل به شعاع l^k و ضخامت e^k هستند، رابطه (۳) حاصل می شود:

$$d^k = \frac{1}{V_{REV}} e^k \pi (l^k)^2 \quad (3)$$

شعاع و سختی ترک به صورت زیر توسط یک رابطه اتساع خطی (۴) به هم مرتبط می شوند:

$$de(\underline{n}) = \chi dr(\underline{n}) \quad (4)$$

که در سنگ های شکننده $\chi = 0.005$ است [۱۵]، [۱۳].

۳-۱-۲- حالت مکانیکی معادل مصالح شکسته

در حالت مکانیکی واقعی، فرض شده است که N میکروتُرک در حجم شاهد تحت اثر N میکروتُنش متناظر τ_i ، به وجود آید. با پیروی از رویکرد اسوبودا و یانگ [۱۶]، فرض شده است که یک ماده شکسته به صورت حالت مکانیکی معادل که در آن ماده به صورت دست نخورده تحت مزد-تنش معادل مرتبط با ترک است $\tilde{\tau}$ ، در نظر گرفته می شود:

$$\tilde{\tau} = \sum_{k=1}^N \tau_i \quad (5)$$

تنش اعمالی به حجم پایه شاهد RVE خشک هم دما در حالت مکانیکی معادل، جمع تنش میدان دور واقعی σ و تنش معادل مرتبط با ترک $\tilde{\tau}$ است:

$$\tilde{\sigma} = \sigma + \tilde{\tau} \quad (6)$$

تنش معادل $\tilde{\sigma}$ توسط پتانسیل الاستیک شکست $\Psi_e(\tilde{\sigma}, \Omega)$ به صورت ترمودینامیکی با کرنش های کلی معادل مزدوج است، در حالی که تنش واقعی σ توسط انرژی آزاد هلمهولتز $\Psi_s(\sigma, \Omega)$ با کرنش های واقعی مزدوج است.

۳-۲- رویکرد توضیح پدیده ای^۱

$$\beta_T(\Omega_{pq}) = \frac{9\beta_r^0}{[(\delta - \Omega)_{ij}^{-1} \delta_{ji}]^2}$$

$$\beta_T^*(p, T, \Omega_{rs}) = \frac{9\beta_r^{*0}(p, T)}{[(\delta - \Omega)_{ij}^{-1} \delta_{ji}]^2} \quad (13)$$

که در آن β_T^0 و β_s^0 ، D_{eijkl}^0 به ترتیب تانسور سختی مکانیکی، مدول موئینگی دست نخورده و مدول حرارتی دست نخورده هستند [۱۲]، [۱۳].

۳-۳-۴ قوانین انتقال

جریان آب مایع از قانون دارسی تعمیم یافته و قوانین انتقال بخار از کارهای فلیپ و دوری الهام گرفته شده است:

$$V_w = -\frac{\Psi_R(\theta_w)}{\sigma(T_{ref})} \frac{d\sigma(T)}{dT} K_w \cdot \nabla(T) + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\sigma(T)}{\sigma(T_{ref})} K_w \cdot \nabla(s) - K_w \cdot \nabla(z) \quad (15)$$

$$V_{vap}^* = \frac{\rho_{vap}}{\rho_w} V_{vap} = -D_{Tvap} \nabla(T) + D_{Pvap} \nabla(s) \quad (16)$$

که در این رابطه V_w^* و V_{vap}^* به ترتیب به سرعت های نسبی آب مایع و بخار برمی گردند. Ψ_R که به محتوای حجمی مایع θ_w وابسته است، دارای بعد هد فشار (با واحد متر) است و در دمای مرجع T_{ref} محاسبه می شود: $\Psi_R(\theta_w) = (p_w - p_a) / \gamma_w \cdot \sigma(T)$ (واحد $J \cdot m^{-2}$). D_{Pvap} و D_{Tvap} به ترتیب، نفوذپذیری های بخار موئینگی و حرارتی هستند. تنها نفوذپذیری ذاتی آب $k_{int}(n, \Omega_{ij})$ که تابعی از n است، بستگی به رفتار اسکلت جامد دارد:

$$K_{w,ij} = k_T(T) k_r(S_w) K_{int,ij}(n, \Omega_{pq}) \quad (17)$$

نفوذپذیری های نسبی حرارتی $k_T(T)$ و موئینگی $k_r(S_w)$ به حرارت و رفتار مایع حفره ای وابسته هستند:

$$k_T(T) = \frac{\mu_w(T)}{\mu_w(T_{ref})}$$

$$k_r(S_w) = \left(\frac{S_w - S_{w,r}}{1 - S_{w,r}} \right)^3 \quad (18)$$

که در آن $\mu_w(T)$ ، ویسکوزیته دینامیکی آب مایع و $S_{w,r}$ درجه اشباع آب باقی مانده است. S_w شامل سطح حالت ترموهیدرولیک است که با ترکیب مفهوم توزیع فضایی حفرات زنگ-شکل استفاده شده توسط وان گنختن^۴ [۱۹] و فرض نمایی بودن اثرات حرارت توسط گتمیری [۱]، تعریف می شود:

$$S_w = [(1 - S_{w,r})(1 + (\alpha_{VG} S)^{n_{VG}})^{-1 + \frac{1}{n_{VG}}} + S_{w,r}] \exp(d_s(T - T_0)) \quad \text{if } s \geq 0$$

$$S_w = 1 \quad \text{if } s < 0 \quad (14)$$

فرض شده است که تابع تسلیم شکست به قسمت مثبت عبارت $\frac{g_s}{3} \varepsilon_{Sv} \delta_{ij} + \frac{g_T}{3} \varepsilon_{Tv} \delta_{ij}$ وابسته است. متغیر ترمودینامیکی متناظر این عبارت، Y_{d1}^+ نامیده می شود. تابع تسلیم به صورت زیر تعریف می شود:

$$f_d(Y_{dij}, \Omega_{ij}) = \sqrt{\frac{1}{2} Y_{d1j}^+ Y_{d1j}^+} - C_0 - C_1 \delta_{ij} \Omega_{ji} \quad (10)$$

C_0 ، نرخ اولیه تنش شکست است که برای شروع شکست لازم است. نرخ افزایش شکست را کنترل می نماید. در این مدل قانون جریان متحد برقرار است.

۳-۳-۳ مفاهیم میکرومکانیکی مدل

فرض شده است که رابطه مستقل از شکست بین حرارت و تنش حرارتی به صورت رابطه ی (۱۱) باشد:

$$\left\{ \begin{aligned} d\varepsilon_{Tv}^e &= \frac{1}{\beta_T^*(p, T, \Omega_{ij})} dT \\ &= \frac{1}{\beta_T(\Omega_{ij})} dT \\ dp_T &= \frac{\beta_T(\Omega_{ij})}{\beta_T^*(p, T, \Omega_{ij})} dT \\ &= \frac{\beta_T^0}{\beta_T^{*0}(p, T)} dT \end{aligned} \right. \quad (11)$$

مدول حرارتی دست نخورده توسط رابطه گتمیری [۱۲] برای خاک های الاستیک غیرخطی به صورت رابطه ی (۱۲) بدست می آید:

$$\beta_T^{*0}(p, T) = \left[(\alpha_0^* + 2\alpha_2 \Delta T) + (\alpha_1 + 2\alpha_3 \Delta T) \ln\left(\frac{p}{p_{geo}}\right) \right]^{-1} \quad (12)$$

که در آن α_1 (با واحد $^{\circ}C^{-1}$)، α_2 (با واحد $^{\circ}C^{-2}$) و α_3 (با واحد $^{\circ}C^{-2}$) عوامل مصالح هستند. α_3^* (با واحد $^{\circ}C^{-1}$) ضریب اتساع حرارتی اسکلت است. فشار ژئواستاتیک است و متناظر با حالت تنش مصالح درانتهای فاز اشباع در دما و فشار معمول است.

