

## مقایسه تعدادی از روابط فشار - نشست خاک به منظور انتخاب بهترین مدل پیش بینی میزان

## نشست صفحات فلزی در خاک لومی رسی

علی حاجی احمد<sup>۱\*</sup>، محمد قوشچیان<sup>۲</sup>، روح اله جلیلی بسحق<sup>۳</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران

۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۲۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۶/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۶/۲۵)

## چکیده

پیش بینی مقاومت غلتشی تأیر هنگام حرکت در خاک یک مسئله مهم در مهندسی کشاورزی است و تخمین آن در شرایط مختلف عملکردی وسایل نقلیه، لازم و ضروری می باشد. یکی از راه های پیش بینی مقاومت غلتشی، استفاده از روابط ارائه شده برای رفتار فشار - نشست خاک می باشد. در پژوهش حاضر ضرایب هر یک از این رابطه ها به کمک نرم افزار متلب تعیین گردید؛ سپس با استفاده از دو معیار ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا مقایسه ای بین آنها صورت گرفت. نتایج نشان دادند که رابطه آپادیا نسبت به سایر رابطه های مورد بحث در شرایط متفاوت محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری با ضریب تبیین متوسط ۰/۹۱۷۵ و متوسط ریشه میانگین مربعات خطای ۶۹/۶۲۱۱ از دقت بیشتری برخوردار می باشد. همچنین از بین رابطه های مورد نظر، رابطه گوتلند و بنوئیت با ضریب تبیین متوسط ۰/۷۲۳۷ و متوسط ریشه میانگین مربعات خطای ۱۲۹/۰۷۱ با دقت کمتری مقدار نشست را پیش بینی می کند.

واژه های کلیدی: تراکم پذیری خاک، خاک لومی رسی، رابطه فشار - نشست، مقاومت غلتشی، نرم افزار متلب

$$P = k \cdot z^{1/2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

همچنین رابطه (۲) که به رابطه گوریاچگین معروف است برای همین منظور گسترش داده شده است.

$$P = k \cdot z^n \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه فرض بر آن است که خاک همگن می باشد و هر دو پارامتر تجربی  $k$  و  $n$  ثابت هستند و به هندسه و ابعاد صفحه ای آزمایش وابسته نیستند؛ اما مطالعات برخی از دانشمندان نشان داده است که مقادیر  $k$  و  $n$  به ابعاد و هندسه صفحه وابسته می باشند و با تغییر آنها تغییر می کنند).

رابطه ی برنشتاین-گوریاچگین با جایگزین کردن  $k$  با دو مدول مجزا  $k_c$  (چسبندگی) و  $k_\theta$  (اصطکاکی) توسعه داده شده و رابطه (۳) برای پیش بینی رفتار فشار - نشست خاک پیشنهاد شده است.

$$P = \left( \frac{k_c}{b} + k_\theta \right) \cdot z^n \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این رابطه،  $b$  عرض صفحه مستطیلی و در صورت استفاده از صفحات دایره ای، قطر صفحه آزمایش می باشد. در این رابطه برای خاکهای چسبنده (خاک رسی)، ضریب اصطکاک بسیار ناچیز می باشد و می توان از آن صرف نظر کرد به همین

## مقدمه

اهمیت انرژی مورد نیاز ادوات کشاورزی و لزوم تطبیق صحیح ماشین ها و تراکتور و همچنین نیاز به تخمین صحیح تعداد، اندازه و خصوصیات ادوات خاک ورزی مورد نیاز مزارع، تعیین عملکرد کشتی وسیله نقلیه را از اهمیت ویژه ای برخوردار می کند. بخش مهمی از مطالعه در مورد عملکرد کشتی یک چرخ را پیش بینی نشست و نیروی نفوذ (فشار) تشکیل می دهد. پیش بینی رفتار فشار - نشست خاک از موارد ضروری برای تعیین کشت وسیله نقلیه، مقاومت غلتشی، قابلیت عبور بر روی خاک، فشردگی خاک، عمق ریشه و غیره می باشد. این پیش بینی بر اساس مدلسازی منحنی های فشار - نشست خاک صورت می پذیرد. در سال ۱۹۱۳ یک محقق آلمانی به نام رادولف برنشتاین اولین راهکار عمومی استفاده از پارامترهای خاک برای مطالعه وسایل برون جاده ای را ارائه نمود. برنشتاین در مقاله ی خود رابطه (۱) را برای پیش بینی رفتار فشار - نشست خاک پیشنهاد کرد (Youssef & Ali, 1982; Schuring, 1964; Okello, 1991).

