توسعه یک مدل رفتاري حالت بحراني براي درنظر گرفتن رفتار ناهمسان ماسه‌ها

روزبه رسولي[i*]؛ سيد محمدرضا امام[ii]؛ وحيد معصومي فرد[iii]

چکيده

یک مدل رفتاري حالت بحراني براي پيش بينی رفتار ماسه‌ها بويژه ماسه‌هاي غيرمتراکم و با پتانسيل روانگرايي در گذشته ارائه شده بود. اين مدل که قبلا با جزئيات کامل منتشر شده است قادر است رفتار ماسه در شرايط مختلف زهکشي شده و زهکشي نشده را در نظر گيرد. با وجود توانايي‌هاي گسترده مدل اوليه در پيش بيني رفتار ماسه‌ها، توسعه بيشتر اين مدل براي پيش‌بيني رفتار در محل ماسه‌ها که اغلب ناهمساني زيادي از خود نشان مي‌دهد بسيار مهم بنظر مي‌رسد. با افزودن اين قابليت به قابليت‌هاي قبلي، از اين مدل مي‌توان براي تحليل‌هاي عددي انواع سازه‌هاي خاکي با رفتار ناهمسان استفاده نمود.

در اين مقاله نشان داده شده است که با افزودن یک پارامتر با عنوان پارامتر ناهمساني به فرمولاسيون مدل اوليه، مدل قادر به پيش بيني رفتار ناهمسان ناشي از ساختار خاک (ناهمساني ذاتي) مي‌شود. اين پارامتر وابسته به ساختار خاک و شرايط بارگذاري است. توانايي مدل اصلاح شده در نشان دادن ناهمساني ذاتي با مقايسه نتايج حاصل از آزمايشگاه و پيش بيني بدست آمده از مدل مورد ارزيابي قرار گرفته است.

کلمات کليدي

مدل رفتاري، ناهمساني، تحليل عددي، رفتار ماسه

Modification of a Critical-state Constitutive Model for the Prediction of Inherent Anisotropy in Sands

R. Rasouli; S. M. R. Imam and V. Masoumifard

ABSTRACT

A critical state constitutive model for sands was previously developed with emphasis on capturing the main aspects of the behavior of loose liquefiable sands. The model, which was presented in detail in previous publications, was formulated and verified for various drained and undrained loadings of sands under monotonic conditions. However, in order to enable the model to predict the behavior of in-situ soils, which often exhibit strong inherent anisotropy, it was found important to extend the model formulation such that it will also be able to predict the behavior of sands with strong anisotropy.

In this paper, it is shown that by adding a new anisotropy parameter to the model, it is possible to simulate the behavior of strongly anisotropic sands. The anisotropy parameter depends on sand fabric and loading condition. Ability of the modified model to account for soil inherent anisotropy is verified by comparing observed and predicted responses of inherently anisotropic sand subjected to various loadings.

KEYWORDS

Constitutive modeling, Anisotropy, Numerical analysis, Sand behavior

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۸/۱۱/۱۹

تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۱/۲/۹

[i] *نويسنده مسئول و کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محيط زيست، دانشگاه صنعتي اميرکبير؛ rouzbeh_rasouli63@yahoo.com

[ii] استاديار، دانشکده مهندسی عمران و محيط زيست، دانشگاه صنعتي اميرکبير؛ rimam@aut.ac.ir

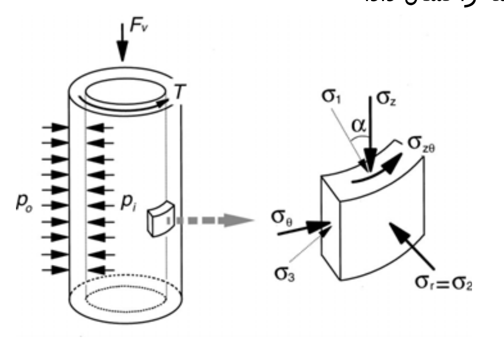
[iii] کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محيط زيست، دانشگاه صنعتي اميرکبير؛ vmasomi@gmail.com

۱- مقدمه

مدل‌هاي رفتاري اغلب پايه و اساس بسياري از تحليل‌هاي عددي هستند. اين مدل‌هاي رفتاري به محققان اين امكان را مي‌دهند که بدون صرف وقت و هزينه زياد که انجام آزمايش‌هاي مختلف در آزمايشگاه نياز دارند، رفتار مصالح را در شرايط مختلف مورد بررسي قرار دهند.

مدل کردن رفتار ناهمسان خاک‌ها و بخصوص ماسه‌ها، يکي از موضوعات مهم و مورد بحث در اين زمينه است. رفتار ناهمسان ماسه ها توسط محققان مختلفي در آزمايشگاه مورد بررسي قرار گرفته است، از جمله ميورا و توکی (۱۹۸۴) و يوشيمين (۱۹۹۶). همانگونه که نتايج اين محققان نشان مي‌دهند و همچنين بين و جفريز (۱۹۹۱) خاطر نشان مي‌کنند، ناهمساني اثرات بسيار مهمي بر رفتار ماسه ها دارد. محققين متعددی نيز مدل کردن رفتار ناهمسان ماسه را مورد مطالعه قرار داده‌اند، از جمله چانگ و استور (۲۰۰۶) ، يانگ و ديگران (۲۰۰۸)، صدرنژاد (۲۰۰۷) و لشکری (۲۰۰۹).

يوشيمين (۱۹۹۶) بوسيله دستگاه سيلندر توخالي (شکل ۱) آزمايش‌هاي زيادي را براي بررسي اثر ناهمساني بر رفتار ماسه ترتيب داد. در اين آزمايش‌ها زاويه اعمال تنش اصلي بزرگتر نسبت به زاويه رسوب گذاري ماسه (α) و همچنين نسبت بين تنش‌هاي اصلي تحت کنترل بود. نتايج اين آزمايش‌ها نشان داد که رفتار ماسه و مسير تنش طي شده تا رسيدن به حالت بحراني به شکل مشخصي تحت تاثير زاويه اعمال تنش اصلي بزرگتر نسبت به زاويه رسوب گذاري خاک است. به عبارت ديگر نتايج اين آزمايش‌ها نيز اهميت ناهمساني بر رفتار ماسه را نشان داد.