مولفه های الاستیک تانسور کرنش با استفاده از سختی های $D_{eijkl}(\Omega_{ij})$ ، $\beta_s(\Omega_{ij})$ و $\beta_T(\Omega_{ij})$ محاسبه می شوند. متغیرهای حالت تنش مستقل شکست با استفاده از اپراتور مرتبه چهارم کوردبوا و سیدرف^۵ [۱۸] تعریف می شود، بدین ترتیب که اصل انرژی الاستیک معادل (PEEE) بر سه پتانسیل الاستیک $\varepsilon_{Mlk} : D_{eijkl}(\Omega_{ij}) : \varepsilon_{Mji}$ ، $\frac{1}{2} \varepsilon_{Sv} \beta_s(\Omega_{ij}) \varepsilon_{Sv}$ و $\frac{1}{2} \varepsilon_{Tv} \beta_T(\Omega_{ij}) \varepsilon_{Tv}$ و $\beta_T^*(p, T, \Omega_{ij})$ اعمال می شود. مدول حرارتی $\beta_T(\Omega_{ij})$ شکست از عبارت $\beta_T(\Omega_{ij})$ و از رابطه (۱۱) نتیجه می شود. سختی های شکست حاصله عبارتند از:

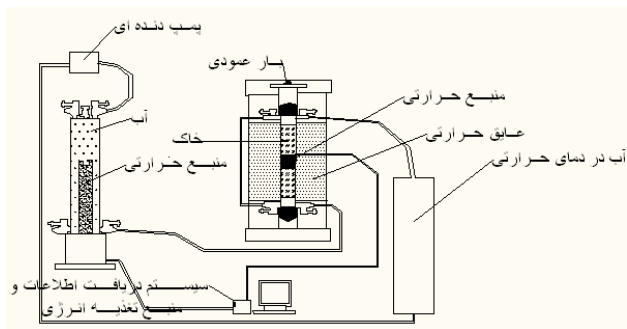
$$D_{eijkl}(\Omega_{pq}) = M(\Omega_{pq})_{ijnm}^{-1} D_{e mnst}^0 M(\Omega_{pq})_{tskl}^T$$

$$\beta_s(\Omega_{pq}) = \frac{9\beta_s^0}{[(\delta - \Omega)_{ij}^{-1} \delta_{ji}]^2}$$

نفوذپذیری‌های متناظر نسبت به حالت دست نخورده بدون تغییر باقی می‌ماند [۱۲]، [۱۶].

۴- مدل‌سازی عددی

نمونه مدل‌سازی شده شامل دو نمونه سیلندری بنتونیت به قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر است که بین آنها یک منبع حرارتی قرار گرفته است (شکل ۱). این مدل‌سازی از آزمایش پینتادو [۲۰] الهام گرفته شده است. در این آزمایش شار حرارتی کنترل شده‌ای در یک سر نمونه سیلندری اعمال می‌شود و سر دیگر در دمای ۳۰ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته می‌شود. نمونه در یک فوم جداکننده حرارتی که اجازه تغییر شکل را به نمونه می‌دهد و درصد حجمی آب را ثابت نگه می‌دارد، قرار داده شده است. پینتادو نمونه‌ها را به مدت یک هفته گرم کرده و سپس به مدت هفت هفته شار حرارتی قطع می‌شود و در واقع نمونه استراحت می‌کند. فشار هوای حفره‌ای همواره برابر فشار اتمسفر ثابت نگه داشته می‌شود. در شرایط اولیه درجه حرارت در نمونه برابر ۲۲ درجه سلسیوس است.



شکل ۱: نمایی از تجهیزات آزمایش حرارتی بنتونیت پینتادو

شکل (۱) تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در آزمایش پینتادو [۲۰] را نشان می‌دهد.

اساس آزمایش پینتادو مطالعه رفتار ترموهیدرولیک بنتونیت است که به عنوان پوشش در اطراف زباله‌های اتمی قرار می‌گیرد. برای انجام مطالعه شکست پشت مدفن زباله‌های اتمی، زمانی که زباله‌های اتمی در داخل گالری‌ها دفن شده‌اند و چاه دفن زباله بسته می‌شود، نمونه پینتادو در نظر گرفته شده است، چرا که امکان خروج هوا و رطوبت از محیط وجود ندارد و در این آزمایش و مدل‌سازی نیز شرایط مرزی $q_a = q_w = 0$ ، در نظر گرفته شده است. برای در نظر گرفتن اثرات فوم جداکننده حرارتی، جریان حرارتی صفر بر مرزهای خارجی نمونه اعمال می‌شود. مدل‌سازی صورت گرفته شامل نیمی از نمونه پایینی است. به علت تقارن در هندسه و بارگذاری (بنابر آزمایش پینتادو)، مدل‌سازی و محاسبات به صورت متقارن محوری صورت گرفته است. شبکه‌بندی نمونه شامل ۶۶ گره و ۵۰ المان است. شکل (۲) شرایط مرزی اعمال شده در مدل‌سازی را نشان می‌دهد. مدل‌سازی در دو گام صورت گرفته است:

مرحله بارگذاری حرارتی: به مدت یک هفته جریان ثابت گرما در بالای نمونه و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد بر روی مرزهای پایینی اعمال

نفوذپذیری ذاتی آب مایع به دو مولفه بازگشت‌پذیر و بازگشت‌ناپذیر تقسیم می‌شود. قسمت اول، جریان آب در ماتریس متخلخل شکسته قابل بازگشت را کمی می‌کند و قسمت دوم، جریان در شبکه مزو-ترک را کنترل می‌کند:

$$K_{int\ ij}(n, \Omega_{pq}) = k_{w0} 10^{\alpha_w e^{rev}} \delta_{ij} + k_{2ij}(n^{frac}, \Omega_{pq}) \quad (19)$$

k_{w0} نفوذپذیری آب مرجع در محیط متخلخل هم‌دمای اشباع (با واحد m/s) بوده و e^{rev} نسبت تخلخل بازگشت‌پذیر مصالح متخلخل شکسته است. با پیروی از رویکرد تیم تحقیقاتی شافو [۱۵]، $k_{2ij}(n^{frac}, \Omega_{pq})$ با فرض لایه‌ای بودن جریان در هر میکروتک محاسبه می‌شود. جریان به منظور بدست آوردن انتقالات آب در مزو-ترک‌ها در RVE شکسته شده همگن می‌شود:

$$k_{2ij}(n^{frac}, \Omega_{pq}) = \frac{\pi^{-2/3} \gamma_w}{12 \mu_w (T_{ref})} \chi^{4/3} b^2 \cdot \sum_{k=1}^3 (d^k)^{5/3} (\delta_{ij} - n_i^k n_j^k) \quad (20)$$

b نقش عامل طول داخلی را دارد که با دانستن $k_{2ij}(n^{frac}, \Omega_{pq})$ برای یک حالت شکست خورده مشخص که به صورت آزمایشگاهی قابل تعیین است، بدست می‌آید. در رابطه (۱۴)، D_{Tvap} و D_{Pvap} ، هر دو به نفوذپذیری ذاتی شکست بخار بستگی دارند که مانند نفوذپذیری ذاتی آب به صورت زیر به دو قسمت تقسیم می‌شوند:

$$D_{int,vap} = 1.024 D_0 n^{rev} + D_{int,vap2}(n^{frac}, \Omega_{rs}) \quad (21)$$

