



مدلسازی آزمون سه محوری زهکشی شده بر روی رس نرم با استفاده از یک مدل الاستوپلاستیک سخت شونده

حمیدرضا بلوری بزاز^۱، علی اخترپور^۲، سعید خرقانی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۳- استادیار، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

h_bolouri@sbu.ac.ir

خلاصه

در مصالح ریزدانه به ویژه رس های نرم، نرم بودن خاک گاه مشخصات تغییرشکلی و مقاومتی این مصالح را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد. لذا وجود مدل رفتاری که با دقت مناسبی اثرات این پدیده را شبیه سازی نماید، بسیار حائز اهمیت است. آزمایشات سه محوری انجام شده روی خاک های نرم، سخت شوندگی این مصالح را در کرنش های بالا نشان می دهد. در این مقاله، ابتدا نتایج آزمایشات سه محوری روی رس نرم بانکوک آمده است و در ادامه آن با استفاده از یک مدل رفتاری الاستوپلاستیک سخت شونده/ نرم شونده شناخته شده، مصالح نرم مذکور، با دقت مناسبی مدلسازی گردیده و پارامترهای مصالح بدست آمدند. تطابق مناسب مقادیر محاسبه شده و کمیت های تغییرشکلی و تنش اندازه گیری شده، حکایت از دقت مناسب این مدل رفتاری در شبیه سازی رفتار خاک های نرم دارد.

کلمات کلیدی: رس نرم، مدل رفتاری سخت شونده/نرم شونده، رفتار استاتیکی، آزمایش سه محوری

۱. مقدمه

خاک ریزدانه شهر بانکوک از جمله خاک های رسوبی هستند که مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. آزمایشات بسیاری روی این مصالح برای بدست آوردن پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی انجام شده است. برای نمونه می توان به آزمایشات سه محوری با شرایط تحکیم همسان و غیر همسان برای صحت سنجی تئوری حالت حدی اشاره کرد. در مصالح ریزدانه به ویژه رس های نرم، نرم بودن خاک گاه مشخصات تغییرشکلی و مقاومتی این مصالح را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد و در این خاک ها رفتار سخت شوندگی دیده می شود [1]. برای تحقیق حاضر، آزمایشات سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده (CD) روی یک نمونه خاک رس نرم بانکوک با پنج تنش همه جانبه مختلف در نظر گرفته شده است. در این مقاله، برای شبیه سازی رفتار مصالح، یک مدل رفتاری الاستوپلاستیک سخت شونده/نرم شونده استفاده شده است. این مدل بر اساس مدل رفتاری موهر - کولمب توسعه یافته است به گونه ای که پس از اولین تسلیم، زاویه اصطکاک و زاویه اتساع با تغییرات کرنش پلاستیک می تواند کاهش یا افزایش یابد. همچنین تغییرات مدول یانگ، همگام با تنش همه جانبه بصورت تابعی در مدل مذکور گنجانده شده است.

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۳- استادیار، دانشکده آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲. مشخصات مصالح و خلاصه‌ای از روند آزمایشات انجام شده

مصالح مورد نظر از دشت سیلابی و دلتای رودخانه چاو فرایا^۱ که از جنوب کشور تایلند می‌گذرد، انتخاب شده است. مطالعات میدانی و آزمایشگاهی زیادی، توسط محققین مختلف، بر روی مصالح دشت مذکور انجام شده است که خلاصه‌ای از آن بعنوان تشریح نظری خاک، در زیر آمده است.