قابل برون‌یابی برای محاسبه مقاومت غلتشی وسایل نقلیه در ابعاد حقیقی خواهد بود.

مدل‌های رایج برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی خاک، ناحیه تماس خاک و تیر را مسطح در نظر می‌گیرند. در تحقیقی به منظور افزایش دقت در پیش‌بینی مقاومت غلتشی تیرهای با قطر کمتر از ۵۰ سانتی‌متر از یک صفحه فلزی به شکل کمان برای تعیین رفتار فشار \_ نشست خاک استفاده شده‌است (Meirion-Griffith & Spenko, 2013).

محققان، مدل‌های متعددی برای رفتار فشار \_ نشست خاک ارائه کرده‌اند و برخی نیز به مقایسه مدل‌های مذکور جهت تعیین دقیق‌ترین رابطه پرداخته‌اند. زلک و همکاران، مقادیر سختی و مدول یانگ دو نمونه خاک از جنگل‌های ایرلند را به منظور تعیین رفتار فشار \_ نشست خاک مورد مطالعه قرار دادند؛ آنها یک مدل غیر خطی مستقل از پارامتر سختی خاک پیشنهاد کردند که قادر بود با خطای کمتر از ۱۹ درصد به پیش‌بینی رفتار فشار \_ نشست خاک بپردازد (Zeke et al., 2007; Khabbazi et al., 2017).

اما تاکنون در بین این روابط و برای خاک‌های لومی رسی که یکی از رایج‌ترین خاک‌های کشور نیز می‌باشد، مقایسه‌ای ارائه نشده است تا بهترین رابطه تعیین شود؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر، تعیین ضرایب هر یک از این رابطه‌ها به کمک نرم افزار متلب و انجام مقایسه‌ای بین آنها به منظور انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی میزان نشست صفحات فلزی در خاک لومی رسی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در زمینی به مساحت ۵۰ × ۸ مترمربع در دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران صورت گرفت که بافت خاک آن، لومی رسی با ۲۸٪ رس و ۴۲٪ سیلت بود<sup>۳</sup>. قبل از انجام آزمایش‌ها، زمین مورد نظر توسط گاواهن برگردان‌دار شخم زده شد و پس از جدا نمودن سنگ‌ها، به منظور یکنواخت نمودن سطح و شکستن کلوخه‌ها عملیات خاک‌ورزی ثانویه با استفاده از دیسک انجام گردید. از آنجاکه مقدار محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری از عوامل مهم و تأثیرگذار بر روابط فشار \_ نشست خاک می‌باشند؛ در این تحقیق برای تعیین بهترین رابطه، هر یک از متغیرهای محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری در سه سطح در نظر گرفته شدند. معمولاً محققان برای ایجاد رطوبت مورد نظر در مزرعه پس از انجام

ترتیب برای یک خاک اصطکاکی (خاک شنی خشک)، مقدار ضریب چسبندگی بسیار ناچیز می‌باشد و می‌توان از آن صرف نظر کرد (Meirion-Griffith & Spenko, 2013). در این رابطه فرض شده است که یک رابطه خطی بین  $k$  و  $\frac{1}{b}$  وجود دارد و سه پارامتر  $n$ ،  $k_c$  و  $k_0$  برای شرایط آزمایش، ثابت می‌باشند (Lyasko, 2010).

با این وجود محققان با انجام آزمایش‌های تجربی با سه صفحه و روی دو نوع خاک شخم خورده و خاک سفت، دریافتند که همبستگی خطی بین  $k$  و  $\frac{1}{b}$  بسیار ناچیز می‌باشد (ضریب تبیین حدود ۰/۰۱ تا ۰/۰۲۴ است) و پارامتر  $n$  چندان به ابعاد صفحه وابسته نیست. با به کار بردن سه صفحه مستطیلی با ابعاد مختلف و انجام آزمایش‌های فشار \_ نشست؛ رابطه (۴) برای پیش‌بینی رفتار خاک در شرایط اعمال بار ارائه شد (Upadhyaya et al., 1993).

$$P = (k_1 + b \cdot k_2) \cdot \left(\frac{z}{b}\right)^n \quad \text{(رابطه ۴)}$$

در این رابطه  $k_1$  و  $k_2$  ثابت‌های مرتبط با خاک و فشار عمودی وارد بر خاک هستند که  $k_1$  بر حسب kPa و  $k_2$  بر حسب kPa/m می‌باشد.