عامل طول داخلی دیگری به منظور محاسبه نفوذپذیری ذاتی شکست بخار $D_{int,vap2}(n^{frac}, \Omega_{rs})$ معرفی می‌شود. فرض می‌شود نفوذپذیری ذاتی شکست بخار به میانگین نفوذپذیری ذاتی شکست آب بستگی دارد:

$$D_{int,vap2}(n^{frac}, \Omega_{rs}) = \frac{b^*}{3} \delta_{ij} k_{2ij}(b^*, n^{frac}, \Omega_{rs}) \quad (22)$$

فرض شده است که جریان هوا انتشاری است:

$$V_a = -\frac{1}{\gamma_a} \frac{P_a + P_{atm}}{T + 273.15} K_a \cdot \nabla(T(x)) - K_a \cdot \nabla\left(\frac{P_a}{\gamma_a}\right) - K_a \cdot \nabla(z) \quad (23)$$

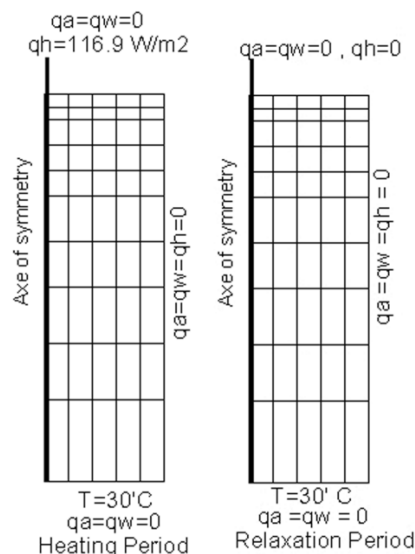
که نفوذپذیری هوا به نسبت تخلخل و درجه اشباع بستگی دارد:

$$K_a = c_a \frac{\gamma_a}{\mu_a} [e(1 - S_w)]^{\alpha_a} \delta \quad (24)$$

مانند مدل‌های قبلی گتمبری [۱]، [۳]، [۴]، انتقال گرما توسط انتشار، تبخیر و همرفت صورت می‌گیرد. فرض شده است که جریان‌ات انتشاری هوا و حرارت به سرعت با شبکه ترک خورده جهت‌گیری نماید. عبارات

(۴) تغییرات درجه اشباع را روی نمونه برای گراف E نشان می‌دهد. در این شکل به راحتی می‌توان حرکت رطوبت در نمونه را مشاهده نمود. شکل‌های (۵) تا (۹) میزان شکست را در نمونه‌های A, B, C, D, E نشان می‌دهند. با تغییر محدوده درجه اشباع به میزان ۰/۰۲۲ در نمونه A, ۰/۱۷۲ در نمونه B, ۰/۲۵۳ در نمونه C, ۰/۳۱۹ در نمونه D و ۰/۴۰۴ در نمونه E, میزان شکست در این نمونه‌ها به ترتیب، به میزان ۰/۱۵۹, ۰/۰۲۹, ۰/۰۳۴, ۰/۰۳۸ و ۰/۰۷ می‌رسد.

کرنش‌های حاصل از فرایند بارگذاری حرارتی ایزوتروپیک است و سبب ایجاد شکست ایزوتروپیک می‌شود. بنابراین عامل شکست و نفوذپذیری ایزوتروپیک هستند ($\Omega_{zz} = \Omega_{rr} = \Omega_{\theta\theta} = K_{zz} = K_{rr} = K_{\theta\theta}$). به منظور بررسی روند نفوذپذیری آب، تغییرات این عامل نسبت به درجه اشباع، دما و شکست، برای المانی نزدیک به منبع حرارتی (المان شماره ۲۲ که در شکل (۱۰) نمایش داده شده است) به ترتیب در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) رسم شده است. این المان که نزدیک منبع حرارتی است، در قسمت بالایی نمونه قرار دارد و با توجه به منحنی‌های نگهداشت آب (شکل ۳)، نمونه E خیس‌ترین نمونه و A خشک‌ترین نمونه می‌باشد. همان‌طور که



شکل ۲: شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل سازی

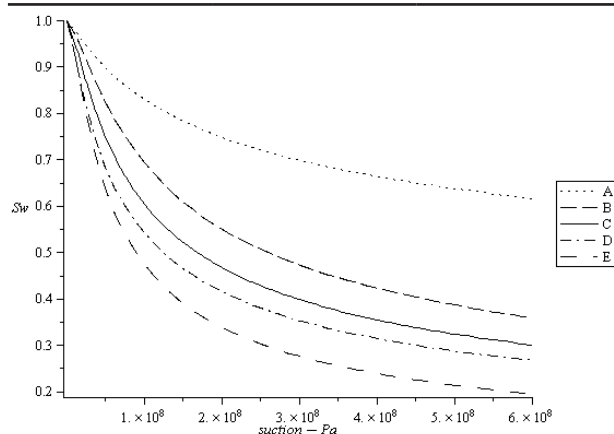
می‌شود. به منظور مدل کردن اثر لایه جداکننده حرارتی استفاده شده در آزمایش پینتادو شرایط آدیاباتیک روی وجوه جانبی خارجی اعمال می‌شود. مرزهای خارجی در برابر آب و هوا نفوذ ناپذیرند. مرحله استراحت (هفت هفته): جریان حرارتی صفر در بالای نمونه، دمای ثابت ۳۰ درجه سانتی گراد روی مرز پایینی و شرایط آدیاباتیک روی مرزهای جانبی خارجی اعمال می‌شود. مرزهای خارجی در برابر آب و هوا نفوذ ناپذیرند.

در مدل ارائه شده توسط پینتادو جنبه‌های مکانیکی در نظر گرفته نشده است. برای انتخاب عوامل مکانیکی مدل از عوامل رفتاری سنگ رس شرف فرانسه استفاده شده است. به کمک عوامل تعیین شده توسط هومان و شاقلی^۷ که عوامل واقعی و کالیبره شده هستند، می‌توان به نحوه‌ی شکست در بنتونیت پرداخت [۲۱]، [۲۲]. عامل اتساع برای مصالح ترد بنابر انتخاب شائو و همکاران برای سنگ ترد برابر ۰/۰۰۵ انتخاب می‌شود [۱۵]. با توجه به رابطه اندیس تخلخل برحسب مقادیر اولیه درجه اشباع و درصد آب ($e_0 = \frac{\theta_{w0}}{S_{w0} - \theta_{w0}}$) و با $\theta_{w0} = 0/1533$ و $e_0 = 0/63$ مقدار $S_{w0} = 0/322$ محاسبه می‌شود. با توجه به مدل سازی گروه جنز سختی حرارتی انتخاب شده برابر سختی موئینگی است که خود ۱۰ برابر مدول تراکم پذیری حجمی است [۲۳]. مقادیر مربوط به ظرفیت گرمایی آب، هوا و بخار برابر مقادیر مرجع خود قرار داده شده است.

