

سید محمد علی زمردیان* و محمد حسین رضایی
بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز

چکیدہ -

$$\frac{(\text{PSR} - \text{PSR}_{\text{min}})}{\text{PSR}_{\text{max}} - \text{PSR}_{\text{min}}} = \frac{(P_{\text{max}} - P_{\text{min}})}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} = 1$$

واژگان کلیدی :

روشهای عددی در مهندسی، سال ۳۲، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲

Two and Three-dimensional Analyses of Supported Excavations via Truss

S. M. A. Zomorodian and M. H. Rezaei

Water Engineering, Shiraz University

Abstract: Nowadays, the need for tall buildings, substruction of highways, construction of underground trains and consequently excavating operations is essential for modern urban communities. One of the most common types of retaining structures used for varying excavation depths is the metal truss. The aim of this study was to introduce a logical connection between two and three-dimensional analyses in a manner that by using two-dimensional analysis, horizontal and vertical displacements as well as internal forces of the retaining structures with a good approximation in three-dimensional analysis (which is closer to the reality) can be calculated. Therefore, several parametric modelings were simulated in order to investigate the behavior of supported excavations via truss. Also, it was aimed to determine the ratio between maximum horizontal displacement at two-dimensional and three-dimensional analyses (PSR ratio). The PSR ratios for the depth of 4, 7 and 10 meters were 0.7, 0.55 and 0.4, respectively. The internal forces of a critical truss (near the center of the excavation) including axial forces and bending moments were also studied. Comparing the values of axial forces in the main structural members of the critical truss in two-dimensional and three-dimensional analyses shows a good agreement between the two types of modeling. The magnitude of bending moment in three-dimensional to two-dimensional analyses was 0.14, which proves unrealistic in two-dimensional analysis, and can consequently be neglected in structural design procedure

Keywords: Excavation, Retaining structure, Metal truss, Two-dimensional and Three-dimensional analyses, Hardening constitutive model, Mohr coulomb criteria, Drucker-Prager criteria, Modified Drucker-Prager/Cap Model

طول گودبرداری	L	عرض گودبرداری	B
عدد آزمایش SPT	N	چسبندگی	C
فشار میانگین	P	شاخص فشردگی	c_c
فشار موثر میانگین	P'	شاخص باز فشردگی	c_s
فشار مرجع تسلیم	P'_0	ضریب الاستیسیته	E
پارامتر کنترل کننده سخت شوندگی نرم	P_a	نسبت تخلخل	e
شوندگی در مدل اصلاح شده دراکر-پراگر به همراه کلاhek تسلیم		نسبت تخلخل اولیه	e_0
تنش موثر متوسط تسلیم در مدل اصلاح شده دراکر-پراگر به همراه کلاhek تسلیم	P_b	معادله سطح کلاhek تسلیم (مدل اصلاح شده دراکر-پراگر به همراه کلاhek تسلیم)	F_c
تنش مرجع	P_{ref}	معادله سطح انتقال میان خط گسیختگی برشی و کلاhek (مدل اصلاح شده دراکر-پراگر به همراه کلاhek تسلیم)	F_t
سربار مجاور گودبرداری کلاhek تسلیم	Q	سختی برشی	G
آزمایش نفوذ مخروط استاندارد	SPT	معادله سطح پتانسیل جریان بیضوی (مدل اصلاح شده دراکر-پراگر به همراه کلاhek تسلیم)	G_c
تنش تفاضلی در مدل اصلاح شده دراکر-پراگر به همراه کلاhek تسلیم	T	ارتفاع گود	H_e
نسبت سیلان تنش در آزمایش سه محوری	K		
کششی به سیلان تنش در سه محوری فشاری در			