شکل (۱): نحوه اعمال نيرو تحت زاويه در دستگاه **HC** يوشيمين (۱۹۹۶)

در سال ۲۰۰۵ امام و همکاران يک مدل رفتاري حالت بحراني براي پيش بيني رفتار ماسه‌ها ارائه نمودند که رفتار ماسه را در شرايط آزمايش‌هاي سه محوري فشاري و سه محوري کششي به خوبي پيش بيني مي نمايد. با اين حال براي استفاده از اين مدل برای پيش بيني رفتار ماسه در شرايط ديگر اعمال تنش، نوعي اصلاح در فرمولاسيون آن مورد نياز است.

در اين مقاله با ارائه يک راهکار به نسبت ساده قابليت پيش بيني رفتار حاصل از ناهمسانی ذاتي ماسه به مدل اوليه اضافه شده است. براي اين منظور از يک متغير اسکالر با عنوان پارامتر ناهمساني، A، که به عنوان شاخصي براي نشان دادن وضعيت ناهمساني مصالح بکار مي‌رود و توسط لی و دافالياس (۲۰۰۲) ارائه شد استفاده شده است. در تعريف اين پارامتر از تانسوري تحت عنوان تانسور فابريک (اودا ۱۹۹۹) که بر اساس ويژگيهاي ميکرومکانيک مصالح تعريف مي‌شود استفاده شده است.

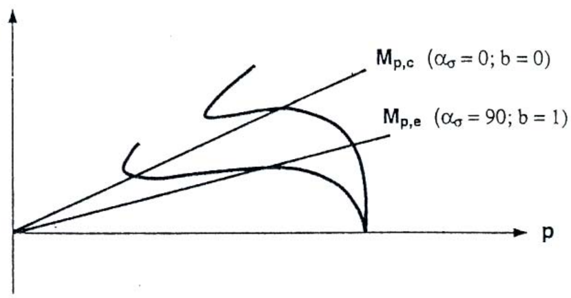
مدل حالت بحراني که پيشتر به آن اشاره شد با دخالت دادن پارامتر ناهمساني A در فرمولاسيون آن اصلاح شد و بدين ترتيب مدل اصلاح شده مي‌تواند رفتار ناهمسان ماسه در شرايط بين فشاري و کششي را نيز پيش بيني نمايد.

در اين مقاله از نتايج آزمايشگاهي ارائه شده توسط يوشيمين (۱۹۹۶) برای بررسی ناهمسانی استفاده شده است. همچنين شرح مختصری از مدل رفتاري اوليه نيز در ضميمه آمده است ولی برای اطلاعات بيشتر در اين زمينه ميتوان به مقالات امام (۱۹۹۹) و امام و ديگران (۲۰۰۵) مراجعه نمود. ضمنا توضيح مفصلي از تانسور فابريک و پارامتر A به ترتيب توسط اودا (۱۹۹۹) و لی و دافالياس (۲۰۰۲) ارائه شده است.

۲- رفتار ناهمسان ماسه‌ها

۲-۱- کليات

امام و ديگران (۲۰۰۲) خاطر نشان مي نمايند که در ماسه‌هاي غيرمتراکم، نسبت تنش تفاضلی $(q=\sigma_1-\sigma_3)$ به تنش نرمال ميانگين (p') در نقطه قله (حداکثر) مسير تنش زهکشي نشده (M_p) بسيار نزديک به نقطه حداکثر نسبت تنش در سطح تسليم است و از اين نکته مي‌توان در فرمولاسيون سطح تسليم ماسه‌ها استفاده نمود. بنابراين در مدل حالت بحراني که پيشتر بدان اشاره شد از اين موضوع در بدست آوردن پارامترهاي مدل استفاده شده است. شکل (۲) موقعيت نقطه حداکثر را در آزمايشهاي زهکشي نشده سه محوري فشاري و کششي نشان مي‌دهد. ديده مي‌شود که ناهمساني اثرات مشخصي بر نسبت M_p دارد و بنابراين براي اصلاح در مدل اصلي، اثرات ناهمساني بر اين نسبت تنش مورد توجه قرار گرفته است.



شکل (۲): نسبت های تنش در نقطه حداکثر در آزمایش سه محوري زهکشي نشده فشاري و کششي (امام و همکاران ۲۰۰۲)

۲-۲- اثرات ناهمساني بر **Mp**

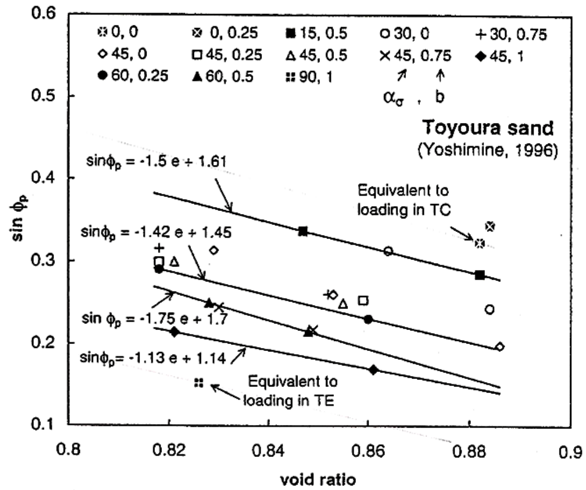
در آزمايش‌هاي گسترده‌اي که يوشيمين (۱۹۹۶) با استفاده از دستگاه سيلندر توخالي انجام داد، اثرات تنش اصلي مياني (که ميتواند بوسيله پارامتر $b = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ تعريف شود) و زاويه اعمال بار α (شکل ۱) بر روي رفتار زهکشي نشده ماسه تويورا تحقيق شد.

در اين آزمايش‌ها تمامي نمونه‌ها قبل از اعمال برش به صورت همسان تا تنش متوسط همه جانبه ۱۰۰ کيلوپاسکال تحکيم داده شده بودند. در انتخاب مقادير α و b در آزمايش-هاي انجام شده، براي جلوگيري از بروز ناهمگني‌هاي ناخواسته، ترکيبات مشخصي از اين دو پارامتر انتخاب شد. در شکل (۲) نمايشی کلی از حداکثر و حداقل اثرات تغيير α و b بر مقدار M_p در اين دسته آزمايش‌ها نشان داده شده است. اين مقادير مربوط به حدهاي بالا و پايين α و b يعني بارگذاري‌هاي سه محوري فشاري و کششي است.

مقدار M_p را مي‌توان با استفاده از رابطه (۱) به زاويه اصطکاک بسيج شده در نقطه حداکثر (φ_p) ارتباط داد. با استفاده از اين رابطه مي‌توان به نحوه اثر پارامتر b و $\sin\varphi_p$ بر مقدار M_p پي برد.

$$M_p = \frac{6(1-b+b^2)^{1/2}\sin\varphi_p}{3+(2b-1)\sin\varphi_p} \qquad (۱)$$

آزمايش‌های گفته شده همچنين نشان دادند که مقدار $\sin\varphi_p$ به تراکم خاک يا نسبت تخلخل آن نيز بستگی دارد. اين تغييرات با استفاده از نتايج آزمايش‌های مذکور توسط امام و همکاران (۲۰۰۲) ارائه شده است و در شکل (۳) به نمايش در آمده است.



