ارائه مدل رفتاری رس های نیمه اشباع بدون استفاده از مکش ماتریک

هادی احمدی[۱*]، فرزین کلانتری[۲]، مهیار عربانی[۳]

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی، دانشگاه گیلان

۲- استادیار مهندسی عمران ، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار مهندسی عمران ، دانشگاه گیلان

* HA1360@gmail.com

چکیده

تئوری‌های رایج برای بیان رفتار ژئومکانیکی خاکها غالباً در شرایط اشباع می‌باشد، در حالی‌که رفتار مکانیکی خاکهای نیمه‌اشباع تفاوت زیادی با رفتار انها در شرایط اشباع دارد. این تفاوت بویژه در مورد خاکهای چسبنده و رسی حائز اهمیت فراوان است. مشکلات آزمایشگاهی و پیچیدگی‌های تئوری سبب گردیده است که توسعه و پیشرفت درک رفتار خاکهای نیمه‌اشباع به کندی پیش رود. از طرف دیگر قوام و سفتی خاکهای چسبنده بستگی زیادی به میزان رطوبت آنها دارد. با کاهش رطوبت از نرمی این خاکها نیز کاسته می‌شود تا جاییکه رفتاری مشابه با سنگهای نرم در آنها ایجاد می‌شود. از اینرو معیار گسیختگی واقعی برای خاکهای چسبنده در شرایط رطوبت پایین را می‌توان بر اساس مدل‌های رفتاری سنگهای نرم توسعه داده شود. در این پژوهش با استفاده از یک سری اطلاعات و داده ها از مراجع معتبر و همچنین نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، مدل رفتاری جدیدی بصورت یک تابع هیپربولیک برای نمایش رفتار خاکهای ریزدانه رسی در حالت نیمه اشباع ارائه شده است. اساس کار دراین مدلسازی ترکیبی از رابطه موهرکولمب برای خاکهای اشباع و رابطه هوک و براون برای سنگهای نرم است. بر اساس رابطه ارائه شده در این پژوهش می‌توان با استفاده از پارامترهای ساده آزمایشگاهی، مقدار مقاومت برشی خاکهای نیمه‌اشباع را بدون اندازه‌گیری مستقیم مکش ماتریک تخمین نمود.

کلمات کلیدی: خاک نیمه اشباع، معیار گسیختگی ، سطح تسلیم ، تابع هیپربولیک، مکش ماتریک.

۱. مقدمه

کشور ما، بطور غالب دارای لایه‌های تحت‌الارضی سطحی غیر اشباع است. سطح آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق ایران، بویژه در نواحی مرکزی، پایین است. حتی در نواحی شمالی کشور نیز با وجود بالا بودن سطح آب زیرزمینی، بسیاری از اعماق سطحی که سهم اصلی در تحمل بارهای وارده را دارند و در محدوده تنش‌های روسازه هستند، از خاکهای نیمه‌اشباع تشکیل شده‌اند. بنابراین تعداد زیادی از مسائل ژئوتکنیکی مناطقی را شامل می‌شوند که دارای خاکهای نیمه‌اشباع است. این مناطق معمولاً در عمل نادیده گرفته می‌شوند و خاک بصورت کاملاً اشباع یا کاملاً خشک در نظر گرفته می‌شود. یک مدل رفتاری، مدلی ریاضی است که اجازه می‌دهد پاسخ (عکس‌العمل) یک محیط پیوسته بازسازی شود. مدل‌های رفتاری خاکهای

