

بررسی افتراقی روش‌های تعیین ضریب عکس‌العمل بستر*

مریم اکبرزاد قمری^(۲)

جمشید صدرکریمی^(۱)

چکیده روش وینکلر، یکی از روش‌های معمول و شناخته شده در طراحی شالوده‌ها و روسازی جاده‌ها می‌باشد و امروزه با وجود مدل‌های رفتاری پیشرفته، این روش هنوز هم رایج‌ترین مدل مورد استفاده در بین طراحان است. اما مسأله اساسی در استفاده از این روش، تعیین مقدار عددی ضریب عکس‌العمل بستر (k_s) می‌باشد و از آنجایی که این ضریب از عوامل متعددی متأثر می‌گردد، تخمین مقدار آن یکی از مسائل پیچیده و خطا آمیز در مکانیک خاک، محسوب می‌شود. روش‌های گوناگونی به منظور تخمین مقدار k_s از زمان پیدایش این مدل تاکنون، توسط محققین معرفی شده است. در این تحقیق، دقت و صحت روش‌های متفاوت تعیین ضریب عکس‌العمل بستر در پیش‌بینی مقادیر نشست از طریق مقایسه با مقادیر متناظر حاصل از مدل‌های رفتاری پیشرفته، توسط نرم افزارهای *Safe* و *Plaxis* بررسی می‌شود و مشخصات ژئوتکنیکی محوطه ای واقع بر روی مارن تبریز به عنوان اطلاعات پایه انتخاب شده است. نتایج، حاکی از آن است که مدل خاک نرم، مدل رفتاری حاکم بر مارن تبریز می‌باشد و روش *Vesic* از بین روابط تعیین ضریب عکس‌العمل، منجر به خطای قابل قبولی در تخمین نشست، نسبت به مدل خاک نرم گردیده است. به منظور کاهش تقریب نتایج به حداقل، در روابط تعیین k_s پیشنهاد می‌شود از ضریب الاستیسیته معادل که در برگزیده مشخصات هندسی و مکانیکی لایه‌های زیرین باشد، استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی مدل وینکلر، مدل رفتاری خاک نرم، ضریب عکس‌العمل بستر، ضریب الاستیسیته، نشست.

Comparative study of methods for determining coefficient of subgrade reaction

J. Sadrekarimi

M. Akbarzad Ghamari

Abstract Winkler hypothesis is a well-known model in foundation engineering and pavement design. Today, despite development of advanced soil models, it is still the most common method in foundation engineering practice. However, the main problem with this method is evaluation of the coefficient of subgrade reaction, k_s , and since it depends on numerous parameters, its estimation is one of the most sophisticated and misunderstood concepts in geotechnical engineering. Various relations have been proposed by researchers since generation of this model. In this paper different methods proposed for determination of k_s are compared and evaluated for their suitability and accuracy. The geotechnical parameters of a site on Tabriz Marl were selected as the base and settlement analysis results with these methods are compared with that of obtained from analysis with advanced soil models using *Safe* and *Plaxis* software. It was disclosed that of Tabriz Marl, soft soil model is the best governing model and *Vesic* relation among the methods for determining of k_s leads to negligible errors in comparison to soft soil model. Also, to get more accurate results from these methods, it is proposed to use mean elasticity modulus which takes into consideration the effect of geometric and mechanical properties of sub-layers.

Key Words Winkler hypothesis, the soft soil model, coefficient of subgrade reaction, Modulus of elasticity, Settlement.

* تاریخ دریافت نسخه نهایی اصلاح شده ۸۷/۹/۲۶ و تاریخ تصویب مقاله ۸۸/۷/۱۵.

(۱) دانشیار، گروه مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(۲) کارشناس ارشد، مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مقدمه

که یکی از اساسی ترین محدودیت‌های این روش، عدم انتقال تنش‌های برشی جانبی در خاک می‌باشد که در اثر مستقل فرض کردن فنرهای جایگزین خاک زیر فونداسیون نتیجه می‌شود. جهت برطرف کردن این ضعف، مدل‌های اصلاح شده روش وینکلر از اواسط قرن بیستم معرفی شدند [1,5]. در تمامی این مدل‌ها به منظور وابسته کردن فنرها به یکدیگر از صفحاتی الاستیک با قابلیت تحمل تغییر شکل‌های خمشی و یا برشی استفاده شده‌است که تعیین مقادیر عددی متغیرهای وابسته به این صفحات، خود جای بحث دارد؛ از این رو این روش‌ها چندان محبوبیتی در بین طراحان نیافتند. در این مدل، رفتار تنش- کرنش خطی مد نظر است. با وجود نقاط ضعف وارد بر مدل وینکلر، استفاده از این روش در بازه زمانی بیش از یک قرن، منجر به نتایج قابل قبولی، خصوصاً در مورد تیرهای انعطاف پذیر، شده است [7] که این نتیجه، منوط به تخمین مقادیر صحیح ضریب عکس‌العمل بستر می‌باشد و از این رو، هنوز هم این مدل به طور گسترده در بین طراحان، مورد استفاده قرار می‌گیرد و برنامه‌های کامپیوتری متعددی بر اساس این مفهوم پایه گذاری شده‌است.

تعیین k_s از مسائل پیچیده و مشکل در مکانیک خاک می‌باشد. گذر زمان و استفاده وسیع از ضریب عکس‌العمل بستر، هنوز هم نتوانسته است ابهامات موجود در تعیین مقدار دقیق و واقعی این ضریب را برطرف کند و این عامل نیز از طرف دیگر منجر به ایجاد خطا در نتایج محاسبه شده توسط روش وینکلر می‌گردد. در این مقاله با مطالعه موردی، این بعد مسأله مورد بررسی قرار گرفته است.

در نیمه اول قرن بیستم، مهندسان تصور می‌کردند که ضریب k_s برای بستر مفروض و معلومی، دارای مقدار عددی معین و واحدی است، اما ترزاقی نشان داد

عکس‌العمل ما بین فونداسیون و خاک زیرین آن، یکی از مسائل مهم مهندسی عمران می‌باشد از اواخر قرن نوزدهم توجه مهندسان را به خود جلب کرده است [1]. در رابطه با این موضوع مهم‌ترین مسأله تخمین فشار تماسی و نشست حاصل از آن می‌باشد، اما به دلیل چند فازی بودن محیط خاک و وجود متغیرهای وابسته به هم، برآورد واقعی و دقیق مجهولات این مسأله حتی با دانش امروزی کاری دشوار است؛ از این رو اثر محیط خاک با سیستم ساده تری که در مسائل مربوط به اثر متقابل خاک - شالوده، مدل بستر نامیده می‌شود، جایگزین می‌گردد [1].

یکی از رایج‌ترین و ساده‌ترین این مدل‌ها، روش وینکلر می‌باشد که در بین اکثر طراحان، شناخته شده است. در روش وینکلر، محیط خاک، مجموعه‌ای از فنرهای یکسان الاستیک خطی، مستقل از دو طرف، با فاصله نزدیک، ولی مجزا از هم در نظر گرفته شده و در هر نقطه نسبت فشار تماسی (P)، بر نشست حاصل از آن (y)، توسط ضریب عکس‌العمل بستر (k_s)، برقرار می‌شود [1]. در غالب مسائل اندرکنش سازه - خاک، محققان زیادی از قبیل [2] Terzaghi, [3] Biot, [4] Vesic, [5] Horvath و [6] Daloglu and Vallabhan از این روش، بهره جسته‌اند.

از سال ۱۹۲۰، تئوری عکس‌العمل برای محاسبه تنش در شمع‌های تحت اثر بارهای افقی نیز، بسط داده شد که در این حالت رابطه تنش و تغییرشکل حاصل از آن، توسط ضریب عکس‌العمل افقی بستر برقرار می‌شود [2]؛ اما در این مقاله فقط ضریب عکس‌العمل قائم بستر، مورد بررسی قرار گرفته و منظور از k_s ، ضریب قائم می‌باشد.

روش وینکلر به دلیل فرضیات ساده کننده‌ای که بر پایه آن استوار است، دارای نقاط ضعفی است [2,7]

ارائه شده است [11,9].

از بین این روش‌ها، روش‌های ۱ و ۵ بیشتر از بقیه کاربرد دارند و به دلیل نبود اطلاعات مربوط به آزمایش بارگذاری صفحه، در این تحقیق روابط تئوریک مد نظر می‌باشد که تعدادی از این روابط در جدول (۱) ارائه شده‌است.