شکل (۳): تغييرات سينوس زاويه اصطکاک داخلي در نقطه حداکثر با نسبت تخلخل در ترکيبات b و **α** مختلف (امام و همکاران ۲۰۰۲)

بررسي اين نتايج نشان مي‌دهد که $\sin\varphi_p$ با افزايش α کاهش يافته و با افزايش b نيز عموما به شکل خفيفي کم ميشود. امام و همکاران (۲۰۰۲) خاطر نشان مي‌کنند که اين مشاهدات با تحقيقات قبلي که توسط محققان مختلفي انجام شده است، هماهنگ است (بطور مثال شيبايا و هايت ۱۹۸۷). علاوه بر اين، شکل (۳) هم چنين نشان مي‌دهد که مقادير $\sin\varphi_p$ بدست آمده از آزمايش های سيلندر توخالی که متناظر با ترکيبات α و b مربوط به آزمايش های سه محوري فشاري و کششي است، حدهاي بالا و پايين کل نتايج بدست آمده را تشکيل مي‌دهند. همچنين مي‌توان ديد که خطوطي که مقادير $\sin\varphi_p$ حاصل از ترکيبات يکسان α و b را به هم متصل مي‌نمايند شيبي تقريبا برابر داشته و موازي يکديگرند.

با در نظر داشتن نکات گفته شده در بالا درباره اثرات α و b بر $\sin\varphi_p$ و به تبع آن بر M_p در ادامه تانسور فابريک و پارامتر ناهمساني به اختصار معرفي مي‌شوند.

۳- تانسور فابريک

توزيع تصادفي ذرات غيردايره‌اي مصالح مختلف مانند آنچه در ماسه‌ها ديده مي‌شود به آن توده از ذرات خواص خاصي مي‌دهد که تحت عنوان فابريک مصالح از آن ياد مي‌شود (اودا ۱۹۷۲ ، برور ۱۹۶۴). امتداد قرارگيري يک ذره ماسه را مي‌توان بوسيله يک جفت بردار واحد n و n– در طول محور اصلي آن ذره تعريف نمود. بر اين اساس اودا (۱۹۹۹). تانسور مرتبه دو زير را به عنوان تانسور فابريک تعريف نمود:

$$F_{ij} = \frac{1}{2N}\sum_{K=1}^{2N} n_i^k n_j^k \qquad (۲)$$

کـه در آن N = تعـداد ذرات ماسـه در يـک حجـم مـشخص؛

و n_i^k و n_j^k = مولفه‌هاي kامين بردار هستند. مقادير مولفه‌هاي اين تانسور نسبت ذراتي كه در جهت خاصي قرار گرفته‌اند را مشخص مي‌نمايد. تانسور فابريک متقارن است و بنابراين آنرا مي‌توان با سه مولفه اصلي، F_1، F_2 و F_3 و سه مولفه جهات اصلي مربوط به آن، نشان داد. در بيشتر نمونه‌هاي عملي و به دليل نحوه رسوب‌گذاري، خاک‌ها بصورت صفحه‌اي همسان هستند[1]، و اين بدان معناست كه دو تا از مولفه‌هاي اصلي، مثلا F_2 و F_3 ، با يكديگر برابرند. با توجه به معادله (۲) در تانسور فابريک مجموع اعضاي قطر اصلي[2] برابر واحد است و بنابراين با توجه به برابري F_2 و F_3 داريم: $F_1=1-(F_2+F_3)=1-2F_3$. با توجه به اين نكات مي‌توان گفت كه براي يک خاک همسان صفحه‌اي، با دانستن جهت رسوب گذاري (كه اغلب در جهت قائم است)، تنها با دانستن يک مقدار اسكالر مي‌توان تانسور فابريک را تشكيل داد. اودا و ناكاياما (۱۹۸۸) نشان دادند كه تانسور فابريک براي چنين مصالحي به شكل زير نوشته مي‌شود:

$$F'_{ij} = \frac{1}{3+\Delta}\begin{pmatrix} 1-\Delta & 0 & 0 \\ 0 & 1+\Delta & 0 \\ 0 & 0 & 1+\Delta \end{pmatrix} \qquad (۳)$$

بطوريكه Δ = مقداري قابل اندازه‌گيري براي خاک‌ها، تحت عنوان بزرگي بردار[3] است (كوري ۱۹۵۶). اين مقدار بزرگي ناهمساني و تمايل ذرات به يک جهت را نشان مي‌دهد. اودا و ناكاياما (۱۹۸۸) نشان دادند كه اين مقدار به شكل زير تعريف مي‌شود:

$$\Delta = \frac{1}{2N}\sqrt{\left(\sum_{K=1}^{2N}\cos 2\varphi_k\right)^2 + \left(\sum_{K=1}^{2N}\sin 2\varphi_k\right)^2} \qquad (۴)$$

بطوريكه φ_k = انحراف kامين بردار واحد n از صفحه همسان (كه در اين‌جا صفحه $X'_2 - X'_3$ فرض شده است) است. واضح است كه Δ به شكل ذرات و فرآيند تشكيل توده و نهشته ماسه‌اي مربوط مي‌شود. معادله (۴) نشان مي‌دهد كه Δ براي مصالح كاملا همسان برابر صفر است و تا مقدار واحد براي مصالحي كه محور اصلي تمام ذرات آن بشكل يكنواخت و كامل در صفحه $X'_2 - X'_3$ قرار گرفته در تغيير است.

۴- پارامتر وضعيت ناهمساني A

همانگونه كه لي و دافالياس (۲۰۰۲) خاطرنشان مي‌نمايند، دخالت دادن تانسور فابريک در فرمولاسيون يک مدل رفتاري كه خود شامل متغيرهاي تانسوري ديگري همچون تانسور تنش σ_{ij} است نياز به ملاحظات خاصي دارد. آنها روش نسبتا ساده‌اي براي درنظر گرفتن جهت و زاويه نسبي تانسورهاي تنش و فابريک ارائه نمودند. براي اين منظور آنها متغير اسكالر A را معرفي نمودند كه خود تابعي از تانسورهاي تنش و فابريک است. شرح مفصلي از فرمولاسيوني كه منجر به بدست آوردن اين متغير مي‌شود توسط لی و دافالیاس (۲۰۰۲) ارائه شده است.