نیمه‌اشباع متفاوت از مدل‌های رفتاری خاکهای کاملاً اشباع است. در مورد خاکهای نیمه‌اشباع توجه به کشش سطحی و مکش خاک حائز اهمیت است[۱]. چندین نوع روابط رفتاری برای خاکهای غیر اشباع بوجود آمده‌اند. بر اساس مدل‌های رفتاری ارائه شده برای خاکهای نیمه‌اشباع، وضعیت خاک در سه‌حالت ممکن است به مرحله گسیختگی برسد : تغییرات تنش متوسط خالص، تغییرات تنش انحرافی و تغییرات مکش ماتریک. مدل‌های رفتاری خاک‌های نیمه اشباع به دو گروه تقسیم می‌شوند: مدل‌های الاستیک و مدل‌های الاستوپلاستیک. مدل‌های الاستیک رابطه افزایش کرنش با افزایش تنش خالص و مکش را بیان می‌کند. ویلـر و کاروبه (۱۹۹۶) در یک گزارش، مدل‌های رفتاری پیشنهاد شده را به صورت مقایسه‌ای مرور نموده است. مدل‌های الاستوپلاستیک را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود: مدل‌های منبسط شونده و غیر منبسط شونده. یکی از اولین مدل‌های رفتاری برای خاک‌های نیمه اشباع مدل پایه بارسلونا می‌باشد که اساس آن چارچوب تئوری ارائه شده توسط آلونسو و همکارانش (۱۹۸۷) می‌باشد. این مدل تقسیم مدل کم کلی اصلاح شده در خاک‌های کاملاً اشباع برای وضعیت نیمه اشباع است که در آن از مفهوم سطح تسلیم بارگذاری - فروریزش استفاده گردیده است. این مفهوم اجازه می‌دهد بسیاری از قسمتهای مهم رفتار خاک نیمه اشباع همانند فروریزش روی ترشدگی بازسازی می‌شود و این پایه توسعه بسیاری از مدل‌های الاستوپلاستیک می‌باشد. اغلب روابط رفتاری معتبر ارائه شده در خصوص خاکهای نیمه‌اشباع در سالهای اخیر مدل‌های الاستو پلاستیک می‌باشد. معروف‌ترین این مدل‌ها، پس از مدل آلونسـو و همکاران (۱۹۹۰) ، مدل ویلـر و سیواکومار (۱۹۹۵)، مدل بولزون و همکاران (۱۹۹۶) و مدل توماس و هی (۱۹۹۸) می‌باشند[۱]. مدل های مذکور غالباً دارای پارامترهایی می‌باشد که به درجه اشبـاع خاک بستگی دارد. مکـش ماتریک یک متغیر مهم در مشخص کردن وضعیت تنش در خاک نیمـه اشباع، در نظر گرفته می شود. از این رو کنترل و اندازه گیری مکش ماتریک، به منظور ارزیابی رفتار فیزیکی خاک نیمه اشباع تحت تغییرات شرایط تنش، تا حد زیادی ضـروری می باشد. اندازه گیری و کنترل فشار آب حفره‌ای منفی، مشکلاتی زیادی را به همراه دارد که این مساله جلوه‌گر یک محدودیت مهم عملی می باشد. از اینرو در این پژوهش سعی شده است رفتار مقاومتی خاکهای رسـی اشباع با استفاده از آزمایش های معمول مکانیک خاک تعیین گردد.

۲. جمع آوری اطلاعات

به منظور ارائه مدل رفتاری برای خاکهای نیمه اشباع از اطلاعات چندین مقاله که در مجلات معتبر بین المللی به چاپ رسیده است و مورد استفاده پژوهشگران بررسی رفتاری خاکهای نیمه اشباع می باشد، استفاده شده است. باتوجه به نیاز اطلاعاتی ایجاد مدل مذکور از مراجعی استفاده شده است که شرایط زیر را دارا باشند:

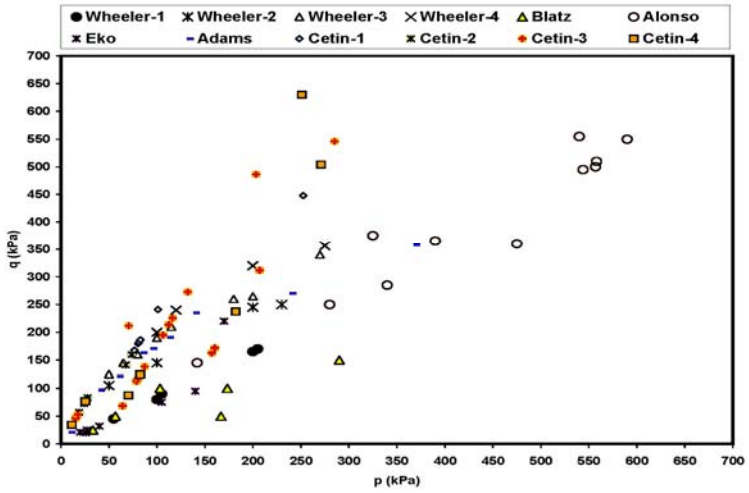
۱- خاک از جنس رس یا مخلوط سیلت و رس باشد .