در تمام این روابط؛ $E_s =$ ضریب الاستیسیته خاک، $v_s =$ نسبت پواسون، $B =$ عرض پی، $EI =$ صلبیت خمشی شالوده، $k_{s1} =$ ضریب عکس‌العمل بستر در زیر صفحه‌ای مربعی به عرض ۱ ft، $k_s =$ ضریب عکس‌العمل بستر در زیر شالوده برحسب نیرو بر مکعب طول، و μ ضریب بدون بعدی است که برابر است با نسبت حجم توده خاک بر طول.

جدول ۱ روابط تئوریک و تجربی متداول تعیین ضریب عکس‌العمل

شماره رابطه	نام محقق	رابطه پیشنهاد شده
۱	Biot	$k_s = \frac{0.95 E_s}{B(1-v_s^2)} \left[\frac{B^4 E_s}{(1-v_s^2) EI} \right]^{0.108}$
۲	Terzaghi	$k_s = k_{s1} \left(\frac{B+1}{2B} \right)^2$ $k_s = k_{s1} \frac{1}{B}$ خاک‌های رسی
۳	Vlassov	$k_s = \frac{E_s(1-v_s)}{(1+v_s)(1-2v_s)} \left(\frac{\mu}{2B} \right)$
۴	Vesic	$k_s = \frac{0.65 E_s}{B(1-v_s)} \sqrt{\frac{E_s B^4}{EI}}$
۵	and Meyerhof of Baika	$k_s = \frac{E_s}{B(1-v_s^2)}$
۶	Kloppele and Glock	$k_s = \frac{2E_s}{B(1+v_s)}$
۷	elvadurai	$k_s = \frac{0.65}{B} \cdot \frac{E_s}{1-v_s^2}$

که این ضریب جزو مشخصات انحصاری خاک نیست و علاوه بر وابستگی به مشخصات الاستیک بستر، به مشخصات هندسی سیستم منتقل کننده بار و حتی نوع بار وارده نیز وابسته است [2]. از آن زمان به بعد، مخصوصاً در دهه‌های ۸۰-۵۰ میلادی، این مسأله به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و روابط متعددی توسط محققان ارائه شده که تعدادی از این روابط، تجربی بوده و تعدادی نیز از طریق مدل الاستیک پیوسته به دست آمده است. در سال ۲۰۰۰ نیز Daloglu و Vallabhan با نرمالیزه کردن پارامترهای مدل Vlassov، روش نوینی را برای تخمین مقدار ضریب عکس‌العمل بستر معرفی کردند [6]؛

اما در مورد اعتبار یا عدم اعتبار استفاده جامع از این روابط در مسائل عملی، اطلاعات چندانی در دسترس نیست و ابهامات موجود در این زمینه به اندازه‌ای گسترده است که در مواردی استفاده از روابط ضریب عکس‌العمل افقی بستر برای تعیین k_s نیز مشاهده شده است [8]. در حقیقت اظهار نظر قاطع و جامع در مورد برتری روابط تعیین k_s با توجه به مشخصات مکانیکی متفاوت انواع خاک‌ها، کاری فاقد ارزش علمی و عملی خواهد بود؛ از این رو در این مقاله با مطالعه موردی، دقت و صحت روش‌های معمول تعیین ضریب عکس‌العمل بستر در پیش بینی مقادیر نشست و فشارتماسی، از طریق مقایسه با مقادیر متناظر حاصل از مدل‌های رفتاری پیشرفته مناسب، بررسی شده است.

در حالت کلی، روش‌های تعیین ضریب عکس‌العمل بستر (k_s) را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی نمود:

- ۱- آزمایش بارگذاری صفحه [1,9]، ۲- آزمایش تحکیم [1,9]، ۳- آزمایش سه محوری [1]، ۴- آزمایش CBR [10]، ۵- روابط تئوریک و تجربی که توسط محققین

شده است و اکثر محققان صحت رابطه خود را از طریق مقایسه با نتایج حاصل از این روابط تعیین کرده اند [6]: از این رو در این مقاله، دقت و تقریب این روابط در تعیین نشست و فشار تماسی شالوده مورد نظر، بررسی می شود، تحلیل به روش وینکلر توسط نرم افزار v. 8.06 Safe و تحلیل توسط مدل های رفتاری دیگر، با استفاده از نرم افزار Plaxis v. 7.20 صورت گرفته است.

در نرم افزار Plaxis، امکان دسترسی به مدل های خاک نرم، خزشی خاک نرم، خاک سخت شونده، و مدل موهر-کلمب وجود دارد؛ بنابراین ابتدا از بین آن ها مدل رفتاری که بیشترین تطبیق را با رفتار مکانیکی محیط مورد بررسی دارد، باید تعیین شود. برای این منظور از نتایج آزمایش تحکیم استفاده شده است؛ بدین ترتیب که شرایط آزمایش تحکیم، توسط نرم افزار Plaxis به ازای هر کدام از مدل های رفتاری الگو سازی شده و روشی را که الگوی رفتاری نزدیک تری در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه می کند، به عنوان مدل رفتاری معرف مشخصات مکانیکی خاک، مورد بررسی، معرفی، و در مراحل بعدی از نتایج حاصل از آن مدل به عنوان مبنای مقایسه استفاده شده است.

مدل خاک نرم، همان طور که از نامش پیداست، برای الگوسازی رفتار خاک های نرم مناسب است. خصوصیت ویژه این خاک ها، درجه قابلیت فشرده شدن (Degree of compressibility) بالای آن ها است که این خاصیت در بهترین حالت، توسط اطلاعات آزمایش تحکیم، اثبات می شود. ویژگی دیگر خاک های نرم، وابستگی خطی سختی به تنش است [12].

مدل خزشی خاک نرم، همان خصوصیات مدل خاک نرم را داراست؛ با این تفاوت که در آن، اثر خزش نیز در نظر گرفته شده است و در مورد خاک های نرمی که تراکم ثانویه تأثیر قابل توجهی در مقدار نشست نهایی دارد، به کار می رود [12].

مدل خاک سخت شونده، مدلی الاستوپلاستیک

روابط (۱) و (۴) برای تیرهای واقع بر بستر الاستیک با استفاده از تئوری الاستیک، پیوسته تعریف شده است [3,4]؛ اما در ادبیات فنی، اکثراً در مورد شالوده های گسترده نیز به کار برده می شود [7]. رابطه (۲)، تنها زمانی قابل استفاده است که ضریب عکس العمل بستر در زیر صفحه ای به عرض ۱ ft معلوم باشد و در واقع این رابطه با جاگذاری عرض صفحه بارگذاری به جای ۱ ft در تحلیل نتایج آزمایش بارگذاری صفحه، بسیار مفید است. رابطه (۳)، برای تیرها و صفحات واقع بر بستر الاستیک ارائه شده است [11]؛ اما ابهامات موجود در تخمین m منجر به پیچیدگی دو برابر در تعیین k_s می شود. روابط (۵)، (۶) و (۷)، در اصل به منظور تخمین ضریب عکس العمل افقی بستر در لوله های دایره ای مدفون در خاک ارائه شده [8] و در موارد اندکی برای تعیین k_s مورد استفاده قرار گرفته است [11].

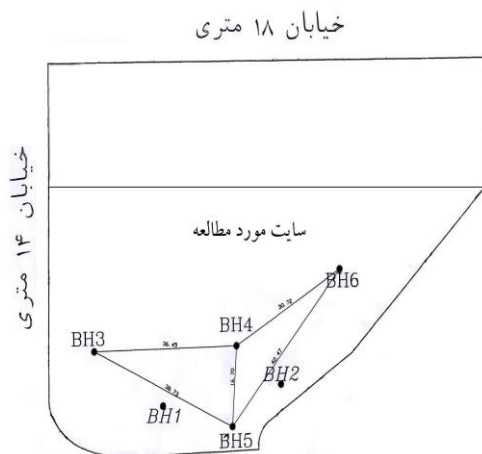
با استفاده از تئوری الاستیسیته نیز تخمین k_s توصیه شده است. از بازنویسی رابطه تعیین نشست الاستیک، شالوده های مستطیلی رابطه زیر برای k_s حاصل می شود:

$$k_s = \frac{E_s}{B'(1-v_s^2)mI_F} \quad (8)$$

که در آن E_s = ضریب الاستیسیته خاک، v_s = نسبت پواسون، B' = حداقل بعد جانبی شالوده، I_F و I_s = ضرائب تأثیر که مقدار آن ها با استفاده از جداول و نمودارهای مربوطه تعیین می شود، و m نشانگر ضریبی است که مقادیر آن برای گوشه، لبه و مرکز شالوده، به ترتیب مساوی ۱، ۲ و ۴ می باشد [9].