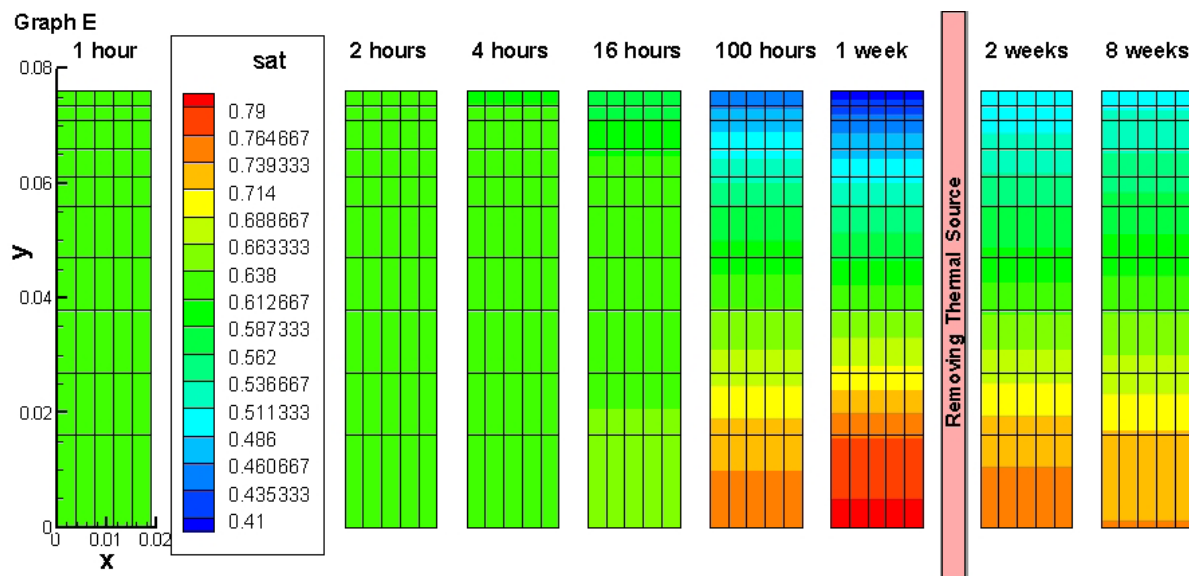
با انتخاب منحنی‌های نگهداشت آب مختلف، عوامل مدل شکست THHMD بررسی می‌شود. بدین منظور پنج منحنی نگهداشت آب وان گنختن که با حروف الفبای A تا E نامگذاری شده اند، انتخاب شده است (شکل (۳)). عوامل این پنج منحنی در جدول (۲) آمده است. بدین ترتیب در این مطالعه پنج نمونه با نام‌های A, B, C, D, E وجود دارد. در این مطالعه عددی، زمان‌های ۱ ساعت، ۲ ساعت، ۴ ساعت، ۱۶ ساعت، ۱۰۰ ساعت، یک هفته، دو هفته و هشت هفته به منظور بررسی عوامل مختلف در مدل THHMD در نظر گرفته شده اند. هفته اول که بارگذاری حرارتی وجود دارد، زمان‌ها نزدیک تر انتخاب شده است. شکل

جدول ۱: عوامل اصلی استفاده شده در مدل

E_U	E_L	χ
$1/22E+10$	$1/22E+10$	$0/005$
d_s	K_{w0}	α_w
.	$2/77E-14 \text{ m/s}$.
$S_{w,r}$	S_{w0}	C_0
$0/01$	$0/63$	$2/3E-4 \text{ Pa}$
C_1	g_M	$g_s = g_T$
$5/2E-3 \text{ Pa}$	$-0/414 \text{ Pa}$.
$\beta_s^0 = \beta_T^0$	e_0	T_0
$5/98E+10 \text{ Pa}$	$0/322$	$22 \text{ }^\circ\text{C}$



شکل ۳: پنج منحنی نگهداشت آب وان گنختن در مدل سازی نمونه پینتادو



شکل ۴: خطوط هم تراز درجه اشباع برای گراف E در نمونه پینتادو

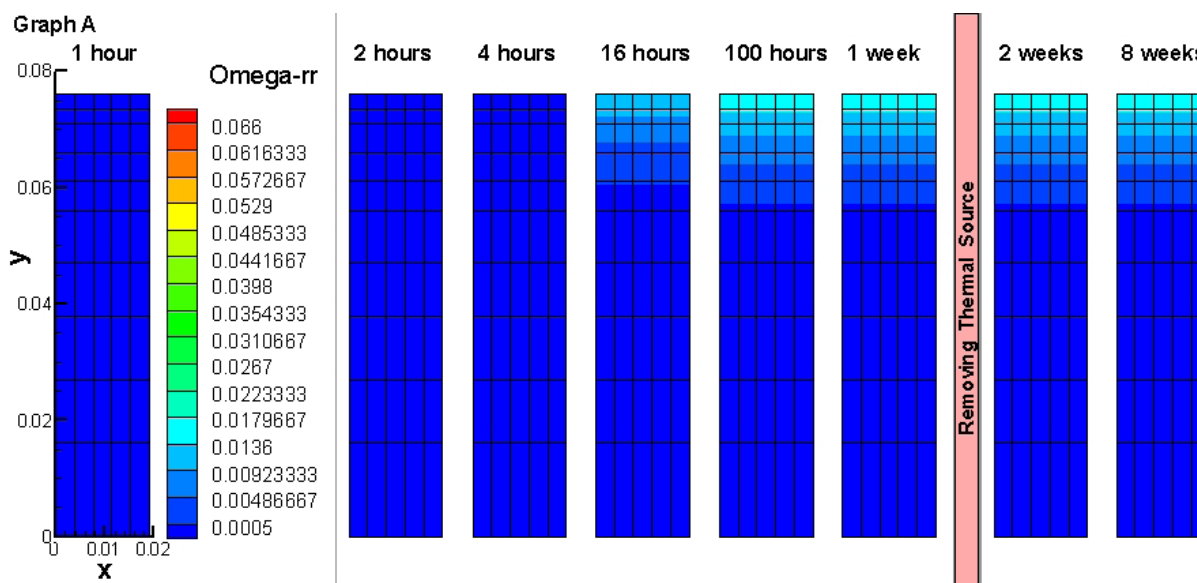
منتقل می‌شوند و در نتیجه درجه اشباع کاهش می‌یابد. با کاهش درجه اشباع، نفوذپذیری کاهش می‌یابد. پس از قطع بارگذاری حرارتی، به سبب عکس شدن جریان آب در نمونه درجه اشباع این المان افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل (۱۴) واضح است، با افزایش درجه اشباع، نفوذپذیری افزایش می‌یابد.