۲- پارامترهای فیزیکی و شاخص خاک از جمله درصد رطوبت , حد روانی و شاخص خمیری موجود باشد.

۳- شامل یک سری اطلاعات از تنش همه جانبه متوسط وتنش برشی برحسب تغییرات درجه اشباعی و یا درصد رطوبت در خاکهای نیمه اشباع باشد.

مراجع مورد استفاده در آموزش مدل عبارتند از : ویلر و سیواکومار [2] ، بلاتز و همکاران [3] ، آدامز و ولفسون [4] ، اکو [5] ، ستین [6] ، رهاردجو و همکاران [7] ، منتانز [8] ، وانودهوسدن و همکاران [9].

با توجه به اینکه مدلسازی در فضای p و q انجام شده است . تنش های استخراج شده از مراجع فوق در این فضا آورده شده است. در شکل ۱ اطلاعات نهایی مورد استفاده در ایجاد مدل نشان داده شده است .



شکل ۱ - داده‌های نهایی مورد استفاده در ایجاد مدل

شایان ذکر است p و q به ترتیب تنش های همه‌جانبه متوسط و تنش های انحرافی هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{2} \quad , \quad q = \sigma_1 - \sigma_3 \qquad (1)$$

جهت ارزیابی مدل نیز اطلاعات آلونسو و همکاران [10] استفاده شده است.

۳. روش تحلیل

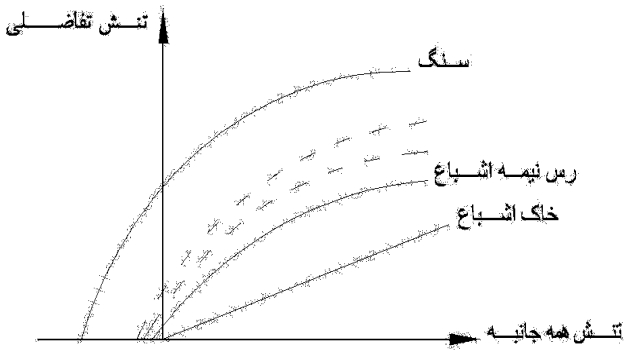
در حالت کاملاً اشباع رفتار خاکهای ریزدانه تابع تئوری حد بحرانی است. استخراج پارامترهای مقاومتی و پارامترهای حد بحرانی از طریق آزمایشهای سه محوری اشباع در تمامی آزمایشهای مکانیک خاک قابل انجام است. در فضای (p,q) تابع موهرکولمب برای خاک‌های اشباع در شرایط زهکشی شده به صورت معادله بیان می شود:

$$\mathbf{q} = M\mathbf{p} \qquad (2)$$

در حالت کاملاً خشک ، رس‌ها به کلوخه تبدیل شده و رفتاری مشابه سنگهای نرم از خود نشان می‌دهند، تا جاییکه به مرور زمان و با اعمال فشار به رس سنگ تبدیل خواهند شد. در نتیجه ارزیابی پارامترهای رس‌ها در حالت کاملاً خشک را می‌توان از طریق روابط معمول برای سنگهای سست انجام داد. این امربرای سیلت های رس‌دار تا حد زیادی صادق است.معادلات رایج مقاومت برشی برای سنگها (همانند معادله هوک و براون) معمولاً به صورت تابعی غیرخطی است که دارای یک عرض از مبدأ به عنوان چسبندگی اولیه و همچنین یک مجانب به عنوان حد نهایی مقاومت است. به عبارت دیگر تنش‌های ایزوتروپیک تا زمانی سبب تغییر مقاومت آنها می‌شوند که سنگها رفتار تراکم‌پذیری مشابه خاکها را داشته باشند. معادله هوک و براون برای سنگها را می توان در فضای (p,q) به صورت معادله ۳ می‌توان نشان داد:

$$\mathbf{q}^2 + \frac{m}{3} q_u \mathbf{q} - m q_u \mathbf{p} - q_u^2 = 0 \qquad (3)$$