از توضیحات بالا استنباط می شود که رابطه حاصل از تئوری الاستیسیته، رابطه Biot، و رابطه Vesic برای تخمین k_s مناسب تر هستند و همچنین در بررسی ادبیات فنی این سه رابطه بیشتر از بقیه روابط، توصیه

۲ متر از خاک سطحی برداشته شده و سایت پروژه هموار گردیده است. برای واقعی تر نمودن اطلاعات مهندسی مورد استفاده در این بررسی و تعیین لایه بندی خاک، کاوش‌های ژئوتکنیکی دقیقی، شامل حفاری ۶ گمانه تا عمق ۲۵ متری در نقاط مختلف محوطه به روش حفاری دورانی و انجام آزمایش SPT به فواصل ۳ متر و نمونه برداری از اعماق مختلف صورت گرفته است.



شکل ۱. پلان گمانه زنی در محوطه پروژه

موقعیت گمانه‌ها در پلان محوطه پروژه در شکل (۱) نشان داده شده است و شکل (۲) مقادیر اصلاح شده نفوذ استاندارد به ازای E_{70} را نشان می‌دهد. سطح ایستایی آب زیرزمینی در عمق ۸ متری واقع است.

در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های دست نخورده، آزمایش‌های تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، تحکیم، برش مستقیم، و فشار تک محوری انجام شده است. جدول (۲) مشخصات خاک مورد مطالعه را که از میانگین نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است، ارائه می‌کند. نمودارهای $e-\log \sigma$ حاصل از آزمایش تحکیم، بیانگر این است که خاک پیش تحکیم یافته است و فشار پیش تحکیم در مارن زرد و مارن خاکستری به ترتیب در حدود: ۹۰۰ kPa و ۹۵۰ kPa می‌باشد. بررسی نمونه‌ها در آزمایشگاه نشان می‌دهد که

برای شبیه سازی رفتار انواع مختلف خاک‌ها می‌باشد. این مدل از به‌کارگیری تئوری پلاستیسیته به جای تئوری الاستیسیته در مدل هذلولی به دست آمده است. در این مدل، وابستگی سختی به تنش در نظر گرفته شده که علاوه بر آن، قابلیت محاسبه کرنش‌های غیر قابل بازگشت در اثر بارگذاری انحرافی اولیه و اینوتروپیک را داراست [12].

مدل موهر-کلمب در حالت کلی برای تخمین تقریب اولیه ای از رفتار خاک مناسب می‌باشد. در واقع این مدل بسط قانون اصطکاک کلمب، برای حالات عمومی تنش است [12]. در نرم افزار Plaxis، این مدل توانایی استفاده از ضریب الاستیسیته متغیر را داراست؛ با این تفاوت که افزایش سختی نسبت به عمق در نظر گرفته می‌شود؛ در حالی که در مدل‌های دیگر، سختی در هر نقطه با توجه به تراز تنش در آن محل و رابطه بین تنش و سختی محاسبه می‌شود. لازم به یادآوری است که ضریب الاستیسیته، متأثر از تنش مؤثر متوسط و نسبت تخلخل است و روابط بدین منظور توسط محققین ارائه شده است [13]، اما در این نرم افزار، برای محاسبات ضریب الاستیسیته، تنها افزایش آن با افزایش تراز تنش در نظر گرفته شده و از تأثیر حجم ویژه بر آن، چشم پوشی شده است.

مشخصات مهندسی زمین و ضرایب مدل‌های رفتاری

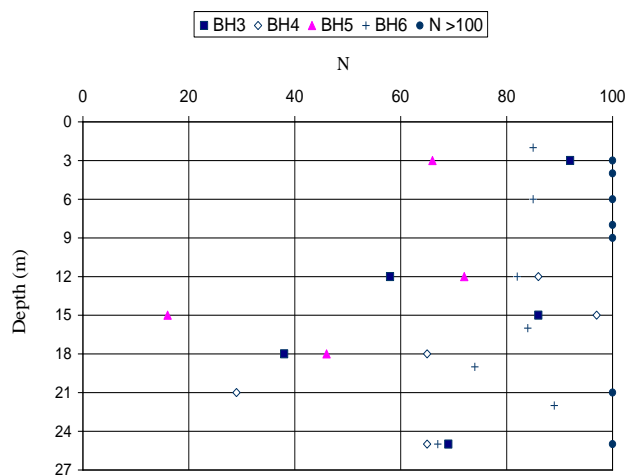
خصوصیات مکانیکی خاک. پروژه مورد بررسی، شامل ساختمان ۲۲ طبقه‌ای بر روی شالوده گسترده ای به ابعاد ۲×۲۰×۴۴ متر، دارای ۳۵ ستون با اندازه متوسط ۸۰×۸۰ سانتی متر، آرایش ستون‌ها و بارهای وارده، تقریباً متقارن می‌باشد. سایت پروژه در جنوب شرقی شهر تبریز واقع است و شالوده ۶ متر پائین تر از سطح تراز زمین اجراء می‌شود. قبل از انجام هر گونه عملیاتی،

گرفته می‌شود که تغییرات لگاریتمی تنش نسبت به نشست، در شکل (۴) ارائه شده است.

در نرم افزار Plaxis، پارامترهای مربوط به مشخصات عمومی (وزن مخصوص تر و خشک)، و پارامترهای مربوط به مقاومت خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، در تمام مدل‌های رفتاری ثابت بوده و در هر کدام از مارن‌ها از میانگین مقادیر ارائه شده در جدول (۲)، تعیین می‌شود که مقدار زاویه اتساع در تمام موارد، صفر تعریف شده است.

خاک مورد مطالعه، ناهمگن است و نمونه‌های حاصل از گمانه‌های شماره ۵ و ۶ مارن، تورم پذیر هستند.

تعیین پارامترهای مدل‌های رفتاری. تخمین مدل رفتاری مناسب، به طور جداگانه در مارن زرد و مارن خاکستری انجام می‌گیرد و مبنای مقایسه، نمودارهای لگاریتم تنش - نشست می‌باشد. در هر کدام از مارن‌ها، اطلاعات حاصل از آزمایش تحکیم، میانگین گیری و نتایج حاصل به عنوان ویژگی حاکم بر تمام لایه در نظر



شکل ۲ مقادیر نفوذ استاندارد اصلاح شده به ازای E_{r70}

جدول ۲ مشخصات مصالح در پروفیل زمین و لایه بندی خاک

شماره لایه	عمق (m)	لایه بندی خاک و تراز برخورد به آب زیرزمینی	رطوبت (%)	γ_d (kN/m^3)	C' (kN/m^2)	ϕ' (درجه)	LL (%)	PI (%)
۱	۰-۸	شن و ماسه با آثار سیمان‌تاسیون	۷/۹۵	۱۸/۲	۰	۳۵	-	-
	۸	سطح ایستائی آب	-	-	-	-	-	-
	۸-۱۱	شن و ماسه با آثار سیمان‌تاسیون	۱۲/۸۸	۱۸/۲	۰	۳۵	-	-
۲	۱۱-۱۴	مارن زرد با حالت هوازده	۶۳/۷۸	۹/۴	۵۵/۵	۲۱	۷۷/۳	۴۴/۶
۳	۱۴-۱۷	مارن زرد	۵۴/۵۲	۱۲	۷۶/۳	۲۰	۷۲	۴۱
۴	۱۷-۱۹/۷۰	مارن زرد مایل به سبز	۶۷/۴۳	۹/۷	۵۹/۶	۲۰	۷۵	۴۶/۷
۵	۱۹/۷۰-۲۳	مارن خاکستری به حالت فشرده	۶۶/۵۶	۱۱/۱	۵۳/۵	۲۰	۷۵	۴۵
۶	۲۳-۲۵	مارن خاکستری تیره	۷۱/۷۰	۹/۴	۷۹	۲۰	۷۲	۴۰

m به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_s = E_s^{ref} \left(\frac{c \cot \phi - \sigma'_1}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (10)$$

که در آن: C = چسبندگی، ϕ = زاویه اصطکاک داخلی، E_s^{ref} = ضریب الاستیسیته در تراز تنش p^{ref} و E_s = ضریب الاستیسیته در تراز تنش σ'_1 است.