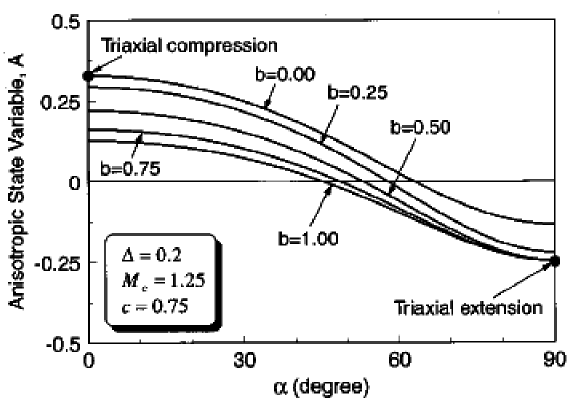
پارامتر وضعيت ناهمساني به شكل زير تعريف مي‌شود:

$$A = \frac{\tilde{R}}{M_c\, g(\tilde{\theta})} - 1 \qquad (۵)$$

كه در آن $\tilde{R}$ يک نامتغير نسبت تنش، $g(\tilde{\theta})$ يک تابع اينترپولاسيون كه مقدار نامتغير $\tilde{R}$ را با توجه به زاويه لود[4] θ تخمين مي‌زند و M_c نسبت تنش بحراني در شرايط سه محوري فشاري هستند.

مي‌توان نشان داد كه براي مصالح ايزوتروپ A = ۰ بوده و براي مصالح ناهمسان با توجه به زاويه نسبي اعمال تنش‌ها نسبت به زاويه ذرات اين پارامتر مي‌تواند مقداري مثبت يا منفي اختيار كند. تغييرات پارامتر A با α و b براي مقادير فرض شده براي ماسه تويورا (ماسه مورد آزمايش توسط يوشيمين (۱۹۹۶) در شكل (۴) نشان داده شده است. گفتني است كه شرايط b = ۰ و α = ۰ درجه مربوط به حالت سه محوري فشاري و b = ۱ و α = ۹۰ درجه مربوط به شرايط سه محوري كششي هستند.

همانگونه كه در شكل (۴) ديده مي‌شود، پارامتر A با افزايش α و b هر دو، كاهش مي‌يابد اما تغييرات آن نسبت به α حساس‌تر است تا b. هم چنين ديده مي‌شود كه حالات سه محوري فشاري و كششي حدهاي بالا و پايين تغييرات اين پارامتر هستند. با به ياد آوردن اثرات α و b بر $\sin\varphi_p$ مي‌توان ديد كه تغييرات پارامتر A در هماهنگی با آن مشاهدات است. بنابراين اين هماهنگی راهنماي مناسبي براي استفاده از اين پارامتر براي اصلاح فرمولاسيون مدل خواهد بود.



شكل (۴): تغييرات پارامتر ناهمساني در اثر تغييرات α و b لی و دافالیاس (۲۰۰۲)

۵- اصلاح مدل رفتاري اوليه

در اينجا به نحوه دخالت دادن پارامتر ناهمساني در مدل اوليه كه از راه اصلاح نحوه محاسبه M_p براي شرايط مختلف انجام مي‌شود، پرداخته مي‌شود. فرمولاسيون كامل مدل رفتاري اوليه توسط امام و ديگران (۲۰۰۵) تشريح شده و خلاصه‌اي از آن نيز در بخش ضميمه اين مقاله آمده است. در اينجا كليات روابطي از اين مدل كه با اعمال اثر ناهمساني مرتبط اند ذكر مي‌شوند.

رابطه سطح تسليم مدل رفتاري اوليه براي ماسه همسان تحكيم يافته به شكل زير تعريف مي‌شود:

$$\eta^2 - 5M_p^2[1-(p/p_c)^{0.5}] = 0 \quad (۶)$$

كه در آن $\eta = q/p$ نسبت تنش اعمالي به نمونه و P_c تنش نرمال ميانگين در $q = ۰$ است. نسبت تنش M_p از روابط زير بدست مي‌آيد:

$$M_{p,c} = \frac{6\sin\varphi_{p,c}}{3-\sin\varphi_{p,c}} \quad (۷)$$

$$M_{p,e} = \frac{6\sin\varphi_{p,e}}{3+\sin\varphi_{p,e}} \quad (۸)$$

كه در آن‌ها نيز $\varphi_{p,c}$ و $\varphi_{p,e}$ به ترتيب زواياي اصطكاك داخلي در نقطه اوج (حداكثر) سطح تسليم در بارگذاري سه محوري فشاري و كششي بوده و از روابط زير بدست مي‌آيند:

$$\sin\varphi_{p,c} = \sin\varphi_\mu - k_p\psi_p \quad (۹)$$

$$\sin\varphi_{p,e} = \sin\varphi_\mu - k_p\psi_p + a_p \quad (۱۰)$$

φ_μ زاويه اصطكاك داخلي مربوط به پارامتر حالت $\psi_p = ۰$ است كه در آزمايش سه محوري فشاري اين مقدار تقريبا برابر مقدار زاويه اصطكاك داخلي بين ذرات است؛ k_p و a_p پارامترهاي مصالح هستند و ψ_p پارامتر حالت در نقطه اوج سطح تسليم است. پارامتر حالت[5] نيز اختلاف نسبت تخلخل فعلی و نسبت تخلخل حالت بحرانی در فشار محدود كننده مشخص است.

روابط (۹) و (۱۰) گفته شده مقدار M_p را براي حالات فشاري و كششي محاسبه مي نمايند. ليكن در اينجا براي منظوركردن اثر ناهمساني در محاسبه M_p رابطه (۱۱) بجاي روابط (۹) و (۱۰) پيشنهاد مي‌شود.

$$\sin\varphi_p = \sin\varphi_\mu - k_p\psi_p + a_p(A) \quad (۱۱)$$

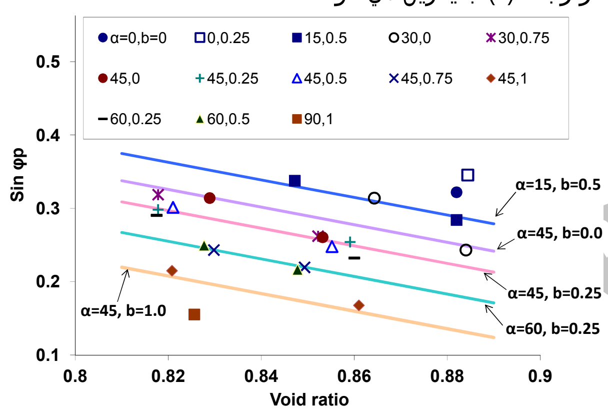
بطوريكه:

$$a_p(A) = \frac{A_c - A}{A_c - A_e} \times a_p \quad (۱۲)$$

كه در آن A_c پارامتر ناهمساني مصالح مورد نظر در شرايط سه محوري فشاري، A_e پارامتر ناهمساني آن مصالح در شرايط سه محوري كششي، A مقدار اين پارامتر تحت شرايط مورد نظر آزمايش (α و b مربوط به آزمايش مورد نظر) و بالاخره a_p همان پارامتر مصالح تعريف شده در مدل حالت بحراني اصلي است.