در نتیجه روند حرکتی رس‌ها از حالت کاملاً اشباع به حالت کاملاً خشک و یا بالعکس می بایست شرایط فوق را ارضا کند. به عبارت دیگر رفتار خاک نیمه اشباع ما بین آنها چیزی است که در حالت کاملاً اشباع و کاملاً خشک می تواند داشته باشد، ضمن آنکه سیر صعودی مقاومت از حالت کاملاً اشباع (معیار موهر – کولمب) به حالت کاملاً خشک (همانند معیار هوک و براون) می‌بایست شرایطی پیوسته داشته باشد. شکل ۲ شرایط مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۲- سیر تکاملی رفتار مکانیکی خاکها در حالت اشباع تا کاملاً خشک

با توجه به شکل ۲ تابعی که بتواند رفتار واقعی خاکهای نیمه‌اشباع را بیان کند، بصورت منحنی صعودی است که دارای عرض از مبدأ به مراتب کوچکتر از معادلات رفتاری سنگ، شیبی ما بین دو حالت خشک و اشباع و حد نهایی نسبتاً بالا می‌باشد. از طرف دیگر تغییرات پارامترهای این تابع باید بتواند با دقت قابل قبولی، تابع خطی در شرایط اشباع و حالت نهایی در شرایط کاملاً خشک تبدیل نماید. تابع تانژانت هیپربولیک از جمله توابعی است که می‌تواند این رفتار را به صورت مناسبی بیان نماید.

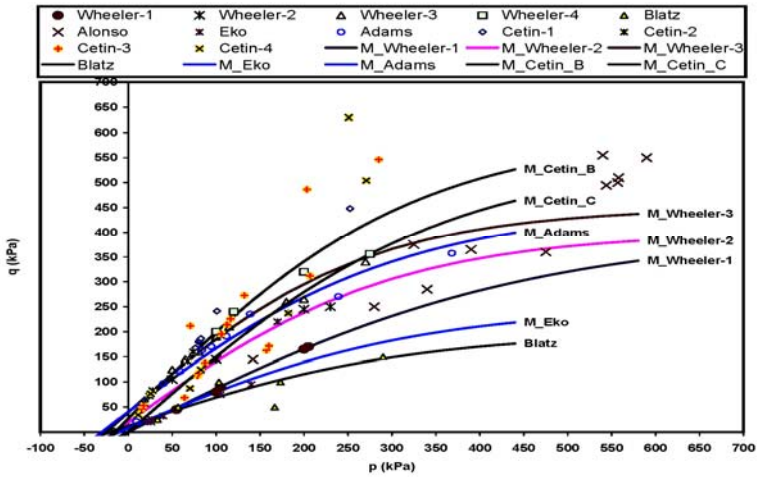
در حالت کلی تابع تانژانت هیپربولیک به صورت رابطه زیر خواهد بود :

$$f(x) = a\tanh(b(x+c)) \qquad (4)$$

در تابع رابطه ۴ پارامترهای a و b و c به ترتیب بیانگر خط مجانب, شیب اولیه و طول از مبدأ تابع تانژانت هیپربولیک است.

۴. ارائه مدل

به منظور ارائه مدل به صورت توابع هیپربولیک در این پژوهش برازش بر روی داده‌های موجود در بانک اطلاعاتی انجام پذیرفته است. نمودار توابع برازش یافته در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس این شکل پارامترهای ثابت توابع تانژانت هیپربولیک مطابق معادله ۴ استخراج شده است. در نتیجه با جایگذاری این مقادیر در تابع تانژانت هیپربولیک، معادلات هر یک از خاکهای مورد استفاده بصورت جدول ۱ بدست آمده است. با توجه به مقادیر تعیین شده برای a ، b و c و بر اساس پارامترهای مؤثر در تعیین رفتار مکانیکی خاکهای نیمه‌اشباع می‌توان روابط منطقی بین پارامترهای مؤثر و مقادیرثابت توابع هیپربولیک بدست آورد.