همانطور که در شکل‌های بالا مشخص است، نفوذپذیری در نمونه‌های A به سمت E، کاهش می‌یابد چرا که نمونه‌ها در این المان که در قسمت فوقانی نمونه است، از A تا E، خشک می‌شوند. در ابتدا که شکستگی در نمونه‌ها وجود ندارد و حفرات در اندازه سابق خود هستند، به علت کاهش درجه اشباع، نفوذپذیری کاهش می‌یابد. پس از به وقوع پیوستن شکستگی، حفرات بزرگتر می‌شوند و این عامل در جهت افزایش نفوذپذیری عمل می‌کند، ولی روند نمودارها نشان می‌دهد که عامل کاهش درجه اشباع، بر عامل بزرگ شدن حفرات غلبه می‌کند و همبستگی این دو عامل سبب

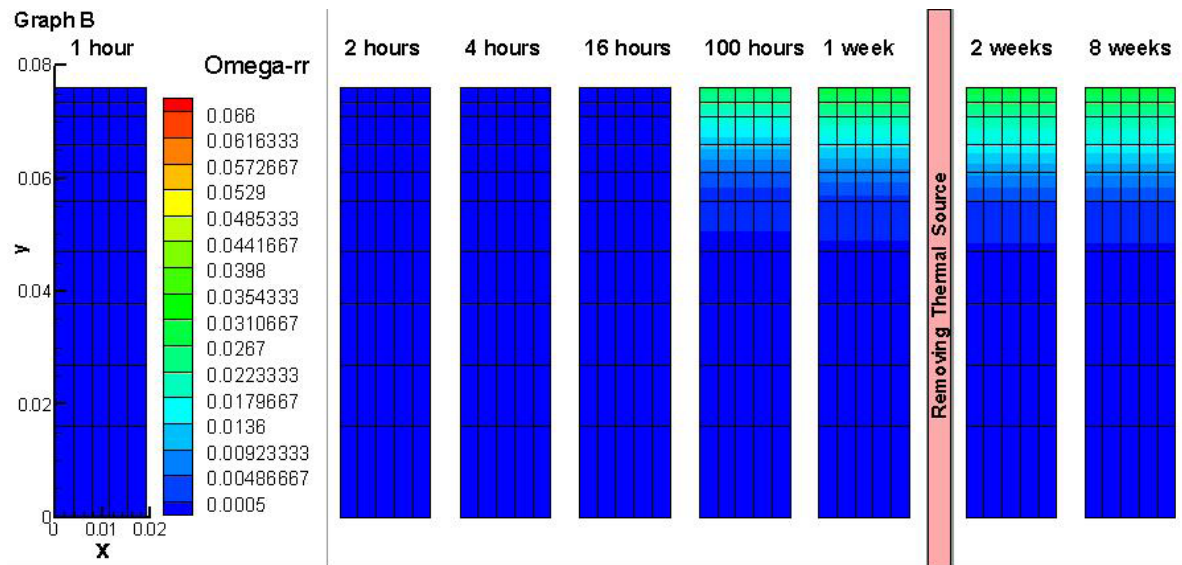
جدول ۲: عوامل وان گنختن برای منحنی‌های نگهداشت آب در مدل‌سازی نمونه پینتادو

منحنی	$\alpha(VG)$	$n(VG)$
A	$1/87E+08$	$1/2$
B	$1/87E+08$	$1/429$
C	$2/87E+08$	$1/429$
D	$3/87E+08$	$1/429$
E	$3/87E+08$	$1/5$

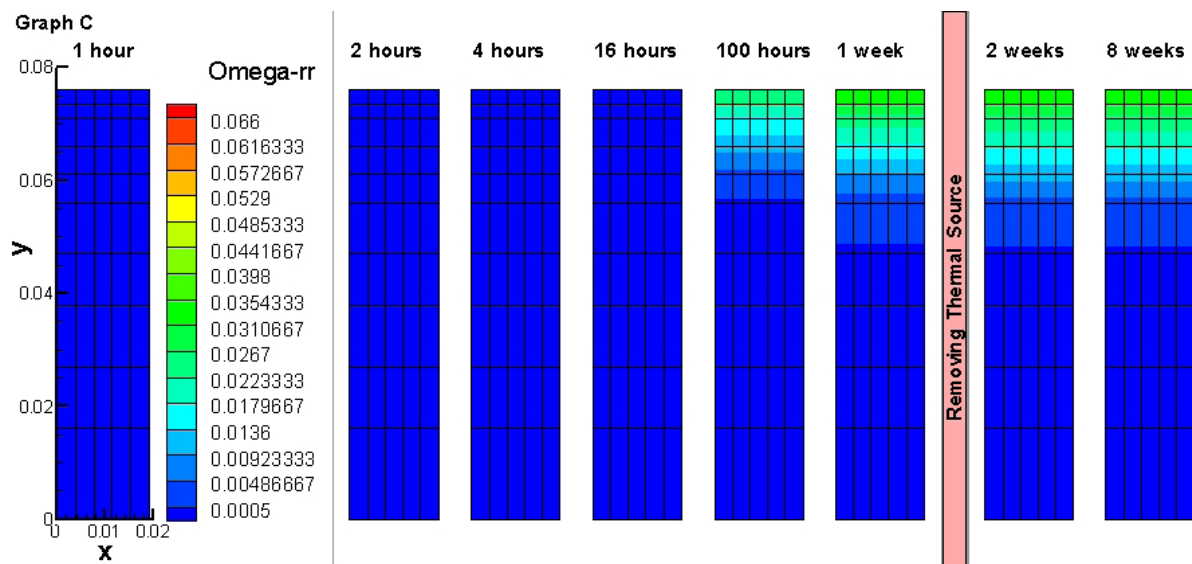
از شکل‌های گفته شده مشخص است، تمامی نمونه‌ها از درجه اشباع اولیه $0/63$ شروع می‌شوند و در این المان که نزدیک منبع حرارتی است، آب موجود در حفرات به سبب گرادیان حرارتی و حرکت ثقلی به پایین نمونه



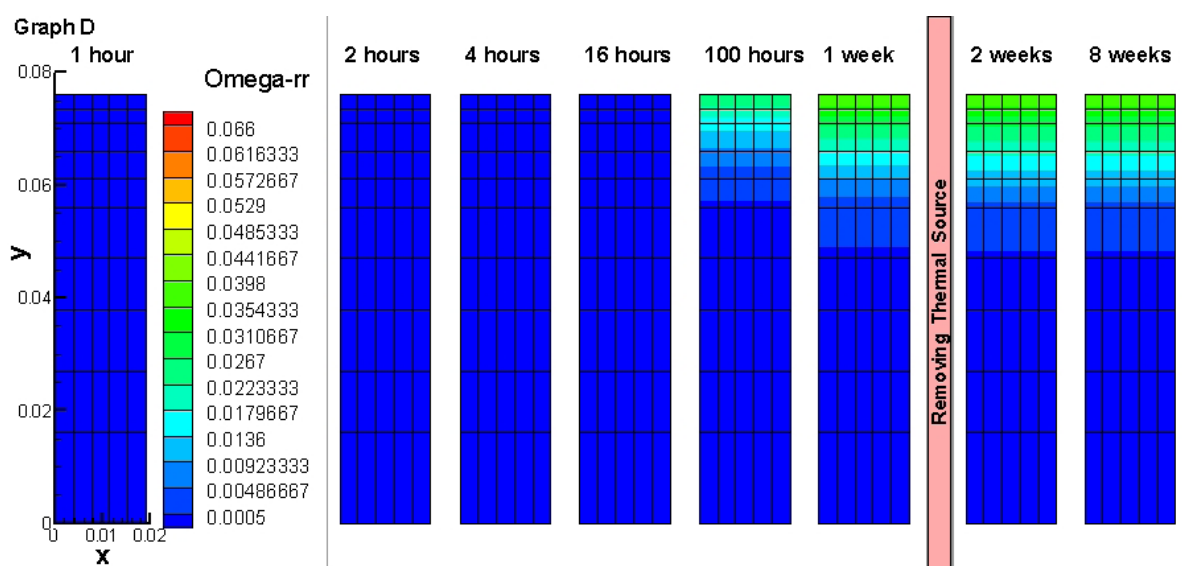
شکل ۵: خطوط هم تراز عامل شکست برای گراف A در نمونه پینتادو