گوتلند<sup>۱</sup> و بنوئیت<sup>۲</sup> به منظور افزایش دقت در ارائه مدل‌های فشار \_ نشست خاک با انجام آزمایش‌هایی، مدلی را جایگزین رابطه بکر (رابطه (۳)) نمودند که نشست صفحه‌های دایره‌ای به قطر  $b$  را با دقت بیشتری تخمین بزند. در مدل آنها (رابطه (۵))، میزان نشست خاک به دو بخش الاستیک (برگشت‌پذیر) و پلاستیک (برگشت‌ناپذیر) تقسیم شده است (Gotteland & Benoit, 2006).

$$P = \left(\frac{c_m}{b^m} + \frac{s_m}{b^{1-m}} z\right) \left(1 - \exp\left[-\frac{s_0}{c_m} \cdot \frac{z}{b^{1-m}}\right]\right) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

برای استخراج این مدل، نفوذ صفحاتی دایره‌ای با قطرهای مختلف در سه نوع خاک استاندارد مورد مطالعه قرار گرفته است که خاک شنی برای انواع اصطکاکی، خاک سیلتی برای خاک‌های چسبنده و خاک شنی - سیلتی برای خاک‌های اصطکاکی چسبنده استفاده شده است. مدل جدید دارای چهار پارامتر  $m$ ،  $c_m$ ،  $s_m$  و  $s_0$  است که برای هر نوع خاک مقادیر ثابتی دارند. این پارامترها با انجام آزمون نفوذ توسط دو صفحه با قطرهای مختلف قابل محاسبه هستند. از ویژگی‌های دیگر این مدل این است که پارامترهای آن به ابعاد صفحه وابسته نبوده و بنابراین

۳. طبق گزارش آزمایشگاه خاکشناسی دانشکده مهندسی آب و خاک دانشگاه تهران

1. Gotteland  
2. Benoit

آوردن ضرایب روابط (۲) تا (۴) (روابط بکر، گوتلند و بنوئیت و آپادیا یا) که شامل عرض صفحه نیز هستند، استفاده از داده‌های حداقل دو آزمون فشار \_ نشست با دو صفحه متفاوت ضروری است. اما در این آزمایش‌ها، برای بالا بردن دقت در ارائه ضرایب، از سه صفحه استفاده گردید. شکل و اندازه صفحه‌های مورد استفاده و همچنین میزان فشار اعمالی به خاک در آزمون‌های فشار \_ نشست، استاندارد خاصی ندارد؛ با این حال در این آزمایش‌ها سعی بر آن شد تا ابعاد صفحه‌ها به گونه‌ای انتخاب گردند که بیشتر محققان در تحقیقات خود از آن‌ها استفاده کرده‌اند. هندسه و ابعاد این صفحه‌ها در شکل (۳) قابل مشاهده بوده و در جدول (۱) ارائه شده است. قابل ذکر است که هر سه صفحه، دارای مساحت یکسان بودند و تنها ضریب رعنائی<sup>۲</sup> آنها با یکدیگر متفاوت بود. برای محاسبه ضرایب هر یک از روابط مورد نظر، از نرم افزار متلب (MATLAB R2016a) استفاده گردید.



شکل ۲. دستگاه سنجش مقاومت مکانیکی خاک



شکل ۳. صفحات مورد استفاده در آزمون‌های فشار\_ نشست

### نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که ضرایب رابطه برنشتاین-گوریاچیگین به ابعاد صفحه وابسته هستند. بنابراین در پژوهش حاضر برای افزایش دقت در تعیین ضرایب این رابطه، نمودارهای فشار \_ نشست همه صفحات مورد استفاده در آزمایش، برای