شکل ۳- برازش اطلاعات بصورت تابع تانژانت هیپربولیک

جدول ۱ - پارامترهای ثابت توابع تانژانت هیپربولیک برای داده‌های مختلف

ردیف	مرجع	a	b	c	رابطه هیپربولیک
۱	Wheeler & Sivakomar, 1995	400	0.0032	15	$q = 400\tanh(0.0032(p+15))$
۲	Blatz etal, 2002	500	0.0026	10	$q = 500\tanh(0.0026(p+10))$
۳	Adams & Wulfson , 1998	450	0.0030	30	$q = 450\tanh(0.0030(p+30))$
۴	Eko, 2005	250	0.0030	10	$q = 250\tanh(0.0030(p+10))$
۵	Cetin, 1999 (Soil-B)	550	0.0030	15	$q = 550\tanh(0.0030(p+15))$
۶	Cetin, 1999 (Soil-C)	550	0.0028	5	$q = 550\tanh(0.0028(p+5))$

پارامترهای مؤثر در تعیین رفتار مکانیکی خاک‌های نیمه اشباع به صورت زیر در نظر گرفته شده‌است:

الف) پارامترهای بیانگر میزان اشباعی خاک که می‌توان به صورت درجه اشباع (Sr) و یا درصد رطوبت (w) بیان گردد.

ب) با توجه به اینکه شاخص پلاستیسیته از جمله شاخص‌های تأثیرگذار در رفتار خاکهای‌ریزدانه هستند، باید از این پارامترها استفاده گردد. حد روانی (LL)، حد خمیری (PL)و نشانه خمیری (PI) می‌توانند اثرات این شاخص را نشان دهند.

ج) پارامترهایی‌که بیانگر رفتارخاکها درشرایط‌اشباع براساس معیار موهرکولمب باشند. زاویه اصطکاک داخلی (ϕ') درشرایط اشباع و به تبع آن پارامتر M در معیار موهرکولمب، می‌تواند تطبیق مدل را در شرایط نزدیک به اشباع کامل برقرار سازد.

د) مشابه آنچه در مورد شرایط کاملاً اشباع ذکر گردید، در شرایط کاملاً خشک و سفت از معیار هوک و براون استفاده شده‌است. تطبیق شرایط نزدیک به خشک با مدل می‌تواند توسط پارامترهای هوک و براون برقرار گردد. مقاومت تک‌محوری در شرایط کاملاً خشک و نزدیک به سنگ‌های تبدیل یافته (q_u) و پارامتر m می‌تواند منظور فوق را ارضاء نماید.

هـ) در نظر گرفتن اثرات مکش در خاکهای نیمه‌اشباع

با توجه به وابستگی برخی از پارامترها در هر یک از موارد فوق‌الذکر، پارامترهایی که بعنوان پارامترهای مؤثر در ایجاد مدل مورد استفاده گرفته است، عبارتند از: درصد رطوبت (w)، نشانه خمیری (PI)، پارامتر M در معیار موهر- کولمب، پارامتر m در مدل هوک و براون، مقاومت تک محوری (فشاری محصور نشده) در شرایط کاملاً خشک.

درصد رطوبت از طریق ساده‌ترین آزمایش در هر آزمایشگاه قابل تعیین است. بنابراین می‌تواند به عنوان معیاری برای درجه اشباعی خاک استخراج شده و مورد استفاده قرار گیرد. نشانه خمیری نیز از جمله آزمایشهای رایج در مکانیک خاک است که همواره برای خاکهای ریزدانه به منظور طبقه‌بندی آنها انجام می گیرد. پارامتر M در معیار موهر- کولمب نیز از طریق انجام آزمایش سه محوری زهکشی شده در شرایط اشباع و با استفاده از رابطه $\sin\phi' = 3M/(6+M)$ قابل تعیین است.

پارامتر m در معیار هوک و براون حتی در مورد سنگها نیز براحتی قابل تعیین نیست و مقادیر تجربی برای آن و بر اساس جنس سنگ پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه در مورد خاک‌های ریزدانه‌ای که به سنگ تبدیل می‌شوند، جنس سنگ نسبتاً یکسان خواهد بود، پارامتر m نیز در بازه محدودی تغییر خواهد نمود. در نتیجه در نظر گرفتن این پارامترها در بازه محدود شده (از کران پایین تا کران بالا) می‌تواند جواب قابل قبولی را ارائه نماید. بنابراین با توجه به اینکه مدل این پژوهش مختص رسها می‌باشد، این مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که برای رس سنگها، m حدود ۳/۴ پیشنهاد شده است.