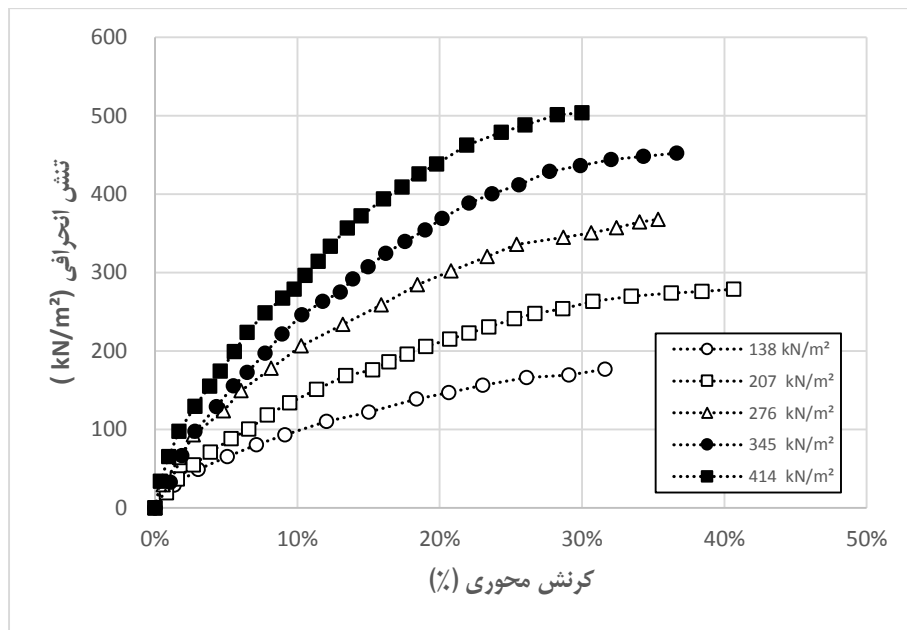
- (۱) مصالح دستریز یا هوازده: بالاترین لایه مصالح دستریز (ماسه‌های سیلتی شل) و پوسته هوازده (خاک رسی سیلتی نرم) بوده که رنگ آن خاکستری مایل به زرد می‌باشد. ضخامت این لایه در بیشتر سطح دشت بطور متوسط ۲ تا ۵ متر بوده و اعداد آزمایش نفوذ استاندارد این لایه بین ۲ تا ۲۱ می‌باشد. درصد رطوبت خاک بین ۱۰ تا ۳۵ درصد می‌باشد و سطح آب زیرزمینی در همین لایه قرار دارد.
 - (۲) رس بنگکاک خیلی نرم تا نرم: این خاک در عمق ۳ تا ۱۲ متری از سطح زمین قرار دارد. رنگ آن خاکستری تیره بوده و مقاومت برشی زهکشی نشده آن بین ۱۰ تا ۳۰ کیلوپاسکال می‌باشد. برای خاک‌های این لایه در مناطق مختلف دشت، درصد رطوبت طبیعی خاک بین ۶۰ تا ۱۰۵ درصد گزارش شده است.
 - (۳) رس سخت تا خیلی سخت: این خاک در عمق بین ۱۵ تا ۳۵ متری از سطح زمین قرار دارد که رنگ آن خاکستری مایل به قهوه‌ای می‌باشد. مقاومت برشی آن بین ۲۶ تا ۱۶۰ کیلوپاسکال بوده و درصد رطوبت طبیعی آن بین ۱۵ تا ۶۰ درصد می‌باشد. [2] [3]
- با توجه به آن که در این مقاله رس نرم بانکوک مد نظر می‌باشد، مصالح انتخابی از مصالح شماره (۲) می‌باشد. مشخصات دیگر این مصالح به شرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات مصالح

مقدار	عنوان
۱۳۰٪ ~ ۱۲۲٪	درصد رطوبت طبیعی
۳/۶۴ - ۳/۱۱	نسبت تخلخل طبیعی
۲/۷۵	چگالی ویژه
۱ ± ۱۱۸	حد روانی
۰/۵ ± ۴۳	حد خمیری
۱۶/۵ kN/m ³	وزن مخصوص خشک
۲٪ ± ۹۸٪	درجه اشباع