شكل (۵) دقت اين فرمولاسيون در محاسبه تغييرات $\sin\varphi_p$ در شرايط مختلف را نشان مي‌دهد. ديده مي‌شود كه رابطه (۱۱) با دقت مناسبي قادر به نشان دادن تغييرات $\sin\varphi_p$ برای مقادير مختلف α و b است.

اكنون با داشتن $\sin\varphi_p$ براي مقادير دلخواه α و b و با استفاده از رابطه (۱) كه معادل روابط (۷) و (۸) است مقدار M_p محاسبه مي‌شود. براي پيش بيني رفتار ماسه، از M_p بدست آمده از رابطه (۱) كه با توجه به $\sin\varphi_p$ بدست آمده از رابطه (۱۱) محاسبه مي‌شود استفاده شده و سپس مقدار بدست آمده در رابطه (۶) جايگزين مي‌شود.



شكل (۵): اثرات α و b بر $\sin\varphi_p$ براي ماسه تويورا و مقايسه آنها با پيش بيني پارامتر ناهمساني تعريف شده بوسيله رابطه (۱۱)

۶- بررسي عملكرد مدل اصلاح شده در پيش بيني رفتار ناهمسان ماسه تويورا

در اينجا براي بررسي ميزان دقت مدل اصلاح شده در پيش بيني رفتار ناهمسان ماسه‌ها، نتايج حاصل از آزمايش‌هاي انجام شده توسط يوشيمين (۱۹۹۶) بر ماسه تويورا كه تحت زواياي مختلف اعمال تنش اصلي بزرگتر انجام شده اند با پيش بيني‌هاي بدست آمده از مدل اصلاح شده مقايسه مي‌شوند.پارامترهاي مدل و همچنين پارامترهاي مربوط به محاسبه متغيرهای ناهمساني كه براي استفاده در اين تحليل‌ها بكار رفته‌اند در جدول (۱) آمده است.

شكل‌هاي (۶) و (۷) نمودارهاي تنش برشي در برابر كرنش

برشي و تنش برشي در برابر تنش موثر ميانگين را براي آزمايش‌هايي كه با دانسيته نسبي ۲۴-۲۵% انجام شده اند و مقايسه آنها با نتايج آزمايشگاهی را نشان مي‌دهند. در اين سري آزمايش‌ها b = ۰ بوده و α از صفر تا ۴۵ درجه تغيير داده شده است. با مقايسه نمودارها ديده ميشود كه پيش بينی های مدل اصلاح شده تطابق بسيار خوبی با نتايج حاصل از آزمايشهای آزمايشگاهی را نشان مي‌دهد.

شكل‌هاي (۸) و (۹) نيز نمودارهاي تنش برشي در برابر كرنش برشي و تنش برشي در برابر تنش موثر ميانگين را براي يک سري ديگر از آزمايش‌ها با b = ۰ و α از صفر تا ۴۵ نشان مي‌دهد كه در آنها تراكم نسبي بين ۳۰% تا ۳۳% است. اين نتايج نيز نشان می دهد كه مدل اصلاح شده می تواند بخوبی اثرات تغيير زاويه بارگذاری بر رفتار زهكشی نشده ماسه ها را نشان دهد.

جدول (۱): پارامترهاي بكار رفته در تحليل‌ها

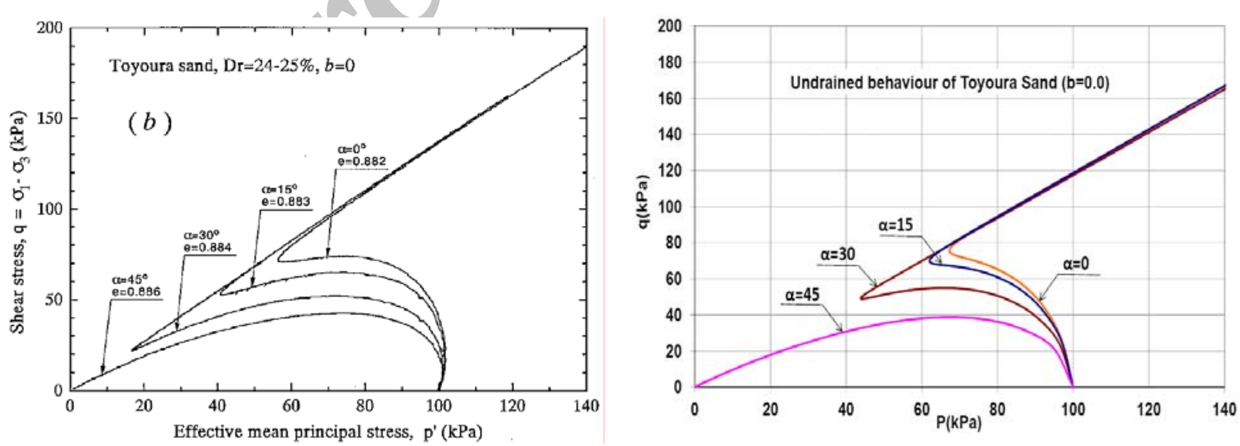
Parameter type	Parameter name	مقاديرپارامترها
Peak state	k_p	۱/۲
	φ_p	۲۰
	a_p	۰/۴۵
Stress-dilatancy	φ_{cs}	۳۰
	k_{PT}	۰/۷۵
	a_{PT}	۰/۰۱
Plastic stiffness	h	۱
Elasticity	G_a	۵۰۰۰
	K_a	۸۵۰۰
Anisotropy	Δ	۰/۲
	c	۰/۷۵
	M_c	۱/۲۵

نتايج تحليل عددي و مقايسه آنها با نتايج آزمايشگاهي نمونه‌هاي با تراكم نسبي ۳۹% تا ۴۱% براى b =۰ و α با تغييرات از صفر تا ۴۵ درجه در شكل‌هاي (۱۰) و (۱۱) ديده مي‌شوند. از نتايج حاصل براي آزمايش‌هاي با b = ۰ ديده مي-شود كه مدل اصلاح شده ميتواند بخوبي روند تغييرات رفتار خاک را در مقادير مختلف α نشان دهد.