از آنجاییکه در نظر گرفتن اثرات مکش در خاکهای نیمه اشباع حائز اهمیت است. از اینرو اغلب مدلهای رفتاری خاکهای نیمه اشباع تابعی از مکش ماتریک می‌باشند. تعیین مکش ماتریک در آزمایشگاه و در حین آزمایش‌های مقاومتی آسان نیست و نیاز به امکانات و تجهیزات ویژه و اصلاح شده دارد. از طرف دیگر این تجهیزات غالباً به صورت پژوهش در آزمایشگاههای بزرگ یافت می‌شود. از اینرو برای آنکه مدل ارائه شده کاربرد عمومی داشته باشد و براحتی از طریق آزمایش نمونه‌ها در آزمایشگاههای معمول مکانیک خاک قابل استفاده باشد، سعی گردیده است تا اثرات مکش در نظر گرفته نشود. در نتیجه در فضای (p,q,s) مکش ماتریک (s) در محدوده نسبتاً ثابتی $(50 \sim 100\,\text{kPa})$ محدود گردیده و بحث در فضای (p,q) انجام پذیرفته است. محدوده فوق الذکر برای مکش ماتریک بر اساس محدوده معمول مطالعاتی که توسط محقیق برجسته این علم انجام شده است[9-2] ، انتخاب گردیده است.

بنابراین تعیین a، b و c در تابع هیپربولیک از طریق پارامترهای w ، PI ، M ، m و q_u به صورت برازش خطی گام به گام انجام پذیرفته است. با توجه به تحلیل رگراسیون انجام گرفته شده، بهترین برازش خطی توابع چند متغیره به صورت معادلات زیر قابل ارائه است:

$$a = 133M + 494\,w - 41.2\,PI - 0.49\,q_u + 1126 \qquad (5)$$

$$b = -0.00065M - 0.084w + 0.00022\,PI + 0.0241 \qquad (6)$$

$$c = 32.3M + 38.6\,w - 0.24\,PI + 0.05\;0.0463\,q_u - 47.7 \qquad (7)$$

ضریب همبستگی (R^2) برای معادلات فوق به‌ترتیب برابر ۹۳/۳ ، ۹۵/۳ و ۷۶/۶ درصد بدست آمده‌است. این مقادیر بیانگر پراکندگی قابل قبول برای نتایج ورودی و خروجی می‌باشد.

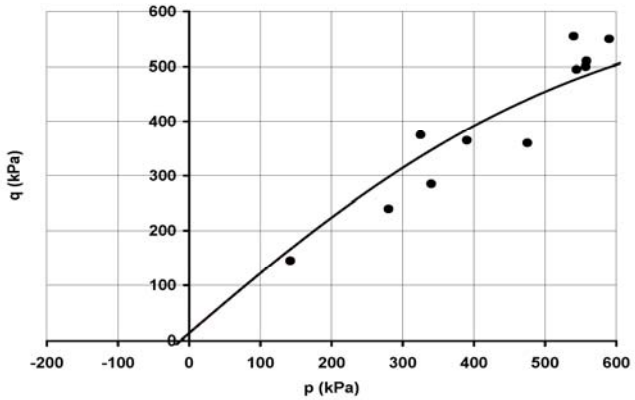
جهت آزمایش تابع ارائه شده از اطلاعات آلونسو و همکاران [10] استفاده شده است. بر اساس داده‌های موجود، ثوابت تشکیل دهنده تابع تانژانت هیپربولیک از طریق معادلات ۵ تا ۷ بصورت زیر بدست خواهند آمد:

$$a = 647 \quad , \quad b = 0.0017 \quad , \quad c = 12.2 \qquad (8)$$

در نتیجه تابع تانژانت هیپربولیک بدست آمده از داده‌ها به صورت معادله زیر می‌باشد:

$$q = 647 \tanh(0.0017(p + 12.2)) \qquad (9)$$

این تابع در شکل۴ نشان داده شده‌است. در نهایت مقادیر تخمین زده شده برای q از روی p با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردیده است. مقایسه مقادیر تخمین زده شده از تابع تانژانت هیپربولیک (معادله ۹) و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش توسط آلونسو و همکاران (۱۹۹۰) در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس این مقایسه حداکثر درصد خطای ایجاد شده در پیش‌بینی رفتار خاک به حدود ۱۸ درصد محدود می‌شود که با توجه به پراکندگی داده‌ها تا حدود زیادی طبیعی می‌باشد. همچنین بر این اساس تابع تانژانت هیپربولیک بدست آمده، دارای ضریب همبستگی ۷۸/۴ درصد برای داده‌های آزمایشی است. بنابراین با توجه به درصد خطاهای ایجاد شده، نتایج مدل ارائه شده قابل قبول بوده و می‌توان آن را جهت تعیین رفتار خاک‌های نیمه اشباع از روی پارامترهای موثر ساده مطلوب دانست.