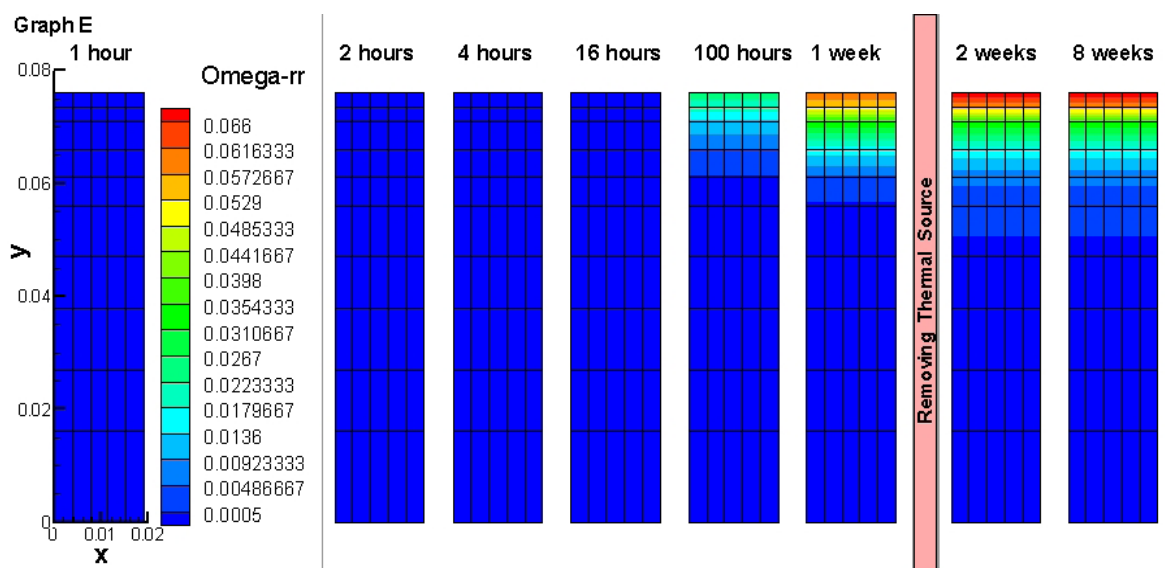
شکل ۶: خطوط هم تراز عامل شکست برای گراف B در نمونه پینتادو



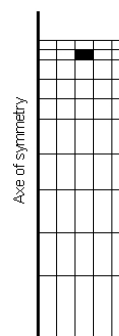
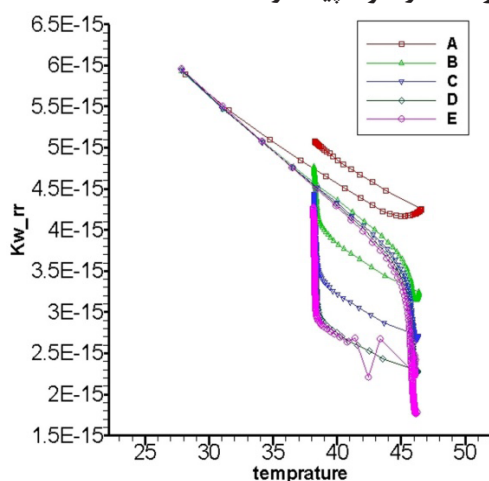
شکل ۷: خطوط هم تراز عامل شکست برای گراف C در نمونه پینتادو



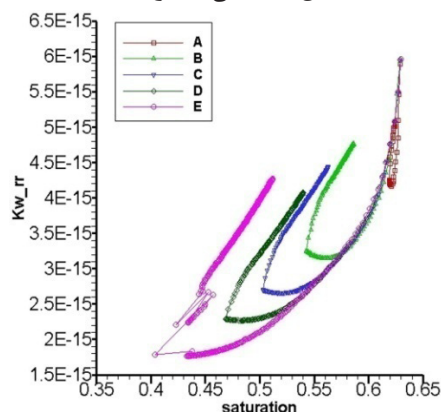
شکل ۸: خطوط هم تراز عامل شکست برای گراف D در نمونه پینتادو



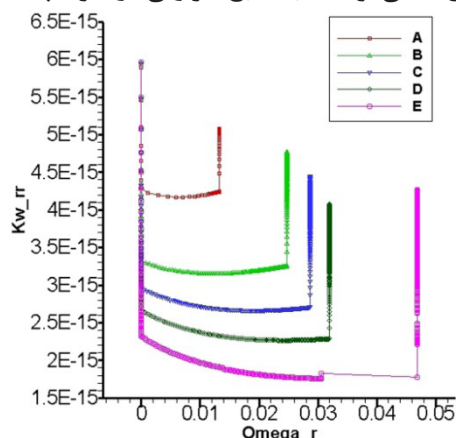
شکل ۹: خطوط هم‌تراز عامل شکست برای گراف E در نمونه پینتادو



شکل ۱۰: المان شماره ۲۲



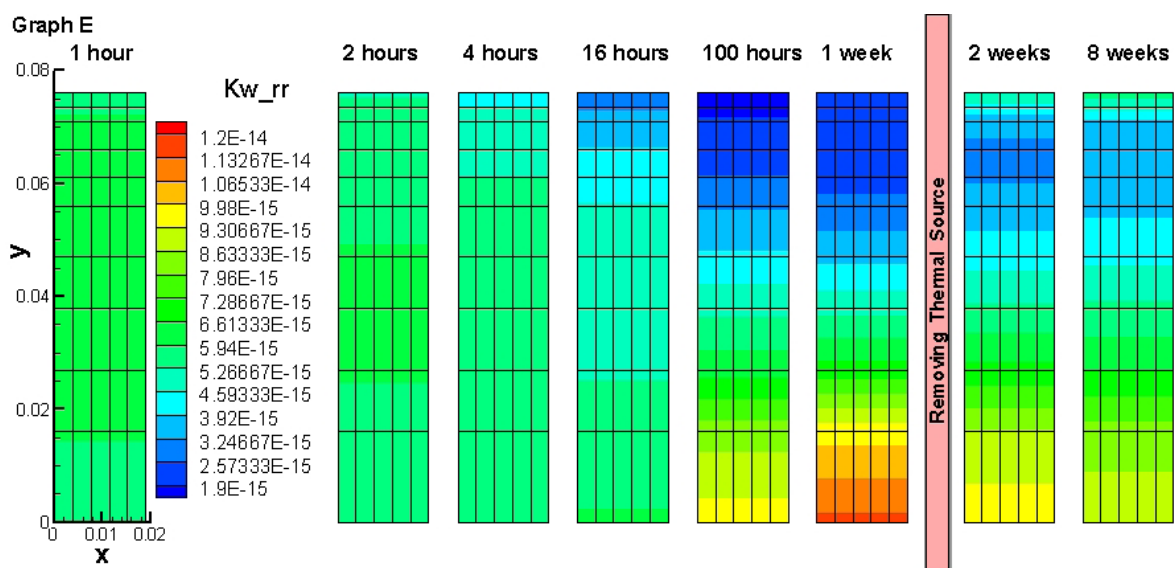
شکل ۱۲: تغییرات نفوذپذیری (با واحد متر بر ثانیه) نسبت به دما برای المانی نزدیک به منبع حرارتی در نمونه پینتادو