یکنواخت آبیاری، اجازه می‌دهند تا با مرور زمان، محتوای رطوبت خاک تبخیر شده و با نفوذ بخشی از آب به خاک‌های زیر سطحی، به شرایط مورد نظر رسیده و سپس به انجام آزمایش‌ها می‌پردازند. برای ایجاد سطوح مختلف فشردگی خاک نیز خاک شخم خورده به عنوان پوک‌ترین (غیر فشرده‌ترین) تیمار در نظر گرفته می‌شود و معمولاً برای بالا بردن سطح فشردگی در آن منطقه از غلتک، عبور دادن تراکتورهای چرخ لاستیکی و چرخ زنجیری، فشرده سازهای ارتعاشی و سایر عوامل فیزیکی فشرده کننده خاک استفاده می‌کنند. در این پژوهش برای کنترل رطوبت و فشردگی؛ ابتدا از قطعه زمین انتخاب شده، سه قطعه به ابعاد ۱×۲۰ متر انتخاب گردید. به دلیل اینکه آبیاری یکنواخت قطعه زمینی با این ابعاد در مزرعه کاری بسیار دشوار می‌باشد (به علت هموار نبودن سطح خاک و همچنین زمان لازم برای رسیدن آب از ابتدای قطعه به انتهای آن). هر یک از این قطعه زمین‌ها به چند قسمت مساوی تقسیم گردید (شکل ۱) و سپس به همه قسمت‌ها به مقدار یکسان آب اضافه شد. همچنین در اجرای آزمایش‌ها، خاک شخم خورده به عنوان خاک پوک در نظر گرفته شد و برای ایجاد دو سطح فشردگی دیگر از تراکتور استفاده گردید.



شکل ۱. تقسیم قطعه زمین به قسمت‌های کوچکتر به منظور آبیاری یکنواخت

برای تعیین رفتار فشار \_ نشست خاک، دستگاه مخصوصی تحت عنوان دستگاه سنجش مقاومت مکانیکی خاک ساخته شد؛ در این دستگاه از یک سیلندر هیدرولیکی برای نفوذ صفحه در خاک استفاده شده است (شکل ۲). فشار وارد بر خاک توسط یک حسگر فشارسنج و مقدار نفوذ صفحه در خاک با استفاده از یک حسگر نوری اندازه‌گیری می‌شد. خروجی این دو حسگر، پس از عبور از واحد تقسیم ولتاژ به یک واحد جمع‌آوری داده<sup>۱</sup> متصل شده و با فواصل زمانی ۰/۱s در یک رایانه ذخیره می‌شدند.

برای به دست آوردن ضرایب رابطه (۱) (رابطه برنشتاین - گوریاچیگین)، داده‌های یک آزمون کافی است ولی برای بدست

2. Aspect ratio

1. Data Acquisition Unit (DAU)

بکر و همکارانش روش دیگری را در تعیین عکس‌العمل خاک هنگام بارگذاری ابداع نمودند. رابطه آنها در بسیاری از خاک‌ها و با صفحات مختلف عملکرد خوبی از خود نشان داد، به گونه‌ای که در حال حاضر این رابطه یکی از پرکاربردترین معادله‌ها در پیش‌بینی رفتار فشار \_ نشست خاک می‌باشد. به همین دلیل بسیاری از محققان اقدام به اندازه‌گیری ضرایب این رابطه در خاک‌های مختلف نمودند. در پژوهش حاضر، ضرایب بدست آمده برای رابطه بکر، با تغییر محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری خاک، رفتار مشخصی از خود نشان ندادند.

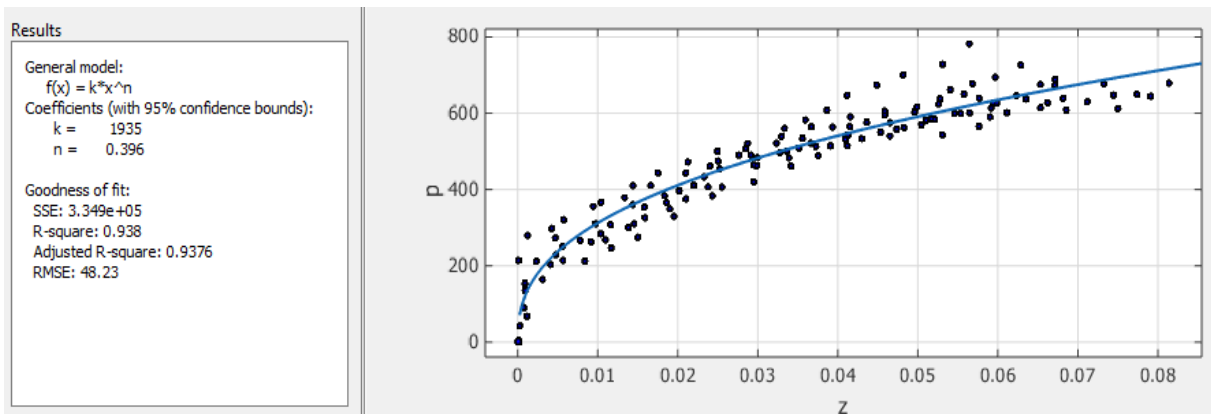
یک محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری مشخص، مانند شکل (۴) در یک صفحه ترسیم گردیدند. سپس با برآزش یک منحنی به فرم رابطه‌ی (۲) بر نقاط حاصل، ضرایب این رابطه تعیین گردید، که این مقادیر در جدول ارائه شده‌اند.