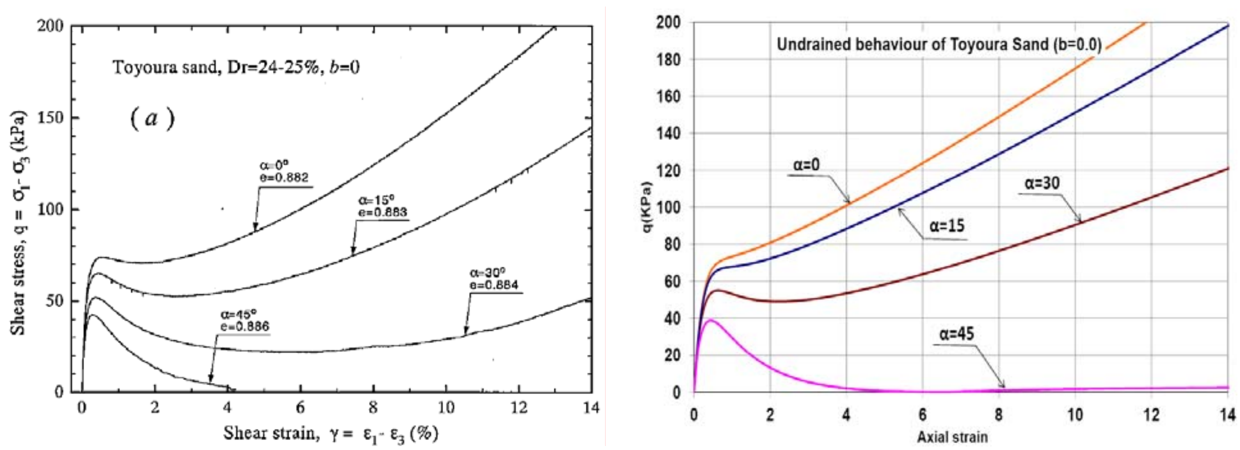
۷- خلاصه و نتيجه گيري

در سال ۲۰۰۵ امام و همكاران يک مدل حالت بحراني كه قادر به پيش بيني جنبه‌هاي مختلفي از رفتار ماسه ها است را ارائه نمودند. اين مدل در پيش بيني رفتار ناهمسان ماسه ها پيچيدگي‌هايي در فرمولاسيون دارد. نتايج اين تحقيق نشان داد كه رفتار ناهمسان ماسه‌ها در بارگذاری زهكشی نشده با اصلاح اين مدل رفتاري قابل پيش بيني است. براي اينكار يک پارامتر ناهمساني كه به عنوان شاخصي از وضعيت ناهمسان مصالح توسط لی و دافالياس (۲۰۰۲) پيشنهاد شده است به فرمولاسيون سطح تسليم مدل امام و همكاران اضافه شد.

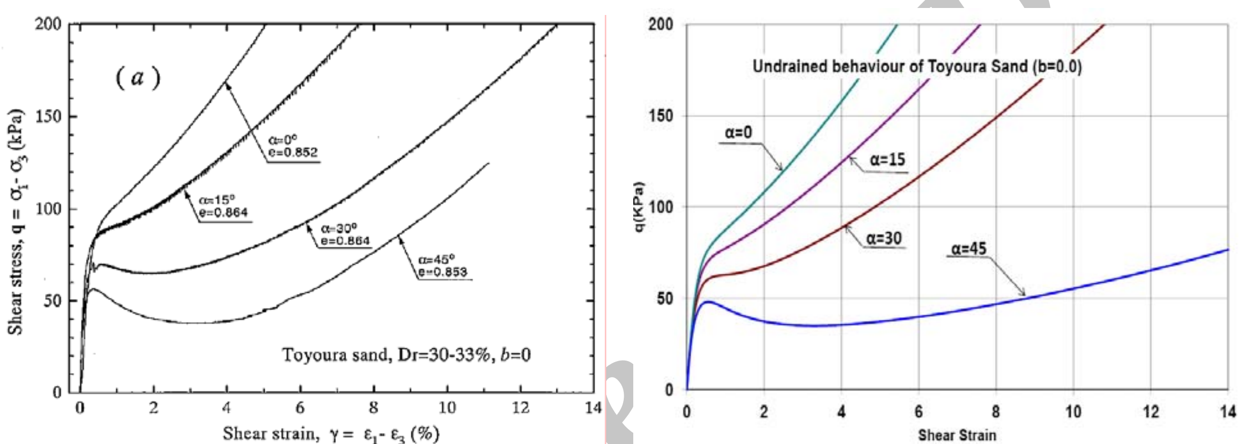
نتايج حاصل از پيش بيني مدل اصلاح شده با نتايج حاصل از نتايج آزمايشگاهي يوشيمين (۱۹۹۶) كه آزمايش های گسترده‌اي براي بررسي اثر ناهمساني بر رفتار ماسه تويورا انجام داده است مقايسه شد. ديده شد كه با اصلاح ساده‌اي كه در مدل اوليه انجام شد مدل بخوبي قادر به پيش بيني رفتار ناهمسان ماسه ها ميشود. به اين ترتيب با افزودن قابليت مدل كردن رفتار ناهمسان به ويژگي‌هاي مدل اوليه، از اين مدل رفتاري مي‌توان در تحليل انواع سازه‌هاي خاكي استفاده نمود.