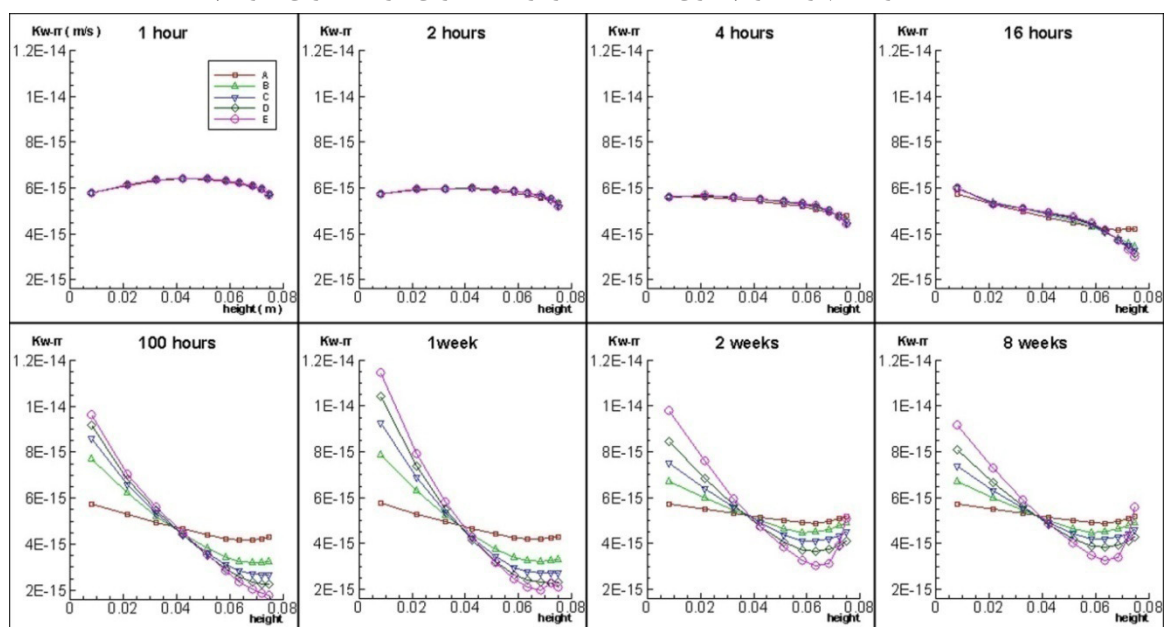
شکل ۱۳: تغییرات نفوذپذیری (با واحد متر بر ثانیه) نسبت به شکست برای المانی نزدیک به منبع حرارتی در نمونه پینتادو
 خیس تر می‌شوند و روند تغییرات نفوذپذیری عکس حالت قبل است. با بررسی داده‌های عددی حاصل از مدل‌سازی موجود، مشاهده می‌شود در زمان‌های پس از ۱۰۰ ساعت، مقدار نفوذپذیری در المان‌های نزدیک به منبع حرارتی (۹ درصد بالایی ارتفاع نمونه) نسبت به مناطقی که کمی از

شکل ۱۱: تغییرات نفوذپذیری (با واحد متر بر ثانیه) نسبت به درجه اشباع برای المانی نزدیک به منبع حرارتی در نمونه پینتادو
 روند کاهش نفوذپذیری می‌شود. زمانی که منبع حرارتی قطع می‌شود، مقدار شکست ثابت می‌ماند ولی جهت جریان آب در نمونه عوض می‌شود و درجه اشباع در این المان افزایش می‌یابد، در نتیجه نفوذپذیری افزایش می‌یابد.

به منظور بررسی روند نفوذپذیری در نمونه‌ها، خطوط هم‌تراز نفوذپذیری روی شبکه‌بندی در نمونه E، در شکل (۱۴) رسم شده است. در نیمه فوقانی نمونه که المان بررسی شده در فوق، در آن قرار دارد، روند به همان صورت ذکر شده در بالا است. در نیمه پایینی، نمونه‌ها از A تا E،



شکل ۱۴: خطوط هم تراز نفوذپذیری (با واحد متر بر ثانیه) برای گراف E برای نمونه پینتادو



شکل ۱۵: نمودار تغییرات نفوذپذیری (با واحد متر بر ثانیه) با ارتفاع را در زمان های مختلف برای تمامی گراف ها A تا E

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه ابتدا مدل شکست ترموهیدرومکانیکی THHMD، برای محیط متخلخل چند فازه غیر هم دما که در نرم افزار المان محدود θ -Stock وارد شده، ارائه شده است. مدل برای یک حجم شاهد و پایه ماده متخلخل غیر اشباع طراحی شده و با متغیرهای حالت مستقل (تنش خالص، مکش و تنش حرارتی) فرمول بندی شده است. در مکانیک شکست محیط های پیوسته، تقریباً تمامی مدل های تهیه شده برای محیط غیر اشباع بر اساس مفهوم تنش موثر بیشاپ هستند [۲۴]، [۲۵]، [۲۶]. در این چهارچوب های تئوریک، برخی از جنبه های مهم رفتار خاک های غیر اشباع، همانند رمبندگی ناشی از تر شدن قابل ارائه نیست [۲۶]. در نتیجه، فرمولاسیون متغیرهای حالت تنش مستقل به مدلی براساس

منبع دورتر می باشد، بیشتر است.

این موضوع نشانگر تاثیر شکست و بزرگتر شدن حفرات در مناطقی است که بسیار به منبع نزدیک هستند و در واقع از این زمان به بعد اثر عامل شکست در افزایش نفوذپذیری، خود را نشان می دهد (شکل ۱۵). این نفوذپذیری بیشتر در بالای نمونه به سبب اثر بزرگتر بودن حفرات در ناحیه شکسته شده است و در جاهایی که بزرگی شکست مقدار قابل ملاحظه ای است، وجود دارد. در نیمه فوقانی نمونه با در نظرگیری اثرات درجه اشباع به تنهایی، انتظار می رود نفوذپذیری از بالای نمونه به سمت پایین آن افزایش یابد که روند فوق نتیجه اثر توأم عامل درجه اشباع و عامل شکست و یا همان بزرگ شدن حفرات است.