#### تعیین ضرایب معادله بکر

معادله بکر شامل سه ضریب ثابت می‌باشد؛ مقادیر محاسبه شده‌ی این ضرایب در سطوح محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری متفاوت، با مورد آزمون قرار دادن هر سه صفحه‌ای که در جدول (۱) به آنها اشاره شد؛ در جدول ارائه شده است.

جدول ۱. هندسه و ابعاد صفحه‌های مورد استفاده در بدست آوردن ضرایب رابطه‌های فشار\_ نشست خاک

شماره صفحه	شکل	ابعاد (mm)	مساحت ( $10^3 \text{ mm}^2$ )	ضریب رعنایی
۱	مربع	$132/93 \times 132/93$	۱۷/۶۷	۱
۲	مستطیل	$162/81 \times 108/54$	۱۷/۶۷	۱/۵
۳	مستطیل	$187/98 \times 93/99$	۱۷/۶۷	۲



شکل ۴. نمودار فشار\_ نشست صفحات مختلف برای محتوای رطوبت ۱۸/۶۶٪ و جرم مخصوص ظاهری  $1353/72 \text{ kg/m}^3$

جدول ۲. ضرایب رابطه برنشتاین - گوریاجیگین در شرایط متفاوت محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری خاک

محتوای رطوبت	جرم مخصوص ظاهری	n	k	R <sup>۲</sup>	RMSE
۱۸/۶۶	۱۳۵۳/۷۲	۰/۳۹۶	۱۹۳۵	۰/۹۳۸۰	۴۸/۲۳
۱۳/۴۸	۱۳۱۰/۵۰	۰/۴۲۱	۳۲۲۳	۰/۹۶۰۴	۴۷/۲۹
۸/۰۹	۱۳۱۱/۶۳	۰/۴۰۴	۳۵۱۴	۰/۸۶۲۴	۹۱/۲۱
۱۶/۹۵	۱۵۷۴/۴۱	۰/۴۶۶	۴۸۹۴	۰/۹۳۱۰	۶۶/۰۴
۱۴/۸۰	۱۶۲۱/۰۶	۰/۴۲۴	۵۳۸۲	۰/۹۰۲۴	۸۲/۸۶
۶/۵۵	۱۵۴۱/۴۲	۰/۵۷۴	۱۵۲۰۰	۰/۷۹۲۰	۱۲۷/۶۰
۱۶/۷۰	۱۴۵۸/۳۸	۰/۳۷۷	۲۷۸۵	۰/۹۶۳۷	۴۱/۸۶
۱۱/۹۷	۱۵۱۸/۶۷	۰/۴۳۴	۵۲۰۹	۰/۹۰۲۵	۷۱/۹۷
۷/۲۹	۱۴۹۷/۶۳	۰/۳۹۳	۴۴۹۰	۰/۸۶۴۳	۹۲/۵۰

جدول ۳. تعیین بهترین ضریب رابطه بکر در شرایط متفاوت محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری خاک

محتوای رطوبت	جرم مخصوص ظاهری	n	$k_c$	$k_0$	$R^2$	RMSE
۱۸/۶۶	۱۳۵۳/۷۲	۰/۳۹۵	-۵/۴۱۲	۱۹۸۵	۰/۹۳۸۲	۴۸/۳۰
۱۳/۴۸	۱۳۱۰/۵۰	۰/۴۲۱	-۴۳/۰۳	۳۶۴۸	۰/۹۶۵۲	۴۴/۴۷
۸/۰۹	۱۳۱۱/۶۳	۰/۴۰۱	-۴۴/۲۷	۳۹۲۷	۰/۸۶۵۹	۹۰/۳۷
۱۶/۹۵	۱۵۷۴/۴۱	۰/۴۶۷	-۲۷/۱۳	۵۱۹۹	۰/۹۳۱۹	۶۵/۷۹
۱۴/۸۰	۱۶۲۱/۰۶	۰/۴۲۹	۱۰/۱۳۰	۴۴۹۲	۰/۹۱۳۷	۷۸/۱۹
۶/۵۵	۱۵۴۱/۴۲	۰/۲۹۰	-۸۷/۲۷	۴۱۳۹	۰/۷۴۶۵	۱۴۲/۷۰
۱۶/۷۰	۱۴۵۸/۳۸	۰/۳۷۷	۰/۸۹	۲۷۷۵	۰/۹۶۳۷	۴۲/۰۰
۱۱/۹۷	۱۵۱۸/۶۷	۰/۴۳۹	-۶۱/۸۵	۵۹۵۱	۰/۹۰۶۴	۷۶/۹۹
۷/۲۹	۱۴۹۷/۶۳	۰/۳۹۸	۹۵/۳۲	۳۶۲۸	۰/۸۷۹۶	۸۷/۳۸