آزمایشات سه محوری بر روی نمونه‌های با قطر ۳۶ میلی‌متر و ارتفاع ۷۲ میلی‌متر انجام شده است. تمامی نمونه‌ها اشباع و سپس صورت همسان در پنج فشار همه‌جانه مختلف، تحکیم شده‌اند. با توجه به مقدار فشار تحکیمی هر آزمایش، زمان لازم برای تکمیل فرایند اشباع‌سازی بین ۲ تا ۵ روز بوده است. در ادامه نتیجه ۵ آزمایش فشاری سه محوری بر روی رس نرم اشباع با فشار همه‌جانه ۱۳۸، ۲۰۷، ۲۷۶، ۳۴۵ و ۴۱۴ کیلوپاسکال آمده است. شایان ذکر است که آزمایشات کرنش کنترل انجام شده‌اند. نتایج آزمایشات مذکور در شکل (۱) نمایش داده شده است. [2] [3] [4]

¹ - Chao Phraya River



شکل ۱- نتایج آزمایشات سه محوری

با توجه به آنکه پارامترهای مقاومتی برای بدست آوردن زاویه اصطکاک نهایی لازم است، مقدار آن از مطالعات انجام شده بر روی همان خاک، برداشت شده است. در مطالعات انجام شده بر روی خاک مذکور، زاویه اصطکاک داخلی بطور متوسط $23/6$ درجه و مقدار چسبندگی صفر گزارش شده است. در این مطالعه نیز از همین مقدار استفاده شده است. [3]

۳. مشخصات مدل رفتاری استفاده شده

یک مدل رفتاری مناسب برای مصالح نرم بایستی قادر باشد مقاومت برشی حداکثر، رفتار سخت شونده با افزایش کرنش، تغییر سختی وابسته به تنش همه جانبه و تغییرات حجمی خاک را در نظر بگیرد. [5] در این تحقیق با استفاده از مدل رفتاری سخت شونده/نرم شونده موجود در برنامه تفاضلات محدود FLAC، با استفاده از قابلیت برنامه نویسی FISH موجود در برنامه، استفاده شده است. [6] این مدل قادر است رفتار سخت شونده مصالح را تا رسیدن به مقاومت برشی حداکثر با در نظر گرفتن تغییر سختی با تغییر تنش همه جانبه را در نظر بگیرد که در ادامه تشریح می گردد

۳.۱. وابستگی تنش مدول الاستیک

تقریباً در همه مصالح ژئوتکنیکی وابستگی سختی به تنش همه جانبه مشاهده می گردد. رابطه (۱) که ابتدا توسط دانکن و چانگ پیشنهاد گردیده است برای تعریف این وابستگی مورد استفاده قرار گرفته است. محققینی نیز اعتبار این معادله را برای انواع خاک ها و سنگ ها تحت شرایط متفاوت آزمایشگاهی و صحرایی به اثبات رسانده اند.

$$E = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، E مدول یانگ، K پارامتر الاستیک، P_a فشار اتمسفر و n توان وابستگی مدول به تنش همه جانبه می باشد. [7] ضریب پواسون در تحلیل ثابت در نظر گرفته شده است که در محدوده رفتار الاستیک منجر به نتایج قابل قبولی می گردد.

۳.۲. سطح تسلیم و توابع پتانسیل

رفتار سخت شونده در مدل رفتاری مذکور با استفاده از تغییر پارامترهای موهر-کولمب به صورت تابعی از کرنش برشی پلاستیک تعریف شده است. سطح تسلیم در این مدل بر اساس روابط زیر تعریف شده است.

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 - \sin \varphi_m}{1 + \sin \varphi_m} + 2c_m \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi_m}{1 + \sin \varphi_m}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$f^t = \sigma_m^t - \sigma_3 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن f^s و f^t به ترتیب توابع پتانسیل برشی و کششی بوده و σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر می‌باشند. همچنین φ_m ، c_m و σ_m^t به ترتیب زاویه اصطکاک بسیج شده، زاویه اتساع بسیج شده و مقاومت کششی بسیج شده در مدل می‌باشد. قانون جریان در برش از نوع غیر وابسته و در کشش از نوع وابسته می‌باشد. توابع پتانسیل پلاستیک بصورت زیر در مدل تعریف گردیده‌اند. [8]