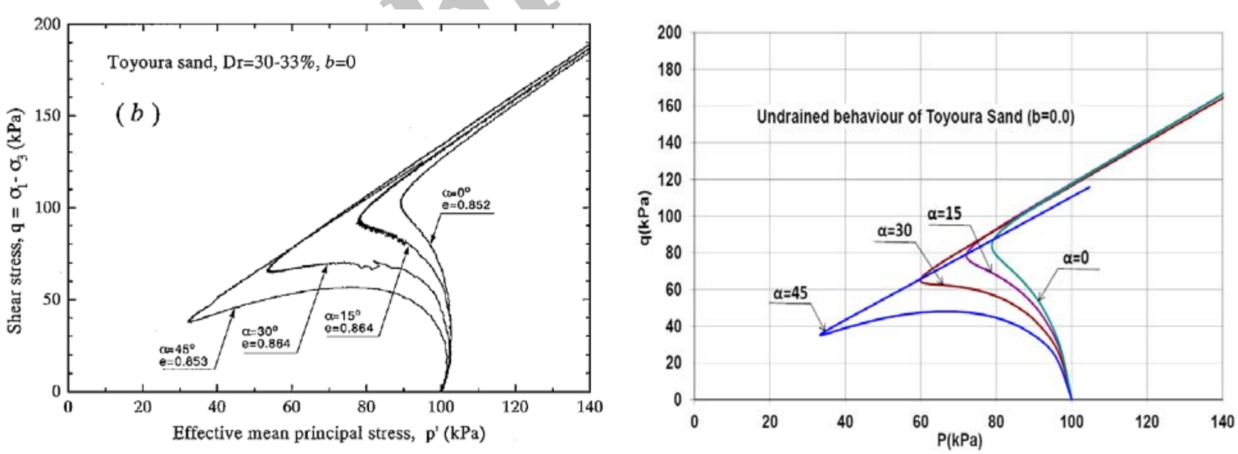
شكل (٦): مقايسه نتايج حاصل از مدل اصلاح شده و آزمايش های يوشيمين (۱۹۹٦)، تنش برشي در برابر كرنش برشي Dr =%۲۵-۲٤



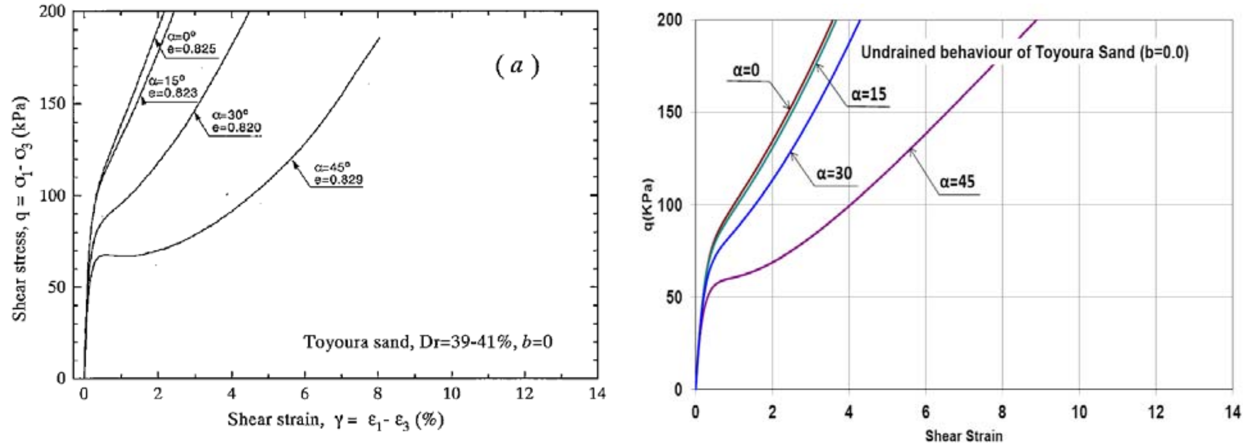
شکل (۷): مقایسه نتایج حاصل از مدل اصلاح شده و آزمایش های یوشیمین (۱۹۹۶)، تنش برشي در برابر تنش موثر میانگین ۲٤-۲۵%= Dr



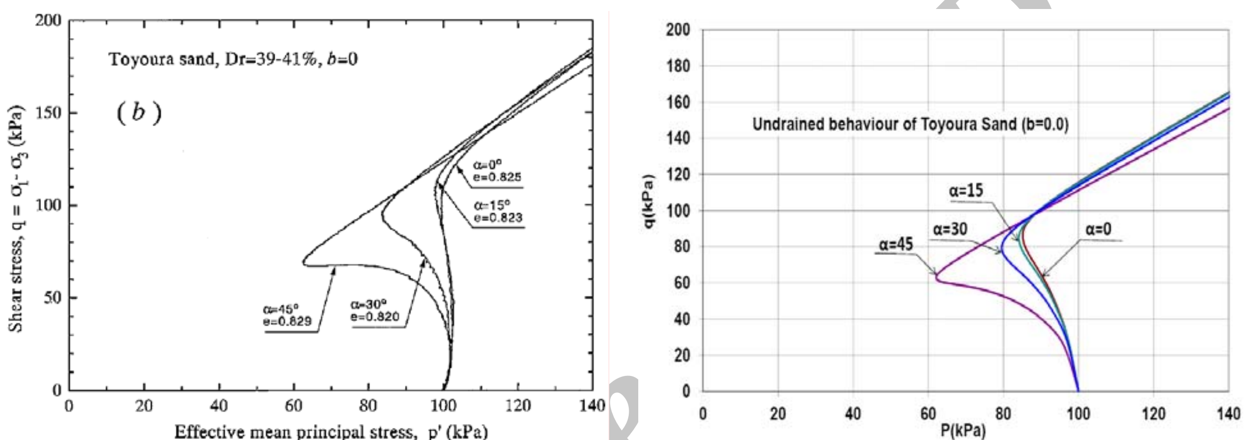
شکل (۸): مقایسه نتایج حاصل از مدل اصلاح شده و آزمایش های یوشیمین (۱۹۹۶)، تنش برشي در برابر کرنش برشي ۳۰-۳۳%= Dr



شکل (۹): مقایسه نتایج حاصل از مدل اصلاح شده و آزمایش های یوشیمین (۱۹۹۶)، تنش برشي در برابر تنش موثر میانگین ۳۰-۳۳% =Dr



شکل (۱۰): مقایسه نتایج حاصل از مدل اصلاح شده و آزمایش های یوشیمین (۱۹۹۶)، تنش برشي در برابر کرنش برشي ۳۹-۴۱%= Dr



شکل (۱۱): مقایسه نتایج حاصل از مدل اصلاح شده و آزمایش های یوشیمین (۱۹۹٦)، تنش برشي برابر تنش موثر میانگین ۳۹-۴۱%=Dr

۸ - ضمیمه

در این بخش با جزئیات بیشتری به معرفی بخش‌های مختلف مدل اولیه پرداخته می‌شود. سطح تسلیم مدل به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$f = (\eta - \alpha)^2 - M_\alpha^2 \left[1 - (p/p_c)^{\frac{1}{2}}\right] = 0$$

$$M_\alpha^2 = (5M_p - \alpha)(M_p - \alpha)$$

به طوریکه برای حالت‌های سه محوری فشاری و کششی به ترتیب خواهیم داشت:

فشاری $$M_{p,c} = \frac{6\sin\varphi_{p,c}}{3 - \sin\varphi_{p,c}}$$

کششی $$M_{p,e} = \frac{6\sin\varphi_{p,e}}{3 + \sin\varphi_{p,e}}$$

که در آن‌ها نیز $\varphi_{p,c}$ و $\varphi_{p,e}$ به ترتیب زوایاي اصطکاک داخلي در نقطه اوج سطح تسلیم در بارگذاري سه محوري فشاري و کششي بوده و از روابط زیر بدست می‌آیند:

فشاری $$\sin\varphi_{p,c} = \sin\varphi_\mu - k_p\psi_p$$

کششی $$\sin\varphi_{p,e} = \sin\varphi_\mu - k_p\psi_p + a_p$$

φ_μ زاویه اصطکاک داخلي مربوط به پارامتر وضعیت $\psi_p = 0$ است که در آزمایش سه محوري فشاري این مقدار تقریبا برابر مقدار زاویه اصطکاک داخلي بین ذرات است؛ a_p و k_p پارامترهاي مصالح هستند و ψ_p پارامتر وضعیت در نقطه اوج سطح تسلیم است. سطح شکست (گسیختگی) مدل نیز با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\sin\varphi_f = \sin\varphi_{cs} - k_f\psi_p$$

که در آن φ_{cs} زاویه اصطکاک داخلی در حالت بحرانی (برش با حجم ثابت) بوده و k_f پارامتر مصالح است.

قانون جریان[٦] مدل به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$d = \frac{d\varepsilon_p{}^p}{d\varepsilon_q{}^p} = A\,(M_{cs}-\eta)$$

که در آن پارامتر A برای شرایط سه محوری فشاری و کششی متفاوت بوده و بشکل زیر تعریف بدست می‌آید:

فشاری $A_c = 9/(9 - 2M_{PT,c}\eta + 3M_{PT,c})$

کششی $A_e = 9/(9 - 2M_{PT,e}\eta - 3M_{PT,e})$

$M_{PT,c}$ و $M_{PT,e}$ در روابط فوق بوسیله روابط زیر قابل محاسبه هستند:

فشاری $\sin\varphi_{PT,c} = \sin\varphi_{cs} + k_{PT}\,\psi$

کششی $\sin\varphi_{PT,e} = \sin\varphi cs + a_{PT} + k_{PT}\,\psi$

قانون سخت شوندگی مدل در طی برش به شکل زیر تعریف شده است:

$$\frac{\partial p_c}{\partial \varepsilon_q{}^p} = \frac{hG}{(p_f - p_c)_{ini}}(p_f - p_c)$$

که در آن h یک پارامتر بدون بعد است که به سختی خاک در حین برش بستگی دارد. G مدول برشی الاستیک و $(p_f - p_c)$ مقدار اولیه $(p_f - p_c)_{ini}$ در پایان تحکیم و قبل از اعمال برش هستند.

مدول الاستیک مدل بر اساس روابط زیر تعریف شده است:

$$G = G_r\,\frac{(2.973-e)^2}{1+e}(p/p_a)^{1/2}$$

$$K = K_r\,\frac{(2.973-e)^2}{1+e}(p/p_a)^{1/2}$$

که در آنها G_r و K_r بترتیب مقادیر مرجع مدول برشی و مدول حجمی بوده و بر اساس مدول الاستیک در فشار اتمسفریک قابل محاسبه‌اند.

۹- مراجع

[۱] Been, K., Jefferies, M.G., and Hachey, J.(1991), " The critical state of sands", Geotechnique, 41(3): 365–381.

[۲] Brewer, R. (1964),"Fabric and mineral analysis of soils", Wiley, New York.

[۳] Chang, K. T. and Sture, S. (2006). "Microplane modeling of sand behavior under non-proportional loading ", Computers and Geotechnics, Vol. 33, pp. 177-178.

[۴] Curray, J. R. (1956), ''Analysis of two-dimensional orientation data.'' J.Geol., 64, 117–131.

[۵] Imam, R. (1999) "Constitutive modeling of anisotropic sands for the analysis of static liquefaction" Ph D thesis, University of Alberta.

[۶] Imam, S.M.R., Chan, D.H., Robertson, P.K., and Morgenstern, N.R. (2002),"effect of anisotropic Yielding on the flow liquefaction of loose sand", Soil sand Foundations, Vol. 42(3): 33–45.

[۷] Imam, S.M.R., Morgenstern, N.R., Robertson, P.K., and Chan, D.H.(2005),"A Critical-State constitutive model for liquefiable sand", Canadian Geotechnical Journal, 42, pp. 830-855.

[۸] Lashkari (2009). "A constitutive model for sand liquefaction under rotational shear ", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 33, No. B1, pp 31-48.

[۹] Li, X.S. and Dafalias Y.F. (2002), "Constitutive Modeling of Inherently Anisotropic Sand Behavior" , Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 10 868-880.

[۱۰] Miura, S. and Toki, S. (1984),"Anisotropy in Mechanical Poperties and its Simulation of Sands Sampled From Natural Deposits", Soils and Foundations Vol. 24, No 3, 69-84.

[۱۱] Oda, M. (1972)," Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material", Soils Fdns 12, No. 1, 17-36.

[۱۲] Oda, M., and Nakayama, H. (1988) ''Introduction of inherent anisotropy of soils in the yield function.'' Micromechanics of granular materials, M. Satake and J. T. Jenkins, eds., Elsevier, Amsterdam, 81–90.

[۱۳] Oda, M. (1999) ''Fabric tensor and its geometrical meaning.'' Introduction to mechanics of granular materials, M. Oda and K. Iwashita, eds., A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 27–35.

[۱۴] Sadrnejad, S. A. (2007). "A general multi-plane model for post liquefaction of sand", Iranian Journal of Science &Technology, Transaction B: Engineering, Vol. 31, No. B1, pp. 123-141.

[۱۵] Shibuya S. and Hight, D. W. (1987)," On the stress path in simple shear" Geotechnique, 37(4): 511-515.

[۱۶] Yang, Z. X., Li, X. S. & Yang, J. (2008), "Quantifying and modeling fabric anisotropy of granular soils" , Géotechnique, Vol. 58, No. 4, pp. 237-248.

[۱۷] Yoshimine, M. (1996),"Undrained flow deformation of saturated sand under monotonic loading conditions", Ph.D. thesis, University of Tokyo, Tokyo, Japan.

۱۰- زیرنویس ها

[1] Transversely isotropic
[2] trace
[3] vector magnitude
[4] Lode Angle
[5] state parameter
[6] flow rule