خاک صورت گرفت. جدول (۶) ریشه میانگین مربعات خطای مدل‌های مورد نظر را در محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری مشخص نشان می‌دهد. با توجه به این مقادیر، رابطه‌ی آپادایا عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی مقدار نشست از خود نشان می‌دهد. این رابطه بجز در سه سطح رطوبت ۱۸/۶۶٪، ۱۴/۸۰٪ و ۱۱/۹۷٪، در سایر رطوبت‌ها دارای دقت بیشتری نسبت به روابط دیگر می‌باشد. گرچه در این رطوبت‌ها، رابطه‌ی های برنشتاین-گوریاچیگین یا بکر نسبت به رابطه آپادایا دارای مقادیر ریشه مربعات خطای کمتری هستند، اما اختلاف این مقادیر با مقادیر رابطه آپادایا بسیار ناچیز است و این رابطه نیز در رطوبت‌های ذکر شده، به طور قابل قبولی مقدار نشست را پیش‌بینی می‌کند. با توجه به مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در رطوبت ۱۸/۶۶ درصد و جرم مخصوص ظاهری ۱۳۵۳/۷۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب، روشن است که دقت همه‌ی مدل‌ها در پیش‌بینی مقدار نشست کم می‌باشد. با این حال در رطوبت و جرم مخصوص ظاهری ذکر شده، مدل برنشتاین-گوریاچیگین با ریشه‌ی مربعات خطای ۰/۰۱۱۲، نسبت به سایر مدل‌ها مقدار نشست را بهتر پیش‌بینی می‌کند و در دو رطوبت ۱۴/۸۰ و ۱۱/۹۷ درصد، رابطه بکر نسبت به سایر رابطه‌ها دارای مقادیر کمتر ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد.

### ضرایب معادله آپادایا

ضرایب به دست آمده برای رابطه آپادایا در جدول (۴) نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده، در این رابطه نیز با تغییر محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری خاک، رفتار مشخصی دیده نمی‌شود.

### ضرایب رابطه گوتلند و بنوئیت

در جدول ۵ ضرایب رابطه گوتلند و بنوئیت در سطوح متفاوت محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری نشان داده شده است. کم بودن مقدار ضریب تبیین و بالا بودن مقدار ریشه میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که رابطه مذکور، در خاک لومی-رسی به خوبی نمی‌تواند رفتار فشار\_نشست خاک را پیش‌بینی نماید.