جدول ۳ پارامترهای سختی مدل خاک سخت شونده

پارامترهای مدل خاک سخت شونده	مارن زرد	مارن خاکستری
E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	۶۸۴۶	۸۶۷۳
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	۶۴۸۴	۸۲۳۹
p^{ref} (kN/m ²)	۲۱۲	۲۴۰
m	۱	۱

جدول ۴ پارامترهای سختی مدل موهر-کلمب

پارامترهای مدل موهر-کلمب	مارن زرد	مارن خاکستری
E_s (kN/m ²)	۶۴۸۴	۸۲۳۹
v_s	۰/۳	۰/۳

از جایگزینی مقادیر مربوطه نمودارهای شکل (۳)، مقدار m در هر دو نوع مارن، مساوی ۱ به دست می‌آید. در این مدل، $m = 1$ ، تنها در حالتی که خاک رفتاری نزدیک به رفتار خاک‌های نرم داشته باشد، قابل توجه است و توصیه می‌شود که در این حالت از مدل خاک نرم استفاده گردد؛ بنابراین، این مدل از تحلیل حذف شده و گزینش مدل مناسب از بین مدل‌های موهر-کلمب، خاک نرم و خزشی خاک نرم، انجام می‌گیرد.

در مدل موهر-کلمب، پارامتر E_s از نمودارهای شکل (۳)، به ازای تراز تنش قائم نمونه تحت آزمایش، قبل از نمونه برداری از زمین تعیین می‌شود.

در مدل‌های رفتاری موهر-کلمب و خاک سخت شونده، رابطه تنش- کرنش به طور مستقیم توسط ضریب الاستیسیته برقرار می‌شود که ضریب الاستیسیته جزو پارامترهای ورودی می‌باشد. در نتیجه، ابتدا باید مقادیر ضریب الاستیسیته E_s ، تعیین شود. نمودار تغییرات ضریب الاستیسیته نسبت به تراز تنش مؤثر، با استفاده از میانگین اطلاعات حاصل از آزمایش تحکیم رسم شده و نمودارهای مربوطه، در مارن زرد و مارن خاکستری در شکل (۳) ارائه شده است. البته لازم به یادآوری است که ضریب الاستیسیته حاصل از آزمایش تحکیم، تحت شرایط کرنش جانبی محدود شده تعیین می‌شود. در حالی که در عمل در یک لایه تحکیم پذیر کرنش جانبی وجود دارد؛ از این رو ضریب الاستیسیته اودومتري، E_{oed} ، توسط رابطه زیر به ضریب الاستیسیته E_s قابل تبدیل است [9]:

$$E_s = \frac{(1+v_s)(1-2v_s)}{(1-v_s)} E_{oed} \quad (9)$$

که در آن v_s ، نسبت پواسون خاک می‌باشد و مقادیر حاصل از این رابطه در شکل (۳) به کار رفته اند. جدول (۳)، پارامترهای سختی مدل خاک سخت شونده و، جدول (۴) پارامترهای سختی مدل موهر-کلمب را نشان می‌دهد.

در مدل خاک سخت شونده، پارامترهای E_{oed}^{ref} و E_{50}^{ref} به ترتیب، نشان گر ضریب الاستیسیته اودومتري و ضریب الاستیسیته متقاطع در ۵۰٪ مقاومت در آزمایش سه محوری زه کشی شده، در تراز تنش مبنا p^{ref} هستند. مقدار عددی E_{oed}^{ref} از آزمایش تحکیم و به دلیل این که اطلاعاتی در رابطه با آزمایش سه محوری در دسترس نمی‌باشد، مقدار عددی E_{50}^{ref} از نمودارهای شکل (۳)، به ازای تراز تنش قائم که نمونه تحت آزمایش قبل از نمونه برداری در زمین داراست، تعیین شده و این مقدار به عنوان p^{ref} تعریف، و پارامتر

تحلیل نشست با استفاده از مدل خاک نرم

بعد از تعیین ملاک مقایسه، به منظور بررسی تأثیر لایه بندی و خصوصیات مکانیکی لایه‌های زیرین بر نشست سازه فوقانی، در نرم افزار Plaxis، هندسه محیط مورد مطالعه تا عمق تأثیر شالوده که ۵ برابر عرض شالوده فرض گردیده [9]، بسط داده می‌شود. شرایط مرزی در کناره‌های محیط به صورت تغییر شکل‌های محدود در جهت افقی و آزاد در جهت قائم، و تغییر شکل‌های محدود؛ هم در جهت افقی و هم در جهت قائم، در مرز پایینی تعریف، و به منظور جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی بر رفتار شالوده، مرزهای کناری محدوده مورد بررسی، به فاصله ۴۰ متر از کناره‌های شالوده تعریف شده‌است.

برای واقعی تر نمودن شرایط حاکم، تغییرات تنش موثر در اثر ۶ متر خاک برداری نیز در تحلیل در نظر گرفته شده، و شالوده ۶ متر پایین تر از سطح زمین معرفی می‌شود. از آنجا که اطلاعات حاصل از نمونه برداری تا عمق ۲۵ متر در دسترس است، جنس و مشخصات خاک تا عمق تأثیر شالوده، با توجه به اطلاعات محلی، همانند لایه ۶ فرض شده و به دلیل تغییرات نامحسوس نسبت تخلخل به وزن مخصوص، در تمام لایه ۶، وزن مخصوص، ثابت فرض شده‌است. لایه‌بندی و دیگر مشخصات خاک با توجه به جدول (۲) تعریف، و لایه ۶ تا عمق ۱۰۶ متر بسط داده شده و مدل خاک نرم برای تحلیل انتخاب می‌شود. پارامترهای سختی این مدل از جدول (۵) تعیین می‌شوند.

خاک بین اعماق ۲۳ الی ۱۰۶ متر برای سهولت در تعریف نسبت پیش تحکیمی (OCR) به چندین لایه با ویژگی‌های یکسان تقسیم شده است و ضخامت هر یک از لایه‌ها طوری تعیین شده که تغییرات ضریب الاستیسیته نسبت به تنش خطی باشد (با توجه به شکل

در مدل خاک نرم و خزشی خاک نرم، با توجه به وابستگی خطی ضریب الاستیسیته به تنش موثر (رابطه ۱۰)، رابطه بین تنش و کرنش با استفاده از پارامترهای λ^* ، K^* و μ^* برقرار شده است که به ترتیب، شاخص تراکم اصلاح شده، شاخص تورم اصلاح شده، و شاخص خزش اصلاح شده نامیده می‌شود و به ترتیب با استفاده از شاخص فشردگی؛ C_c ، شاخص تورم؛ شاخص فشردگی ثانویه و C_α ، محاسبه می‌گردد که روابط مربوطه در ماخذ ۱۲ موجود است. مقادیر این پارامترها در جدول (۵) ارائه شده و مقدار عددی پارامترهای پیشرفته مقادیر پیش فرض برنامه در نظر گرفته شده است.

در تمام تحلیل‌ها، بارهای مساوی با مقادیر آزمایشگاهی وارد گردیده و نتایج حاصل در شکل (۴) با یکدیگر مقایسه شده است.

نتایج تحلیل برای تعیین مدل مناسب

با توجه به نمودارهای شکل (۴)، در هر دو نوع مارن، مدل خاک نرم، الگوی رفتاری نزدیک تری نسبت به دیگر روش‌ها ارائه می‌دهد، که این نتیجه با مشاهدات تجربی نیز تطبیق دارد [14]، زیرا خاک مورد بررسی دارای درجه قابلیت فشرده شدن بالایی است که این ویژگی یکی از خصوصیات بارز خاک‌های نرم می‌باشد. البته مدل‌های رفتاری خزشی خاک نرم و موهر-کلمب در محدوده تنش‌های بزرگ تر از تنش پیش تحکیم، تفاوت اندکی با نتایج آزمایشگاهی دارند، اما از آن جا که تنش‌های موثر ناشی از وزن خود خاک و همچنین تنش‌های گسترش یافته خاک در اثر وزن سازه در بازه کوچکتر، از تنش پیش تحکیم واقع هستند، مدل رفتاری خاک نرم مناسب تر بوده و در مراحل بعدی تحلیل، از این مدل استفاده می‌شود.