$$Q^s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 - \sin \psi_m}{1 + \sin \psi_m} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$Q^t = -\sigma_3 \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در این رابطه ψ_m زاویه اتساع بسیج شده می‌باشد. در توابع پتانسیل مفروض هم رفتار سخت‌شوندگی و هم نرم‌شوندگی با توجه به تغییر در زاویه اتساع بسیج شده قابل مدل‌سازی خواهد بود. [9] در مصالح نرم، سخت‌شوندگی اصطکاک و رفتار اتساعی مصالح بر پایه مفهوم پارامترهای بسیج شده تعریف گردیده که در ادامه تشریح می‌گردد.

۳.۳. سخت‌شوندگی اصطکاک و رفتار اتساعی

ورمر و دبورست رابطه (۶) را برای سخت‌شوندگی اصطکاک مصالح ژئوتکنیکی پیشنهاد نمودند که در آن زاویه اصطکاک بسیج شده φ_m به کرنش برشی پلاستیک، ε_p وابسته بوده و تا رسیدن به مقدار حداکثر φ_p به تدریج افزایش می‌یابد.

$$\sin \sigma_m = \begin{cases} 2 \frac{\sqrt{\varepsilon_p \times \varepsilon_f}}{\varepsilon_p + \varepsilon_f} \sin \sigma_p & \text{for } \varepsilon_p \leq \varepsilon_f \\ \sin \sigma_p & \text{for } \varepsilon_p > \varepsilon_f \end{cases} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه فوق، ε_p کرنش پلاستیک در زاویه اصطکاک حداکثر φ_p می‌باشد. [8]
راو، همبستگی را برای محاسبه زاویه اتساع بسیج شده در مصالح ژئوتکنیکی بر اساس زاویه اصطکاک بسیج شده به شرح روابط (۷) و (۸) ارائه نموده است که در ادامه آمده است.

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \varphi_m - \sin \varphi_{cv}}{1 - \sin \varphi_m \sin \varphi_{cv}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sin \varphi_{cv} = \frac{\sin \varphi_p - \sin \psi_p}{1 - \sin \varphi_p \sin \psi_p} \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این روابط ψ_m و ψ_p به ترتیب زاویه اتساع بسیج شده و زاویه اتساع حداکثر می‌باشند. پارامتر φ_{cv} زاویه اصطکاک در حالت تخلخل بحرانی و یا زاویه اصطکاک حجم ثابت مصالح می‌باشد. [10]

۴. شبیه‌سازی عددی

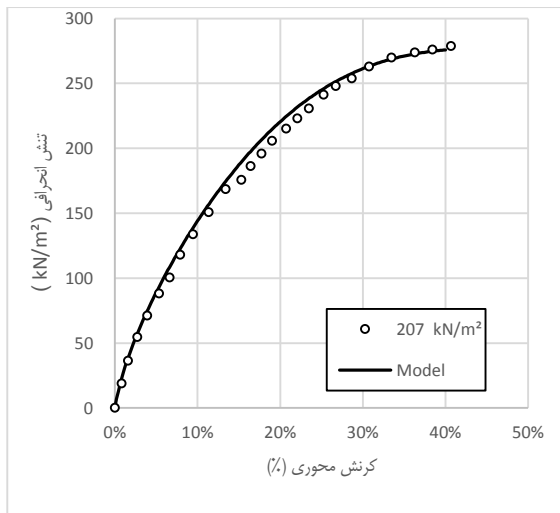
مدلسازی عددی آزمایش سه‌محوری با استفاده از نرم‌افزار *FLAC* صورت گرفت. کلیه توابع معرفی شده در بخش قبل با استفاده از قابلیت برنامه‌نویسی *FISH* به مدل رفتاری اعمال گردیده است. مدلسازی بر روی یک تک‌المان در شرایط تقارن محوری با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب انجام پذیرفته است. برنامه نوشته شده در هر گام از تحلیل، کرنش‌های پلاستیک را محاسبه نموده و بر اساس توابع تعریف شده، کلیه پارامترهای مدل بروزرسانی می‌گردد. بر اساس این روش کلیه آزمایشات سه‌محوری مدلسازی گردیده و پارامترهای نهایی به شرح جدول (۲) حاصل گردیدند. کلیه پارامترها، در بخش قبل معرفی شده‌اند بجز c و v که به ترتیب چسبندگی و ضریب پواسون الاستیک می‌باشند.