جابه‌جایی افقی بیشینه	$\delta_{h,max}$	مدل اصلاح شده‌ی دراگر-پراگر به همراه کلاهدک تسلیم	
بیشینه نشست	$\delta_{v,max}$		
کرنش حجمی پلاستیک	ϵ_{vol}^{pl}	شعاع سطح انتقال در مدل اصلاح شده‌ی دراگر-پراگر به همراه کلاهدک تسلیم	α
کرنش حجمی پلاستیک اولیه	$\epsilon_{vol}^{pl}(\text{ini})$	زاویه اصطکاک داخلی در مدل اصلاح شده‌ی دراگر-پراگر به همراه کلاهدک تسلیم	β
نشانه بازفشرده‌گی	κ	وزن مخصوص	γ
سختی حجمی خاک	K'	جابه‌جایی افقی یا نشست	δ
نشانه فشرده‌گی	λ	جابه‌جایی افقی	δ_h
نسبت پواسون	ν	نشست	δ_v
نسبت پواسون در حالت زهکشی شده	ν'	جابه‌جایی یا نشست در حالت دو بعدی	δ_{2D}
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	جابه‌جایی یا نشست در حالت سه بعدی	δ_{3D}
زاویه اصطکاک داخلی موثر	ϕ'	جابه‌جایی افقی در حالت دو بعدی	δ_{h-2D}
دانسیته	ρ	جابه‌جایی افقی در حالت سه بعدی	δ_{h-3D}
خروج از مرکزیت کلاهدک تسلیم در مدل اصلاح شده‌ی دراگر-پراگر به همراه به کلاهدک تسلیم	R		

۱- مقدمه

اضلاع دیگر گودبرداری، توزیع تنش کمتری در جداره گودبرداری روی می‌دهد که نتیجه آن جابه‌جایی کمتر دیواره است. از طرفی به دلیل تخصصی بودن نرم افزارهایی که توانایی مدل سازی سه بعدی گودبرداری را دارند و نیز حجم بالای محاسبات و پیچیدگی‌های ذاتی مدل سازی سه بعدی، طراحی و محاسبات تا حدودی به مدل سازی دو بعدی و یا در اکثر موارد به روش‌های تجربی (مانند نظریه رانکین) محدود شده است؛ که در روشهای تجربی، تنها امکان بررسی پایداری گود در مقابل نیروهای وارده وجود دارد. در تحقیق حاضر تلاش شده است تا با مدل سازی سه بعدی گودبرداری‌های مهار شده به روش خرابا، ضمن بررسی اثر گوشه بر چگونگی توزیع جابه‌جایی‌ها، نحوه انتقال نیرو از جداره گود به سازه‌های خرابایی و نیروهای وارد بر آن (که

صرف نظر از نوع، یک سازه حائل مناسب برای محافظت از دیواره گودبرداری می‌بایست علاوه بر پایداری در مقابل نیروهای وارده، تغییر شکل‌های دیواره گودبرداری را نیز به حد مجاز تقلیل دهد (برای تامین سرویس دهی مناسب به ساختمان‌های مجاور گود). در این راستا مبحث هفتم مقررات ملی ایران مقدار مجاز جابه‌جایی افقی تاج گودبرداری را به حداکثر ۲ سانتی متر در تراز پی ساختمان مجاور محدود کرده است [۱]. از این رو کنترل مقادیر جابه‌جایی در نواحی شهری، عامل تعیین کننده طراحی سازه حائل است.

گودبرداری‌ها به دلیل ((اثر گوشه)) و اجرای ناهمگون، یک پدیده سه بعدی‌اند که این امر تأثیر به‌سزایی در نحوه رفتار گود دارد. در این پدیده به علت مجاورت دیواره گود با

تنها در مدل سازی سه بعدی قابل ارزیابی هستند) بررسی و برآورد واقع بینانه تری از رفتار این نوع سازه حائل، به دست آورد.

او و همکاران (۱۹۹۶) برای برآورد میزان تفاوت جابه جایی افقی در حالت دو بعدی و سه بعدی در گودبرداری های مهارشده به روش دیواره دیافراگمی، نسبت PSR^۲ را به صورت زیر تعریف کردند:

$$PSR = \frac{\delta_{h-3D}}{\delta_{h-2D}} \quad (۱)$$

که در آن δ_{h-2D} و δ_{h-3D} به ترتیب برابر جابه جایی افقی در حالت سه بعدی و جابه جایی افقی در حالت دو بعدی اند. آنها عنوان کردند با در اختیار داشتن جابه جایی افقی در مدل سازی دو بعدی، ابعاد گود، فاصله از گوشه و با استفاده از نسبت PSR می توان جابه جایی افقی در حالت سه بعدی را محاسبه کرد [۲]. معادله (۱) توسط محققان دیگر مانند فینو و همکاران (۲۰۰۷) به صورت تعمیم یافته به صورت زیر باز تعریف شد:

$$PSR = \frac{\delta_{3D}}{\delta_{2D}} \quad (۲)$$

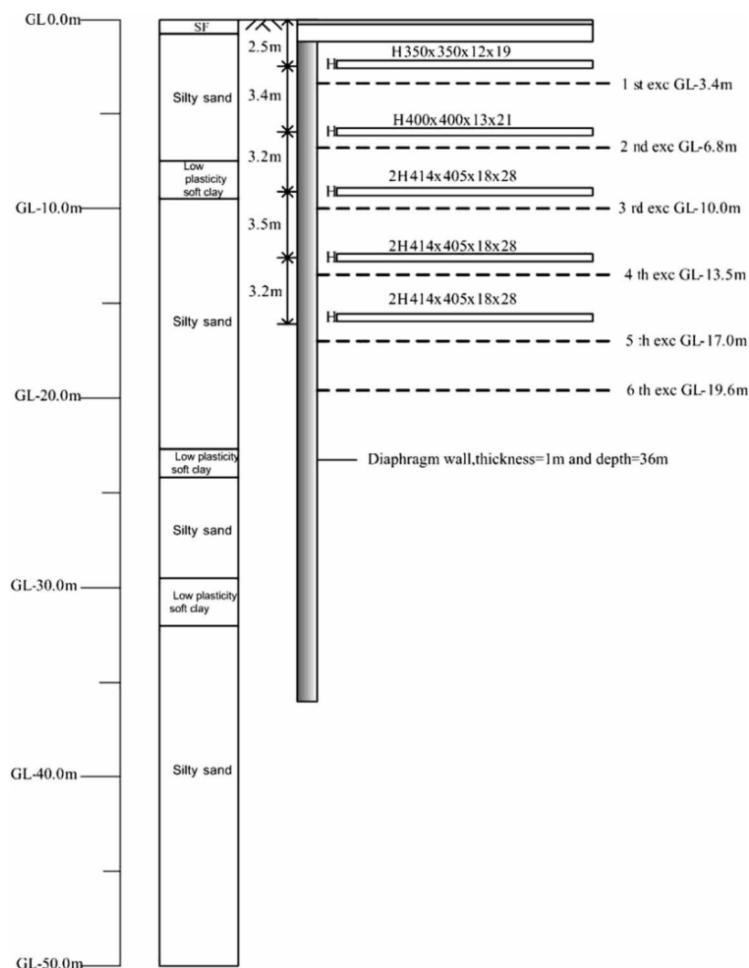
که δ_{2D} و δ_{3D} به ترتیب برابر جابه جایی در حالت سه بعدی و جابه جایی در حالت دو بعدی اند. بدین ترتیب می توان با در دست داشتن بیشینه جابه جایی افقی (یا نشست) که می تواند با استفاده از تحلیل دو بعدی نیز به دست آید، جابه جایی افقی دیواره گود و یا نشست پشت دیواره گود را در حالت سه بعدی محاسبه کرد [۳].

لی و همکاران (۱۹۹۸) اعلام داشتند که مدل سازی دو بعدی، جابه جایی افقی بیشینه دیواره گود را ۳۰٪ بیشتر از مقادیر میدانی محاسبه می کند. همچنین مدل سه بعدی، جابه جایی افقی در گوشه گود را ۳۰٪ و مدل دو بعدی این میزان را ۲۰۰٪ بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده نشان می دهند [۴]. فینو و روبوسکی (۲۰۰۵) با اندازه گیری مقادیر جابه جایی افقی و نشست در مراحل مختلف یک گودبرداری مهار شده به روش دوخت به پشت این ایده را مطرح کردند

که با پیشرفت گودبرداری و افزایش عمق، تأثیر پذیری رفتار گود از وضعیت سه بعدی بیشتر می شود [۵]. همچنین لین و وو (۲۰۰۷) اعلام کردند که نسبت PSR با افزایش عمق می تواند روندی کاهشی یا افزایشی داشته باشد و تابع روش اجرای گودبرداری است [۶]. روبوسکی و فینو (۲۰۰۶) رابطه ای تجربی را برای به دست آوردن مقادیر جابه جایی افقی و نشست در راستای دیواره گود، از مقادیر جابه جایی و نشست بیشینه ارائه کردند که می توان از آن به همراه تحلیل دو بعدی استفاده نمود. لازم به ذکر است که روش ارائه شده به تصریح نویسندگان، در دامنه خاک های رسی نرم تا متوسط و با شرایط هندسی نسبتاً مشابه کاربرد دارد [۷].