- mechanical behavior of unsaturated porous media”, NUMOG VI, Quebec, Canada, 2-4, 291-296, 1997.
- [8] Gatmiri, B., “Framework of a non linear fully coupled thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated porous media”, Keynote lecture of the 3rd Iranian International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics December, Tehran, Ira, 9-11, 2002.
- [9] Martino, J., Chandler, N., “Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory”, *Int. J. Rock mech. and Min. Sci.* 41, 1413-1426, 2004.
- [10] Mertens, J., Bastiaens, W., Dehandschutter, B., “Characterization of induced discontinuities in the boom clay around the underground excavations”, (*urf, mol, Belgium*). *Appl. Clay Science* 26, 413-428, 2004.
- [11] Seng, J.S., Hassinger, J.A., Pires-Domingues, S.M., Costa-Mattos, H., Rochinha, F.A., “Modeling of nonlinear damage on elastic brittle materials”, *Mechanics Research Communications*, 25, 2, p. 147-153, 1998.
- [12] Arson, C., Gatmiri, B., “On damage modelling in unsaturated clay rocks”, *Phys. Chem. Earth* 33 S407-S415, 2008.
- [13] Arson, C., Gatmiri, B., “A mixed damage model for unsaturated porous media”, *Competes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Section Mécanique* 337, 68-74, 2009.
- [14] Kachanov, M., “Effective elastic properties of cracked soils: critical review of some basic concepts”, *Appl. Mech. Rev.* 45, 1992.
- [15] Shao, J. F., Zhou, H., Chau, K. T., “Coupling between anisotropic damage and permeability variation in brittle rocks”, *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, 29, 1231-1247, 2005.
- [16] Gatmiri, B., Hemmati, S., Arson, C., Amirzehni, E., “A Multiphase Analysis For Enviromental Impact Assesment With θ -Stock Finite Element Program”, *Journal of Multiscale Modeling; Vol. 2, Nos. 1 & 2*, 23-68, 1231-1247, 2010.
- [17] Dragon, A., Halm, D. and Desoyer, T. H., “Anisotropic damage in quasi-brittle solids: modeling, computational issues and applications”, *Comput. Geotech.* 35, 890-915, 2000.
- [18] Cordebois, J., Sidoroff, F., “Endommagement anisotrope en élasticité et plasticité”, *Journal de*
- مفهوم تنش موثر بیشاب^۸ ترجیح داده می‌شود. روابط تنش - کرنش از انرژی آزاد هلمهولتز که جمع پتانسیل الاستیک شکست و انرژی بسته شدن ترک است، بدست می‌آید.
- در بخش دوم این مقاله شکست در یک نمونه خاکی غیراشباع که توسط یک منبع گرما حرارت داده می‌شود بررسی شده است. کرنش‌های حاصل از بارگذاری حرارتی ایزوتروپیک است و سبب ایجاد شکست ایزوتروپیک می‌شوند، بنابراین عامل شکست و نفوذپذیری، ایزوتروپیک هستند نفوذپذیری آب که از مهم‌ترین عامل‌های هیدرولیکی خاک است، پیش از وقوع شکست در نمونه با کاهش درجه اشباع نمونه، کاهش می‌یابد. شاید در نظر اول توقع رود، پس از به وقوع پیوستن شکستگی، حفرات بزرگتر می‌شوند و این عامل در جهت افزایش نفوذپذیری عمل می‌کند ولی آن‌چه در بررسی داده‌های عددی از مدل THHMD بدست می‌آید، در زمان‌های نزدیک‌تر عامل درجه اشباع بر عامل بزرگ شدن حفرات ناشی از شکست، در بیشتر نواحی نمونه غلبه می‌کند. پس از رشد ترک‌ها به میزان مناسبی، دیده شده است که عامل شکست در افزایش نفوذپذیری عاملی غالب است. روند تغییرات نفوذپذیری و عامل شکست که هر دو ایزوتروپیک هستند، بررسی شده است.

۶- مراجع

- [1] Gatmiri, B., and Arson, C., “Theta-Stock, a powerfull tool for themohydromechanical behaviour and damage modeling of unsaturated porous media”, *Computers and Geotechnics* 35, 890-915, 2008.
- [2] Gatmiri, B., Delage, P., “Nouvelle formulation de la surface detal en indice des vides pour un modele non lineaire elastique des sols non satures”, *Proc. 1st Int. Con. Unsaturated Soils*, 2, 1049-1056, 1995.
- [3] Gatmiri, B., Delage, P., “A Formulation of fully coupled thermal- hydraulic- mechanical behavior of saturated porous media – numerical approach”, *Int. J-numer. Anal. Methods gemech*, 21(3), 199-225, 1997.
- [4] Gatmiri, B., “Analysisi of fully coupled behavior of unsaturated porous media under stress, suction and temperature gradient”, *Final report of CERMES-EDF*, 1997.
- [5] Jenab- Vossoughi, B., “Etude numerique de la modelisation thermo-elasto-plastique des sols non satures”, *PhD Dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees*, 253, 2000.
- [6] Arson, C., Gatmiri, B., “Numerical study of damage in unsaturated geological and engineered barriers”, *Phys. Chym. Earth*, 36, 1981-1989, 2011.
- [7] Gatmiri, B., Seyedi, M., Delage, P., Fry, J.J., “a new suction-based mathematical model for thermo-hydro-

shrinkage”, Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech.,, 26, 759-774, , 2002.

- [25] Jia, Y., Song, X. C., Duveau, G., Su, K., Shao, J. F., “Elastoplastic damage modeling of argillite in Partially saturated condition and application”, Physics and Chemistry of the Earth, 32, 656-666, 2007.
- [26] Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., “Constitutive relations for volume change in unsaturated soil”, Can. Geotech.J.13, No.3, 261-276, 1976.

Mécanique théorique et appliquée pp. 45-60, 1982.

- [19] VanGenuchten M. TH., “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898, 1980.
- [20] Pintado, X., Ledesma. A., Lloret. A., “Backanalysis of thermohydraulic bentonite properties from laboratory tests”, Engineering Geology, 64:91–115, 2002.
- [21] Chairelli, A. S., Shao, J. F., “Modelisation elastoplastique couplee l’endommagement anisotrope induit pour les arilites”, Revue Francaire de Genie Civil, 6(1): 115-130, 2002.
- [22] Homand, F., Chairelli, A. S. and Hoxha. D., “Caracteristiques physiques et mecaniques du granite dela vienne et de l’argilite de l’est”, Revue Francaire de Genie, 5, 2002.
- [23] Gens, A., Garcia-Molina, A. J., Olivella, S., Alonso, E. E., Huertas, F., “Analysis of a full scale in situ test simulating repository conditions”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Goemechanics, 22: 515-548, 1998.
- [24] Bourgeois, F., Burlion, N., Shao, J. F., “Modelling of elatoplastic damage in concrete due to desiccation

۷- زیر نویس ها

- 1- Phenomenological Approach
- 2- Dragon
- 3- Cordebois, J., sidoroff, F.
- 4- VanGenuchten
- 5- Shao
- 6- Pintado
- 7- Homand,F.,Chairelli,A.
- 8- Bishop