جدول ۲- پارامترهای استفاده شده جهت مدلسازی

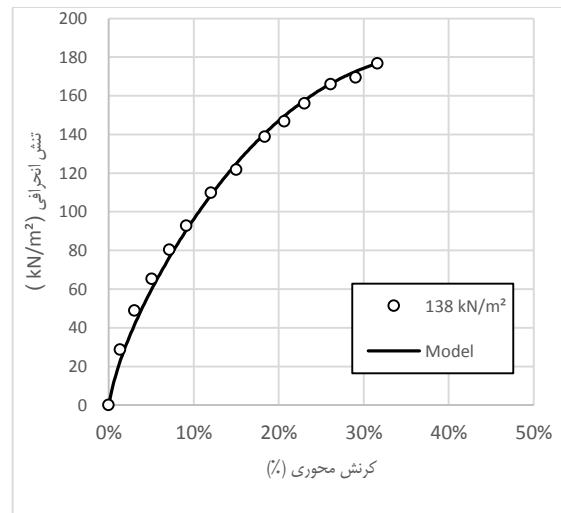
پارامتر	واحد	مقدار
ρ	gr/cm^3	۱/۶۵
n	-	۰/۹۹۷۵
K	-	۱۹/۱۷۶۱
v	-	۰/۱۵
c	kN/m^2	۰
ϵ_f	%	۳۲
ϕ_p	درجه	۲۳/۶

۵. نتایج شبیه‌سازی عددی

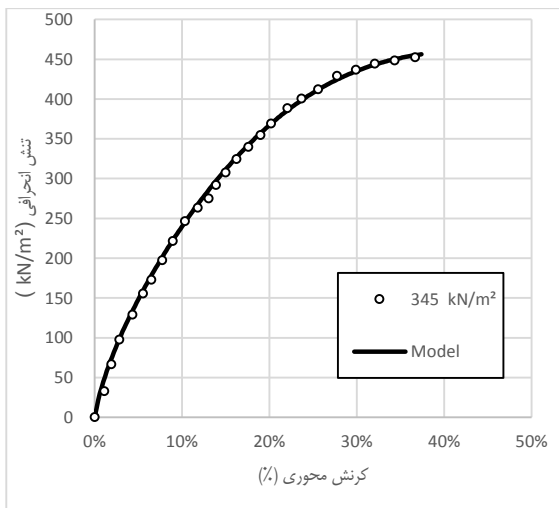
منحنی تنش انحرافی در برابر کرنش محوری حاصل از آزمایشات و مدل عددی برای شرایط مختلف فشار همه‌جانبه در شکل‌های (۲) تا (۶) آورده شده است. با توجه به شکل‌های (۲) تا (۶) می‌توان دریافت که تابع پیشنهادی ورمر و دبورست علی‌الرغم کرنش محوری بالا، برای تنش همه‌جانبه‌های متفاوت، به خوبی نتیجه داده است. همچنین با توجه به آنکه مقدار n به عدد ۱ خیلی نزدیک است، می‌توان دریافت که مصالح استفاده شده بسیار نرم هستند.