وا و همکاران (۲۰۱۰) با جمع آوری مقادیر میدانی جابه جایی افقی و نشست ثبت شده از ۱۰ مورد گودبرداری مهارشده به روش دیواره دیافراگمی، به بررسی اثر گوشه در رفتار گود پرداختند. آنها نسبت بیشینه نشست قائم به بیشینه جابه جایی افقی را با در نظر گیری اثر گوشه، ۰/۶۸ محاسبه کردند. آنها همچنین بیان داشتند که نشست در گوشه ها مقداری بین ۲۰٪ تا ۶۰٪ نشست وسط دهانه گود را شامل می شود [۸]. فیونتنس و دورینت (۲۰۱۰) با بیان اینکه اثر گوشه تنها می تواند توسط روش های تجربی و تحلیل سه بعدی ارزیابی شود، به ارائه یک روش تجربی برای تعیین نشست اطراف گود و گوشه های آن مبادرت ورزیدند. سپس با مقایسه پاسخ روش پیشنهادی با مقادیر ثبت شده میدانی، آن را کالیبره کردند. روش پیشنهادی آن ها می تواند همراه با تحلیل دو بعدی به کار رود یا برای تخمین اولیه نشست ها در مراحل اولیه به کار رود. از مزیت های برجسته روش آنان توانایی پشتیبانی از زوایای گوشه غیر ۹۰ درجه و تأثیرپذیری کم از پارامترهای مقاومتی خاک و عمق مدفون دیواره حائل است [۹].

ژاوکیوچ و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی عددی گودبرداری های مهار شده با دیواره دیافراگمی با پلان مربع و مستطیل پرداختند. آنها بیان داشتند که دلیل اینکه مدل سازی



شکل ۱- نیمرخ خاک مورد مطالعه به همراه وضعیت مهارهای متقابل (شیونگ ۲۰۰۹)

حالت کرنش صفحه‌ای و در گوشه و امتداد ضلع کوچکتر تمایل به حالت تقارن محوری دارد [۱۰]. هدف از تحقیق حاضر، ایجاد ارتباطی منطقی میان تحلیل در حالت دو بعدی و سه بعدی است به نحوی که بتوان با استفاده از انجام آنالیز دو بعدی، مقادیر جابه‌جایی، نشست و نیروهای درون سازه حائل را با تقریب مناسبی در حالت سه بعدی (و نزدیک تر به واقعیت) ارزیابی کرد. از این رو تلاش شده تا با مدل سازی پارامتریک گودبرداری‌های مهار شده با خریای فلزی در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی، رفتار این

سه بعدی هزینه بر و وقت گیر است، مدل سازی دو بعدی تحلیل غالب در محاسبات مهندسی است. برای این منظور ابتدا یک مدل دو بعدی در حالت‌های کرنش صفحه‌ای^۳ و تقارن محوری^۴ را مدل سازی کرده و سپس با حالت سه بعدی مقایسه شده‌اند. آن‌ها بیان کردند که بیشینه جابه‌جایی افقی بین حالت تقارن محوری به عنوان حد پایین و حالت کرنش صفحه‌ای به عنوان حد بالا، قرار گرفته و جابه‌جایی افقی در حالت سه بعدی در این دامنه قرار می‌گیرد. ژاوکویچ و همکاران اعلام کردند که در گودبرداری‌های مستطیلی پاسخ‌های جابه‌جایی افقی در وسط ضلع بزرگتر تمایل به

جدول ۱- مراحل اجرای گودبرداری (شیونگ ۲۰۰۹)