### مقایسه مدل‌ها

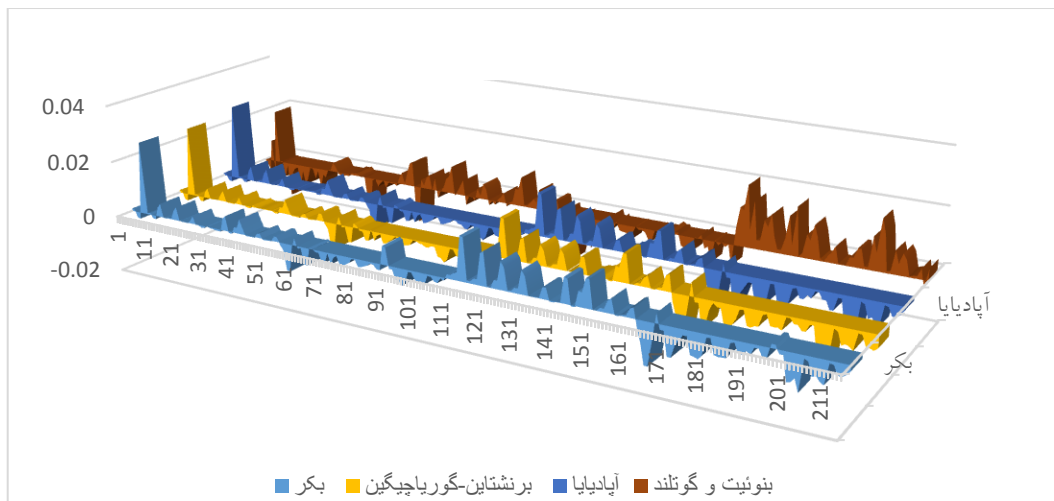
در شکل نمودار خطای پیش‌بینی مدل‌های مورد نظر به نمایش گذاشته شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود همه مدل‌های مورد نظر، به جز در سطح محتوای رطوبت ۱۸/۶۶، با خطای اندکی مقدار نشست را پیش‌بینی می‌کنند. از آنجا که تنها به کمک این شکل نمی‌توان بهترین رابطه را تعیین کرد، در ادامه با توجه به ریشه میانگین مربعات خطا، مقایسه‌ی مدل‌ها در رطوبت و جرم مخصوص ظاهری مشخص

جدول ۴. تعیین بهترین ضرایب رابطه آپادایا در شرایط متفاوت محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری خاک

محتوای رطوبت	جرم مخصوص ظاهری	n	$k_1$	$k_2$	$R^2$	RMSE
۱۸/۶۶	۱۳۵۳/۷۲	۰/۳۹۵	۴۴۲	۳۳۰۱	۰/۹۳۸۸	۴۸/۰۷
۱۳/۴۸	۱۳۱۰/۵۰	۰/۴۲۰	۵۴۷	۶۶۲۷	۰/۹۶۴۶	۴۴/۸۷
۸/۰۹	۱۳۱۱/۶۳	۰/۴۰۳	۵۹۷/۱	۷۸۰۴	۰/۸۷۰۹	۸۸/۶۷
۱۶/۹۵	۱۵۷۴/۴۱	۰/۴۶۸	۷۶۳/۸	۹۱۰۵	۰/۹۳۵۱	۶۴/۲۳
۱۴/۸۰	۱۶۲۱/۰۶	۰/۴۲۸	۱۵۷۹	۴۶۶۲	۰/۹۱۳۶	۷۸/۲۸
۶/۵۵	۱۵۴۱/۴۲	۰/۵۵۱	-۱۵۳/۵	۴۰۴۰	۰/۸۸۳۰	۹۶/۹۶
۱۶/۷۰	۱۴۵۸/۳۸	۰/۳۷۸	۷۲۰/۴	۴۴۲۰	۰/۹۶۴۵	۴۱/۵۳
۱۱/۹۷	۱۵۱۸/۶۷	۰/۴۳۷	۸۴۷/۲	۱۰۷۰۰	۰/۹۰۶۹	۷۶/۷۸
۷/۲۹	۱۴۹۷/۶۳	۰/۳۹۷	۱۵۴۰	۲۸۷۵	۰/۸۸۰۱	۸۷/۲۰

جدول ۵. تعیین بهترین ضریب رابطه گوتلند و بنوئیت در شرایط متفاوت محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری خاک

رطوبت	جرم مخصوص ظاهری	m	c	s	$S_0$	$R^2$	RMSE
۱۸/۶۶	۱۳۵۳/۷۲	۱/۰۰۵	۲۲/۹۸	۶۹۸۳	۱۱۸۰۰	۰/۸۳۳۹	۷۹/۵۰
۱۳/۴۸	۱۳۱۰/۵۰	۰/۶۶۰	۲۴/۱۰	۷۵۴۳	۱۰۲۰۰	۰/۸۱۰۸	۱۰۴/۰۰
۸/۰۹	۱۳۱۱/۶۳	۰/۶۴۲	۳۱/۱۰	۸۴۲۷	۹۴۵۴	۰/۶۹۸۷	۱۳۵/۹۰
۱۶/۹۵	۱۵۷۴/۴۱	۰/۵۸۲	۲۷/۸۳	۹۰۶۱	۸۲۸۸	۰/۷۴۸۹	۱۲۶/۷۰
۱۴/۸۰	۱۶۲۱/۰۶	۰/۱۹۷	۲۷/۲۱	۶۷۹۴	۷۱۹۲	۰/۷۲۹۴	۱۳۹/۰۰
۶/۵۵	۱۵۴۱/۴۲	۰/۲۴۲	۲۸/۹۵	۱۳۱۰۰	۶۹۵۵	۰/۵۲۸۰	۱۹۳/۸۰
۱۶/۷۰	۱۴۵۸/۳۸	۰/۷۳۶	۳۶/۸۶	۶۳۵۸	۸۸۰۴	۰/۸۰۶۲	۹۷/۳۴
۱۱/۹۷	۱۵۱۸/۶۷	۰/۳۲۷	۲۹/۵۱	۷۱۰۵	۵۷۷۳	۰/۶۲۸۳	۱۵۴/۰۰
۷/۲۹	۱۴۹۷/۶۳	۰/۴۲۷	۳۳/۰۶	۹۲۸۷	۸۴۹۹	۰/۷۲۹۵	۱۳۱/۴۰