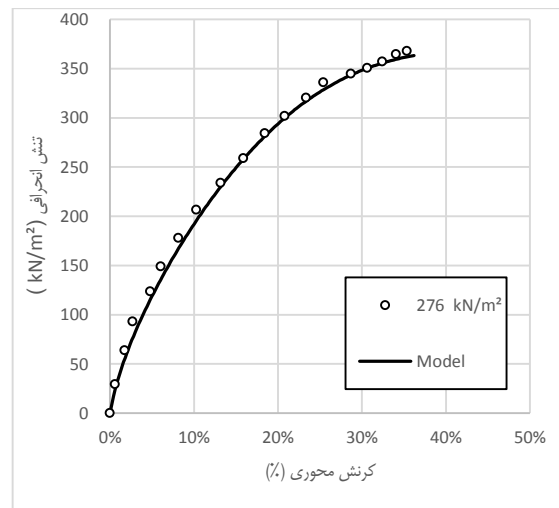
شکل ۳- نتایج آزمایش و مدل در فشار ۲۰۷ کیلوپاسکال



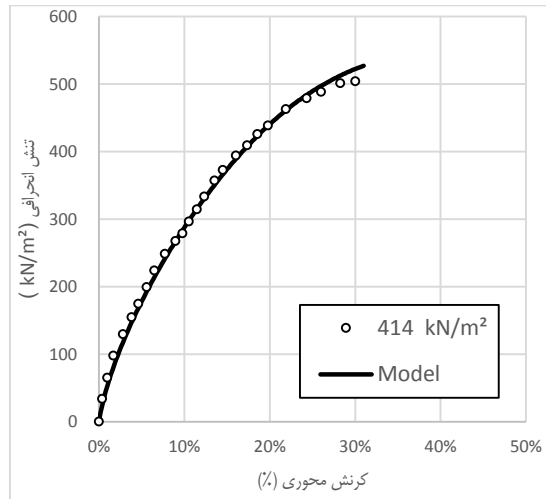
شکل ۲- نتایج آزمایش و مدل در فشار ۱۳۸ کیلوپاسکال



شکل ۵- نتایج آزمایش و مدل در فشار ۳۴۵ کیلوپاسکال



شکل ۴- نتایج آزمایش و مدل در فشار ۲۷۶ کیلوپاسکال



شکل ۶- نتایج آزمایش و مدل در فشار ۴۱۴ کیلوپاسکال

۶. نتیجه گیری

تمرکز اصلی این تحقیق بر ارائه پارامترهای لازم برای مدلسازی عددی رفتار مصالح نرم بوده است و پارامترهای لازم برای مدلسازی خاک مذکور برای استفاده در نرم افزار FLAC بدست آمده و تدقیق شدند. با توجه به نتایج بدست آمده می توان دریافت که تابع ارائه شده، در کرنش های محوری بالای مصالح نرم، به خوبی نتیجه داده است.

۷. منابع و مراجع

1. Balasubramaniam, A.S., Hwang, Z.M., (1980). Yielding of weathered Bangkok clay. *Soils and Foundations* 20 (2), 1-15.
2. Balasubramaniam, A.S., Hwang, Z.M., Waheed, U., Chaudhry, A.R., Li, Y.G., (1978). Critical state parameters and peak stress envelopes for Bangkok clays. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 1, 219-232
3. Chanaton Surarak et al. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays, (2012), *Soils and Foundations*, The Japanese Geotechnical Society
4. Escuder, I., Andreu, J. Rechea, M.(2005). "An analysis of stress-strain behavior and wetting effects on quarried rock shells", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, pp.51-60.



5. Aghaei A., Soroush A., Rayhani M. (2010). "Large-scale triaxial testing and numerical modeling of rounded and angular rockfill materials", *ScientiaIranica, Transaction A: Civil Engineering, Sharif University of Technology*, Vol.17, No.3, pp.169-183.
6. Itasca consulting group. (2011). *FLAC; Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Minneapolis, Minnesota, USA.
7. Duncan, J.M., Chang, C.Y. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils". *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.96, No. 5, pp.1629-53.
8. Vermeer, P. A., De Borst, R. (1984). "Nonassociated plasticity for soils, concrete and rock", *Heron*, Vol. 29, No.3.
9. Soroush, A. and Jannatiaghdam, R. (2012). "Behavior of rockfill materials in triaxial compression testing", *Iran, International Journal of Civil Engineering, Technical Note*, pp. 153-161
10. Rowe, P.W. (1963). "Stress-dilatancy, earth pressure and slopes", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.89, No.5, pp.6-37.