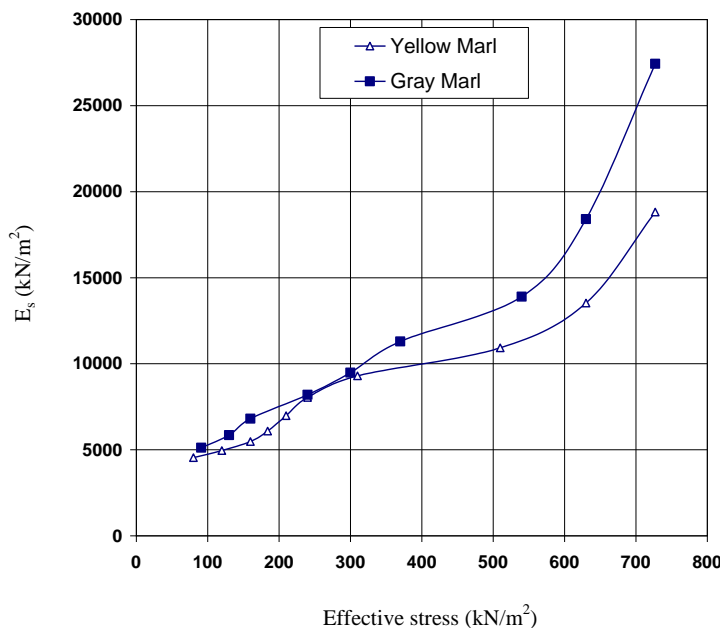
رابطه بالا، ضریب الاستیسیته در تراز شالوده kPa ۱۱۶۰۴۰ تعیین می‌شود و با افزایش عمق به ازای هر ۱ متر، به اندازه ۳۳۰۰ kPa افزایش می‌یابد. در نرم افزار Plaxis در سطح تماس خاک-شالوده به منظور تحلیل دقیق تر تنشها و کرنشها از المانهای سطح تماس استفاده می‌شود و تحلیل با استفاده از حالت کرنش مسطح انجام گرفته که مش تغییر شکل یافته در شکل (۵-ب) نشان داده شده است.

شکل (۵-الف) هندسه مدل تعریف شده را نشان می‌دهد.

در لایه ماسه ای، از مدل موهر-کلمب استفاده می‌شود. مقدار ضریب الاستیسیته و تغییرات آن نسبت به عمق، با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد شکل (۲) و رابطه زیر تعیین می‌گردد [9]:

$$E_s = 1200(N+6) \quad (11)$$

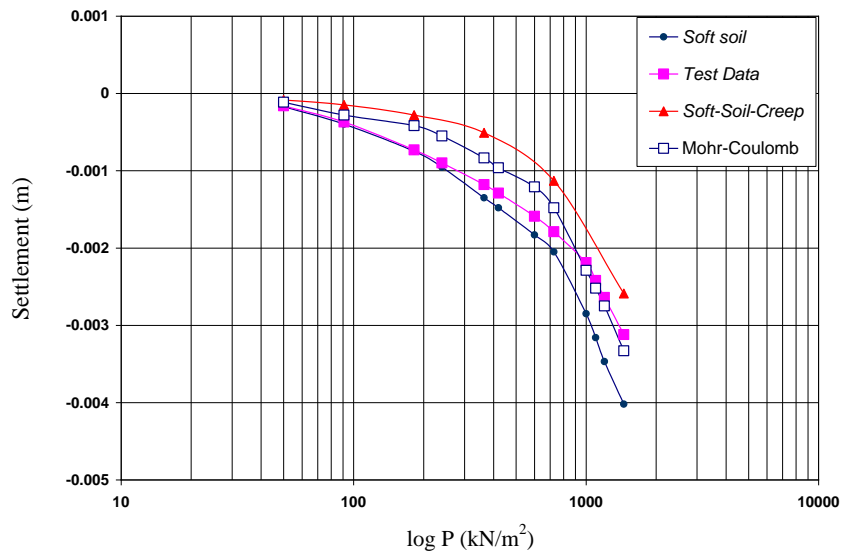
که در آن، N عدد نفوذ استاندارد بر حسب Er55 می‌باشد. بعد از انجام تبدیلات لازم و جای گذاری در



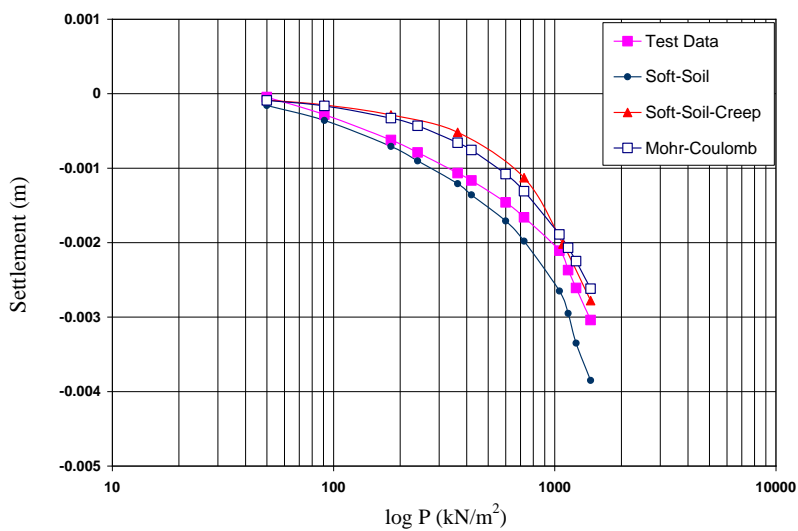
شکل ۳ نمودار ضریب الاستیسیته-تنش مؤثر در مارن زرد و مارن خاکستری

جدول ۵ پارامترهای ورودی مدل خزشی خاک نرم و مدل خاک نرم

پارامترهای سختی مدل خاک نرم			پارامترهای سختی مدل خزشی خاک نرم			
مارن زرد	$\lambda^* = 0.125$	$K^* = 0.056$	مارن زرد	$\lambda^* = 0.125$	$K^* = 0.056$	$\mu^* = 0.008$
مارن خاکستری	$\lambda^* = 0.143$	$K^* = 0.057$	مارن خاکستری	$\lambda^* = 0.143$	$K^* = 0.057$	$\mu^* = 0.009$



(الف)

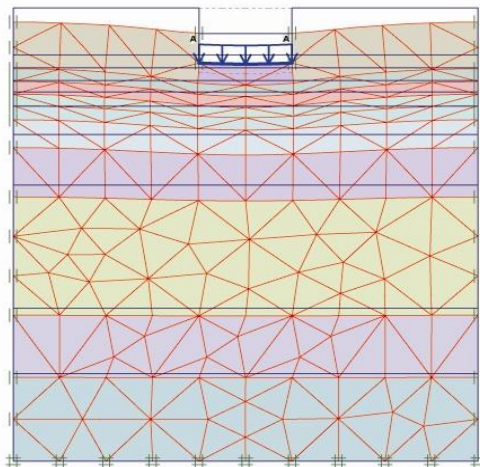


(ب)

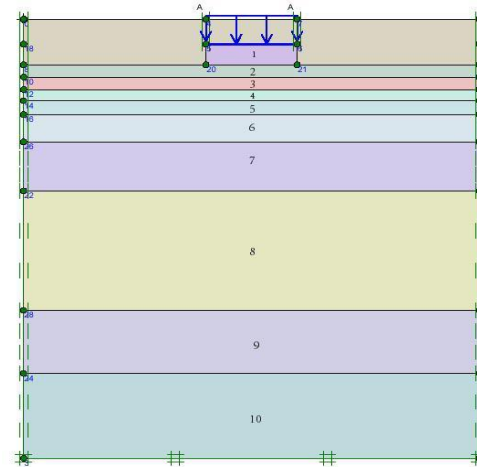
شکل ۴ مقایسه الگوی رفتاری حاصل از مدل‌های رفتاری پیشرفته با نتایج آزمایش تحکیم در الف) مارن زرد، ب) مارن خاکستری