شکل ۴ - ارزیابی مدل بدست آمده با استفاده از داده های آزمایشی

جدول ۲ - مقایسه مقادیر تخمین زده شده از تابع هیپربولیک و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

ردیف	p	q اندازه‌گیری شده	q تخمین زده شده	درصد خطا
۱	142	145	166	12.56
۲	280	250	297	15.92
۳	340	285	347	17.84
۴	475	360	440	18.12
۵	390	365	384	5.02
۶	325	375	335	11.95
۷	544	495	477	3.70
۸	557	500	484	3.36
۹	558	510	484	5.32
۱۰	590	550	499	10.20
۱۱	540	555	475	16.76

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از یک سری اطلاعات و داده ها از مراجع معتبر و همچنین نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، مدل رفتاری جدیدی برای نمایش رفتار خاکهای ریزدانه رسی در حالت غیر اشباع ارائه شده است. اساس کار دراین مدلسازی سیر تکامل تدریجی و پیوستگی روند مقاومتی برای خاکها از حالت کاملاً اشباع به حالت کاملاً خشک است. پارامترهای مؤثر مورد استفاده در رابطه مذکور درصد رطوبت خاک، مشخصات خمیری، زاویه اصطکاک داخلی زهکشی‌شده در حالت اشباع و مقاومت فشاری محصور نشده در شرایط خشک و سفت‌شده می‌باشد.

بر اساس رابطه ارائه شده در این پژوهش می‌توان با استفاده از پارامترهای مؤثر معرفی گردیده، مقدار مقاومت برشی خاکهای نیمه‌اشباع را بدون اندازه‌گیری مستقیم مکش ماتریک تخمین نمود. رابطه مذکور تابعی از نوع تابع تانژانت هیپربولیک است که دارای ضریب همبستگی ۷۶/۶ تا ۹۵/۳ درصد برای داده‌های آموزشی و ۷۸/۴ درصد برای داده‌های آزمایشی است.

مراجع

۱. احمدی، هـ . ، (۱۳۸۶)، "*ارزیابی مدل های رفتاری خاکهای نیمه اشباع به منظور کاربری در خاکریز راهها*"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت.

2. Wheeler, S. J. and Sivakumar, V., (1995), "*An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil*", Géotechnique, **45** (1), pp.35-53.
3. Blatz, J.A., Graham, J. and Chandler, N.A., (2002), "*Influence of suction on the strength and stiffness of compacted sand–bentonite*", Canadian Geotechnical Journal, **39**, pp. 1005~1015.
4. Wulfsohn, D., Adams, B. A. and Fredlund, D.G., (1998), "*Triaxial testing of unsaturated agricultural soils*", Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 69, pp. 317-330.
5. Eko, R.M., (2005), "*Use the triaxial stress state frameworke to evaluate the mechanical behaviour of an agricultural clay soil*", Soil & Tillage Research, **81**, pp. 71~85.
6. Cetin, H., (1999), "*Water content changes along shear planes in drained and undrained triaxial compression tests on unsaturated cohesive soils*", Tr. J. of Engineering and Environmental Science, pp. 465~471.
7. Rahardjo, H., Heng, O. B. and Choon, L. E., (2004), "Shear *strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests*", Canadian Geotechnical Journal, **41**, pp. 421~436.
8. Montanez, J. E. C., (2002), "*Suction and volume changes of compacted sand bentonite mixtures*", PhD thesis, University of London, Imperial College.
9. Vanoudheusden, E., Sultan, N. and Cochonat, P., (2004), "*Mechanical behaviour of unsaturated marine sediments: experimental and theoretical approaches*", Marine Geology, **213**, pp. 323~342.
10. Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A., (1990), "*A constitutive model for partially saturated soils*", Géotechnique, **40** (3), pp. 405~430.