شکل ۵. نمودار خطی رابطه‌های مختلف فشار\_نشست خاک

جدول ۶. ریشه میانگین مربعات خطی رابطه‌های فشار\_نشست در شرایط متفاوت رطوبت و جرم مخصوص ظاهری

محتوای رطوبت	جرم مخصوص ظاهری	برنشتاین	بکر	آپادایا	گوتلند و بنوئیت
۱۸/۶۶	۱۳۵۳/۷۲	۰/۰۱۱۲	۰/۰۱۱۳	۰/۰۱۱۴	۰/۰۱۰۴
۱۳/۴۸	۱۳۱۰/۵۰	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۶۱
۸/۰۹	۱۳۱۱/۶۳	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۶۱
۱۶/۹۵	۱۵۷۴/۴۱	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۴۶
۱۴/۸۰	۱۶۲۱/۰۶	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۷
۶/۵۵	۱۵۴۱/۴۲	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲۴
۱۶/۷۰	۱۴۵۸/۳۸	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۷۱
۱۱/۹۷	۱۵۱۸/۶۷	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۳۸
۷/۲۹	۱۴۹۷/۶۳	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۷

شرایط متفاوت محتوای رطوبت و جرم مخصوص ظاهری از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد. از بین رابطه‌های مورد نظر، رابطه گوتلند و بنوئیت با دقت کمتری مقدار نشست را پیش‌بینی می‌کند.

### نتیجه‌گیری

به عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان نمود که در خاک لومی رسی مزرعه، رابطه آپادایا نسبت به سایر رابطه‌های مورد بحث در

## REFERENCES

- Bekker, M. G. (1971). Russian Approach to Terrain-Vehicle Systems. Final Report, Contract No. DAHC19-70-C-0019, US Army Research Office, Arlington, VA.
- Gotteland, P., & Benoit, O. (2006). Sinkage tests for mobility study, modelling and experimental validation. *Journal of terramechanics*, 43(4), 451-467.
- Khabbazi, A., Ghafoori, M., & Cheshomi, A. (2017). Experimental and laboratory assessment of clogging potential based on adhesion. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-12.
- Lyasko, M. (2010). LSA model for sinkage predictions. *Journal of Terramechanics*, 47(1), 1-19.
- Meirion-Griffith, G., & Spenko, M. (2013). A pressure-sinkage model for small-diameter wheels on compactive, deformable terrain. *Journal of Terramechanics*, 50(1), 37-44.
- Okello, A. (1991). A review of soil strength measurement techniques for prediction of terrain vehicle performance. *Journal of agricultural engineering research*, 50, 129-155.
- Rashidi, M., & Seyfi, K. (2008). Comparative studies on Bekker and Upadhyaya models for soil pressure-sinkage behavior prediction. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 3, 19-25.
- Schuring, D. (1964). The mechanics of rigid wheels on soft ground. *Journal of Terramechanics*, 1(2), 5-21.
- Upadhyaya, S. K., Wulfsohn, D., & Mehlschau, J. (1993). An instrumented device to obtain traction related parameters. *Journal of Terramechanics*, 30(1), 1-20.
- Youssef, A. F. A., & Ali, G. A. (1982). Determination of soil parameters using plate test. *Journal of Terramechanics*, 19(2), 129-147.
- Zeleke, G., Owende, P. M. O., Kanali, C. L., & Ward, S. M. (2007). Predicting the pressure-sinkage characteristics of two forest sites in Ireland using in situ soil mechanical properties. *Biosystems engineering*, 97(2), 267-281.