جدول ۶ پارامترهای تعیین ضریب الاستیسیته معادل با توجه به شکل ۵-الف

شماره لایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
$E_{si}(kN/m^2)$	۱۲۷۵۹۰	۶۲۲۶	۶۸۴۶	۷۶۷۳	۸۴۰۸	۹۰۷۷	۱۰۳۸۷	۱۲۵۹۳	۱۶۱۵۵	۲۳۳۸۶
$H_i(m)$	۳	۳	۳	۲/۷۰	۳/۳۰	۶/۶۱	۱۱/۸۶	۲۸/۸۱	۱۵/۲۵	۲۰/۴۷
I_{Di}	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۶۱	۰/۴۷	۰/۲۷	۰/۱۳	۰/۰۴



(ب)



(الف)

شکل ۵ (الف) هندسه مدل تعریف شده، (ب) مش تغییر شکل یافته در نرم افزار Plaxis

دوشی م ن بیعت))فلا - ۵)) ل کشه) Plaxis.
ضریب الاستیسیته معادل از میانگین گیری وزنی
ضریب الاستیسیته در وسط هر لایه نسبت به ضخامت
و فاکتور عمق آن لایه مطابق رابطه زیر تعیین می شود:

$$E_{se} = \frac{\sum_{i=1}^{10} E_{si} I_{Di} H_i}{\sum_{i=1}^{10} I_{Di} H_i} \quad (12)$$

که در آن E_{se} = ضریب الاستیسیته معادل، E_{si} =
الاستیسیته در وسط هر لایه که با توجه به نمودارهای
شکل (۳) تعیین می شود، I_{Di} = فاکتور عمق و
 H_i = ضخامت هر لایه می باشد که مقادیر مربوطه در
جدول (۶) ارائه شده است. در این رابطه، تاثیر مشخصات
هندسی لایه بندی توسط فاکتور ضخامت وارد گردیده
است.

از رابطه (۱۲)، مقدار ضریب الاستیسیته معادل،
برابر با $E_s = 21021 \text{ kPa}$ محاسبه می شود؛ در صورتی
که اگر از اثر لایه بندی چشم پوشی گردد، در تراز
تماس خاک - شالوده (با چشم پوشی از ضخامت
شالوده) $E_s = 116040 \text{ kPa}$ به دست می آید. بدیهی
است که تفاوت قابل توجه بین این دو مقدار، منجر به
اختلاف فاحش بین نتایج پیش بینی شده خواهد شد؛ از
این رو تاثیر مشخصات مکانیکی لایه های زیر شالوده در

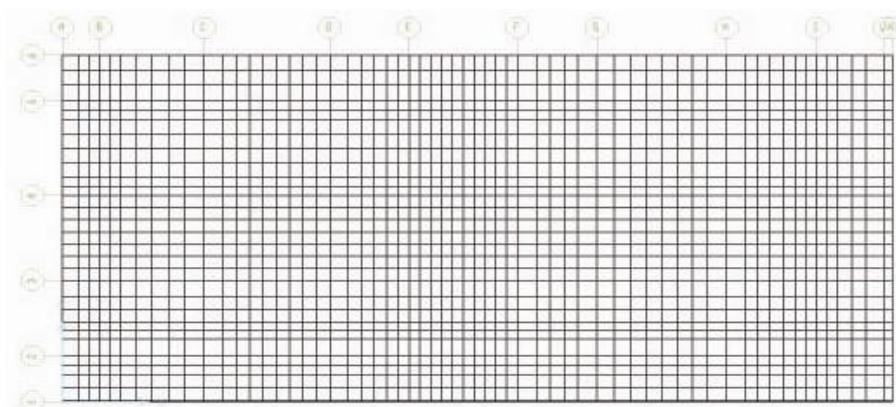
تعیین مقدار عددی ضریب عکس العمل بستر
همان و (۴)، (۱) هرامش طاوور، مدشرکز م ه لابقه ک روط
ه لئسم ن یر تم هم . دنوشی م ه در یر ا که ه ب ks ن بیعتی ا یر ۸)
رالمقمه) Determination) ن بیعتی طاوور ن یا زا ه داغتسا رد
اهنت ب یرض ن یا اریز، ت سا هتیسیتسلا ب یرض ی ددع
و ی دنب ه یلا رثا ناوتی م ن آ ط سوت ه کت سا ی لماء
زا، درک دراو ks رالمقمه رد ا راه یلا کیتسلا ت اصخشه
مدنریگر رد ه ک لداعه هتیسیتسلا ب یرض زا ورن یا
ذوفنذ قمع رد ع قاو ی ا ه یلا مامت ی کیناکه ت ایصوصخ
د درگی م ه داغتسا، دشاب ه دولاش

در رابطه با نشست خاک ی اهی سر بر ی ا ه یلا ی ا ه
ی ا رب ی توافتی ا ه شور و ت سا هتفرگ ت روص ی دایز
رد اما، دنا ه دش ه ئارا لداعه هتیسیتسلا ب یرض ن بیعتی
زا م دکره ی سندنه ت اصخشه اهنت ا ه شور ن یا مامت
رد [15] ت سا ه دش ه داد ت ل اخذ E_s ن بیعتی رد ا ه یلا
ش یازفا اب ح طه رد ه دراو راب رثا، میناد ی م ه ک ی ت روص
ه جیتن رد [9] (ک سنسوسب طاوور) لدبا ی ی م ش ها ک قمع
رتشیدت سشن رد رتلا ب ی ا ه یلا هتیسیتسلا ب یرض ریئات
ن یا ریئات، ه لاقم ن یا رد ه ک دو ب دهاوخی نییاب ی ا ه یلا زا
ت سا ه دش ی رانذگ مان قمع روتکاف E_s رالمقمه رد ل ماء
طسو رد ت سشن ت بسنزا ه یلا ره رد، ID ، قمع روتکاف
رازفا مرن رد ه دش ی فرعه ءدوت ل کت سشن رب ه یلا ن آ

همانند آن چه که در نرم افزار Plaxis مورد استفاده قرار گرفته، معرفی می‌گردد. ابعاد ستون‌ها و بارهای وارده، با توجه به نتایج حاصل از تحلیل سازه تعیین شده‌اند. شبکه‌المان محدود به صورت خودکار با توجه به بزرگ‌ترین اندازه قابل قبول برای بعدالمان‌ها که ۰/۵ متر معرفی شده، تولید می‌شود. شبکه متشکل از المان‌های ۴ وجهی است که در شکل (۶) نشان داده شده‌است. در تحلیل، ویژگی دال به تمام المان‌ها تخصیص داده شده و خصوصیات تکیه گاهی این المان‌ها با توجه به مقدار k_s تعریف شده، تعیین می‌شود. از آن جا که نرم افزار Plaxis از حالت کرنش مسطح برای تحلیل استفاده می‌کند، در آن شالوده به صورت نواری با عرض ۲۰ متر و طول واحد در جهت عمود بر صفحه نشان داده شده در شکل (۵)، در تحلیل شرکت داده می‌شود. به منظور کم‌تر کردن خطا، مقایسه بین نتایج حاصل از هر دو روش به ازای بارهای وارده در نوار ستونی میانی واقع در عرض شالوده، انجام می‌گیرد. در روش وینکلر، نمودارهای فشار تماسی و نشست، در زیر نوار ستونی میانی شالوده رسم شده‌اند.

مقایسه نتایج و بحث

نمودارهای نشست و فشار تماسی حاصل از تحلیل به روش مدل خاک نرم و روش وینکلر به ازای روابط پیشنهاد شده در شکل‌های شماره (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده‌است.



شکل ۶ شبکه‌المان محدود در نرم افزار Safe

تعیین ضریب عکس‌العمل، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ خصوصاً در مواردی مشابه پروژه مورد مطالعه که ضریب الاستیسیته به طور قابل ملاحظه‌ای از لایه ماسه‌ای به لایه مارن تغییر می‌کند.

با جای گذاری $E_s = 21021 \text{ kPa}$ ، $\nu_s = 0/3$ ، $EI = 306/7 \times 10^6 \text{ kN.m}^2$ و $B = 20 \text{ m}$ و مقادیر مناسب برای I_s ، I_F و m در روابط ۱، ۴ و ۸ مقادیر عددی k_s محاسبه می‌شود که نتایج آن در جدول (۷) ارائه شده است؛ البته باید توجه شود که رابطه حاصل از تئوری الاستیسیته به ازای نقاط مختلف شالوده، مقادیر متفاوتی ارائه می‌دهد که k_s میانگین از روش پیشنهاد شده در مأخذ [9] محاسبه شده است.

جدول ۷ مقادیر عددی k_s برای استفاده در روش وینکلر

نام رابطه مورد استفاده	مقدار عددی k_s (kN/m^3)
رابطه حاصل از تئوری الاستیسیته	۱۵۰۰
رابطه Biot	۱۴۱۹
رابطه Vesic	۹۰۸

تحلیل به روش وینکلر

تحلیل به روش وینکلر، توسط نرم افزار Safe v. 8.06 و به ازای هر کدام از مقادیر ارائه شده در جدول (۷) صورت می‌گیرد. در این نرم افزار، شالوده به صورت صفحه تا ضخیم و مدس فیر عدد رتبه 20×44 دا عبای ای (آئیس)... و استیسیته سلا ب یرض، ص و صخه نزو (ه دولاش

جانبی خاک در روش وینکلر ناشی می‌شود؛ زیرا فشار جانبی المان‌های خاک در سطح تماس خاک - شالوده، باعث کاهش فشار قائم می‌شود و در مدل خاک نرم، این ویژگی با استفاده از روابط مکانیک محیط‌های پیوسته، الگوسازی شده است.

در محیط واقعی نیز فشار جانبی با احاطه خاک اطراف شالوده، فشار قائم را کاهش می‌دهد و در نتیجه روش وینکلر مقدار فشار تماسی را نسبت به مقادیر واقعی بیشتر به دست می‌دهد. با وجود این نکته این روش محافظه کارانه است، اما طراحان باید آگاه باشند که در مواردی نیز منجر به هزینه‌های اضافی می‌شود.

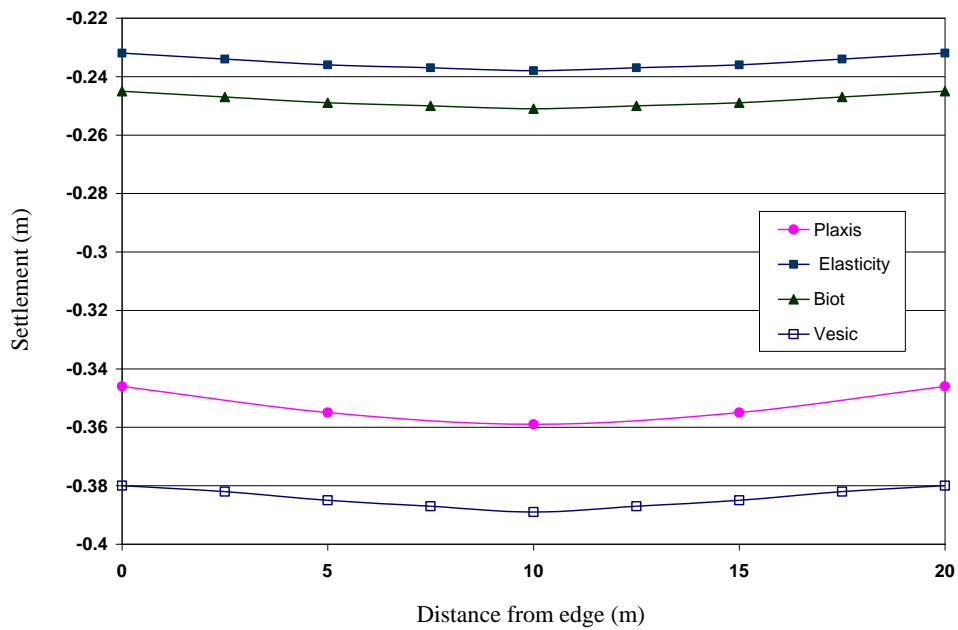
با توجه به مطلب بالا از لحاظ تئوری انتظار بر این است که مقدار نشست حاصل از روش وینکلر بزرگ تر باشد (It is expected that Winkler model overestimates contact pressure as well). اما بر خلاف انتظار، در اکثر موارد، مقادیر کوچک تری از آن نتیجه می‌شود. در این مورد، مولفان این گونه استنباط می‌کنند که روابط متعارف ضریب عکس العمل مقدار k_s را طوری تخمین بزنند که اثر این عوامل در نشست ظاهر نشود [۱۶].

در روابط تئوریک، ضریب عکس العمل به شدت متأثر از ضریب الاستیسیته می‌باشد و در خاک‌های لایه‌ای این اثر به ماکزیمم مقدار می‌رسد. در استفاده از این روابط، صرف نظر از نوع رابطه و محیط مورد بررسی، تخمین ضریب الاستیسیته معادل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در واقع بخش عمده‌ای از صحت نتایج حاصله به ضریب الاستیسیته معادل وابسته است. بدین منظور باید تغییرات ضریب الاستیسیته، نسبت به تراز تنش در دسترس باشد و هم چنین علاوه بر مشخصات هندسی لایه‌ها، کاهش اثر ضرایب الاستیسیته لایه‌های زیرین نسبت به لایه‌های بالاتر، در تحلیل وارد گردد.

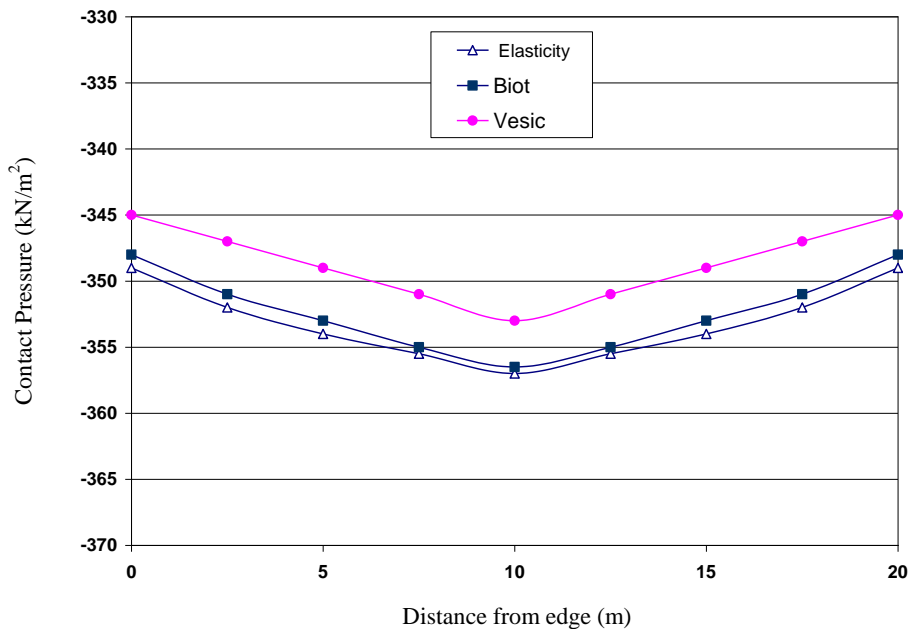
اختلاف بین مقادیر نشست و فشار تماسی حاصل از رابطه الاستیسیته و رابطه Biot در مورد توده خاک مورد مطالعه، بسیار ناچیز است؛ اما از آن جا که مدل خاک نرم به عنوان مدلی که رفتار واقعی تری از محیط خاک به دست می‌دهد، تعیین شده؛ در نتیجه مقادیر حاصل از این روش مبنای تعیین صحت و خطای روابط تعیین ضریب عکس خواهد بود. بنابراین در مورد خاک مورد بررسی در این مقاله می‌توان اظهار نظر کرد که رابطه Vesic منجر به تقریب بسیار خوبی در رابطه با تخمین نشست برای استفاده در روش وینکلر می‌شود. مقدار نشست حداکثر حاصل از این روش ۸٪ بیشتر از روش خاک نرم است؛ در صورتی که رابطه حاصل از الاستیسیته و رابطه Biot مقدار نشست را به ترتیب ۳۴٪ و ۳۰٪ کم تر به دست می‌دهد.

این رابطه را می‌توان در مورد مارن‌های OC با درجه تحکیم پذیری بالا که مخصوصاً در مناطق جنوب شرقی شهر تبریز بیشتر با این نوع خاک مواجه هستیم، به عنوان یکی از گزینه‌های اصلی در مسائل عملی مورد بررسی قرار داد. بدیهی است که با توجه به مقادیر نشست ارائه شده در شکل (۷)، حتماً باید تمهیداتی به منظور کنترل نشست صورت گیرد اما از آن جا که در این تحقیق، هدف فقط تحلیل و مقایسه نتایج می‌باشد، از این موضوع چشم پوشی شده است.

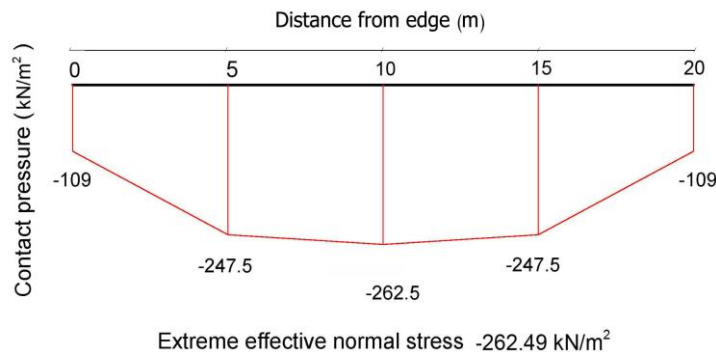
اما در مورد فشار تماسی، مسئله مقداری پیچیده تر است. روش وینکلر به ازای هر سه رابطه به کار رفته، مقادیر فشار تماسی تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در حقیقت، فشار خاک نسبت به مقدار k_s چندان حساس نیست؛ اما اختلاف با مقادیر حاصل از مدل خاک نرم زیاد است. روش وینکلر حداکثر فشار تماسی را در حدود ۳۵٪ بیشتر از مدل خاک نرم به دست می‌دهد. این اختلاف از عدم در نظر گرفتن فشار



شکل ۷ نمودار نشست حاصل از تحلیل به روش مدل خاک نرم در نرم افزار Plaxis و روابط Elasticity, Biot و Vesic



شکل ۸ نمودار فشار تماسی حاصل از تحلیل به روش وینکلر به ازای روابط Elasticity, Biot و Vesic در روش وینکلر



شکل ۹ نمودار فشار تماسی حاصل از مدل خاک نرم

حاصله به حداقل کاهش یابد.

خلاصه و نتیجه گیری

۱. ضریب عکس العمل، مفهومی است که فقط در سطح تماس خاک - شالوده معتبر است؛ اما در این تحقیق با تاثیر عامل لایه بندی و مشخصات مکانیکی لایه های زیر شالوده، الگویی برای کاهش خطا در نتایج پیش بینی شده، ارائه شده است.

۲. روش Vesic از بین روابط تعیین ضریب عکس العمل منجر به خطای قابل قبولی در تخمین نشست نسبت به مدل خاک نرم می گردد و در مورد خاک مورد مطالعه، این رابطه را می توان به عنوان رابطه حاکم بر تعیین ضریب عکس العمل معرفی نمود.

۳. روش وینکلر فشار تماسی را بیشتر از مقدار واقعی به دست می دهد و این نتیجه مستقل از مقدار ضریب عکس العمل است و از در نظر نگرفتن اثر فشار جانبی خاک در این روش ناشی می شود.

۴. در استفاده از روابط متعارف تعیین ضریب عکس العمل، به منظور کاهش تقریب نتایج به حداقل مقدار به دو نکته باید توجه شود؛ اول این که رابطه ای که تطبیق بیشتری با شرایط پروژه دارد،

با وجود این شایان ذکر است، قیقتحتمن یا رد که هکت سالی هیدر اما؛ ت سیدس رتسد رد هحفصه ی رانذگراب عقاوی ایه یلا کی ناکمه تا صخشمه طقف، شایمز آن یا رد داعبا اب هسایقمه رد هکی رانذگراب هحفصه ریثات قمع رد نیبعت k_s راندمه رب، ت سا کچوک رایسب ایه دولاش لومعمه هداغتسا اب هکن یا دوجو اب. دراد ریثات شور نی زا همدش رب ه دولاش داعبا رتا) ... وی قازرت طباور (هطوبرم طباور زا ی شوپم شچ هلمسه رگید داعبزا ی لو، دوشی م روظنم آن راهظان اوتی م لایه ثجبه به جوت اب هجیتد رد؛ ددرگی م بیرضت اریبغت گنها هکی یاهه ژورپ رد هک درک رظن شور نی یا ج یاتند، ت سا ریغمه قمع هبت بسنه تیسیتسلا هکی دراوم رد اما؛ دوی دنه لوخذن انیمطا دروم نالمنچ م شچ ل باق، قمع هبت بسنه تیسیتسلا بیرضت اریبغت شخبه هکی مقاوم رد ای ت سا ندرکت سا ندرکی شوپ لیکشتت خصه رایسب ی ایه یلا ار ه دولاش ریثات قمع م طعا رظنزا و ه دوب دیمفم دنلوتی م شور نی یا، دنهدی م. دشاب هجوت ل باق شایمز آن یا م اجنای داصتقا

در پایان پیشنهاد می شود که در استفاده از روابط تئوریک، اطلاعات کافی در مورد تاریخچه رابطه، موارد کاربرد آن و حداقل امکان دقت آن در موارد مشابه پروژه مورد بررسی، جمع آوری شود تا تقریب در نتایج

انتخاب گردد، و دوم این که ضریب الاستیسیتهٔ
معادل طوری تعیین گردد که علاوه بر مشخصات
هندسی لایه‌ها، در برگیرندهٔ کاهش اثر ضرایب
الاستیسیتهٔ لایه‌های زیرین نسبت به لایه‌های بالاتر
نیز باشد.

مراجع

1. Dutta, S. C., and Roy, R., "A Critical Review on Idealization and Modeling for Interaction among Soil-Foundation-Structure System", *Computers and Structures*, 80, pp. 1579-1594, (2002).
2. Terzaghi, K. V., "Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction", *Geotechnique*, 5(4), pp. 297-326, (1955).
3. Biot, M. A., "Bending of Infinite Beams on an Elastic Foundation", *J. Appl. Mech. Trans. Am. Soc. Mech. Engrg.*, 59, A1-7, (1937).
4. Vesic, A. B., "Beams on Elastic Subgrade and Winkler's Hypothesis", *5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Paris, France*, pp. 845-850, (1961).
5. Horvath, J. S., "Subgrade Models for Soil-Structure Interaction Analysis", *J. Found. Engrg. Curr. Principles of Pract. Proc. ASCE*, 20, pp. 599-612, (1989).
6. Daloglu, A. T., and Vallabhan C. V. G., "Values of k for Slab on Winkler Foundation", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, May, pp. 463-471, (2000).
7. Stavridis, L. T., "Simplified Analysis of Layered Soil-Structure Interaction", *J. Struct. Engrg., ASCE*, February, pp. 224-230, (2000).
8. Okeagu, B., and Abdel-Sayed, G., "Coefficients of Soil Reaction for Buried Flexible Conduits", *J. Geo. Engrg., ASCE*, 110(7), pp. 908-922, (1984).
9. Bowles, J. E., "Foundation Analysis and Design", 6th ed., McGraw-Hill International Press, (1998).
10. Nascimento, V., and Simoes, A., "Relation between CBR and Modulus of Strength", *4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., 2, London, England*, pp. 166-168, (1957).
11. Elachachi, S. M., Breyse, D., and Houy, L., "Longitudinal Variability of Soils and Structural Response of Sewer Networks", *Computers and Geotechnics*, 31(8), pp. 625-641, (2004).
12. Manual of Plaxis soft ware, <http://www.plaxis.nl>.
13. Hicher, P. Y., "Elastic Properties of Soils", *J. Engrg. Mech., ASCE*, August, pp. 641-647, (1996).
14. Sadrekarimi, J., and kia, M., "Appraisal of the Mohr-Coulomb and Soft Soil Creep Models in Settlement Estimation of Embankment Dams", *16th Int. Conf. on Soil Mech. and Geo. Engrg., Osaka, Japan*, pp. 845-850, (2005).

15. Enrico, C., and Giovanni, D., "Settlement Analysis of Layered Soil Systems by Stiffness Method", *J. Geo. Engrg., ASCE*, 119(4), pp. 780-785, (1993).

۱۶. اکبرزاد قمری، مریم، "بررسی روابط و روش‌های تعیین ضریب عکس‌العمل خاک و تحلیل میزان دقت آن در طراحی شالوده‌ها"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - گرایش خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، (۱۳۸۴).