دوره زمانی (سال/ماه/روز)	مراحل حفاری
۲۴/۱۰/۰۳-۲۷/۱۰/۰۳	حفاری تا عمق ۳/۴ متری
۰۲/۱۱/۰۳-۰۶/۱۱/۰۳	اجرای اولین مهار در تراز ۲/۵ متری
۰۸/۱۱/۰۳-۱۲/۱۱/۰۳	حفاری تا عمق ۶/۸ متری
۱۳/۱۱/۰۳-۱۶/۱۱/۰۳	اجرای دومین مهار در تراز ۵/۹ متری
۲۴/۱۱/۰۳-۲۷/۱۱/۰۳	حفاری تا عمق ۱۰ متری
۰۴/۱۲/۰۳-۰۷/۱۲/۰۳	اجرای سومین مهار در تراز ۹/۱ متری
۱۴/۱۲/۰۳-۱۶/۱۲/۰۳	حفاری تا عمق ۱۳/۵ متری
۲۸/۱۲/۰۳-۳۱/۱۲/۰۳	اجرای چهارمین مهار در تراز ۱۲/۶ متری
۰۶/۰۱/۰۴-۰۸/۰۱/۰۴	حفاری تا عمق ۱۷ متری
۰۹/۰۱/۰۴-۱۲/۰۱/۰۴	اجرای پنجمین مهار در تراز ۱۶/۱ متری
۲۵/۰۱/۰۴-۰۲/۰۳/۰۴	حفاری تا عمق ۱۹/۶ متری

نوع سازه حائل مورد بررسی قرار گیرد.

گودبرداری در جدول (۱) آورده شده است. در طول انجام گودبرداری، عملیات استخراج مقادیر میدانی با استفاده از ابزارهای شیب سنج^۶ و نشست سنج^۷ برای برداشت مقادیر میدانی، انجام پذیرفته است.

جدول (۲) مشخصات خاک محل را به همراه پارامترهای مقاومت برشی نشان می‌دهد. به دلیل عدم انجام آزمایشات سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده و تحکیم یافته زهکشی نشده، مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و ضریب الاستیسیته با استفاده از روابط ذیل به دست آمده‌اند:

$$\phi' = 28 + 13 \times (N_c)^{0.5} \quad (3)$$

که N_c برابر است با:

$$N_c = 0.77 \times \left[\log\left(\frac{195}{\sigma'}\right) \right] \times N \quad (4)$$

که N عدد آزمایش SPT و σ' فشار متوسط سربار است. همچنین ضریب الاستیسیته توسط رابطه زیر محاسبه شده است:

$$E = 2000 \times N \quad (5)$$

که N عدد آزمایش SPT و E ضریب الاستیسیته است. همچنین مدول برشی با استفاده از معادله زیر به دست آمده است:

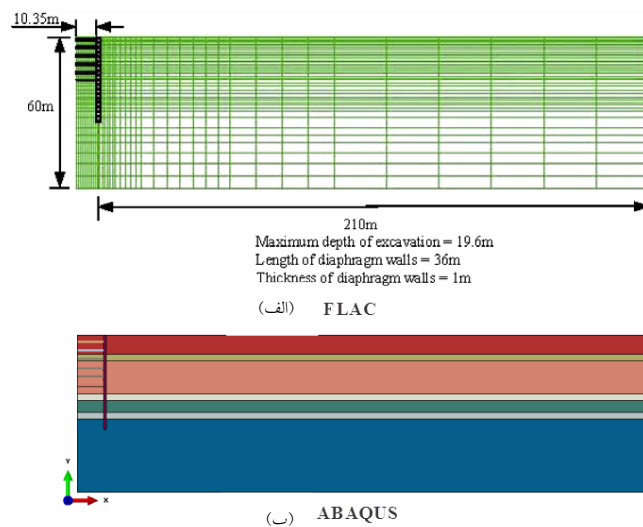
۲- صحت سنجی

در تحقیق حاضر از نرم افزار ABAQUS 6.10 استفاده شده است. برای اعتبار سنجی نرم افزار و روند مدل سازی، یک گودبرداری با اجرای مهار متقابل مدل سازی و با نتایج محققان پیشین مقایسه شده است. شیونگ (۲۰۰۹) با انجام یک مطالعه موردی به بررسی رفتار گودبرداری‌های عمیق مهار شده در ماسه پرداخت. گودبرداری فوق از نوع دیواره دیافراگمی به همراه مهار متقابل است. وی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی اقدام به مدل سازی گود با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود (FLAC 4) کرد و به مقایسه مقادیر به دست آمده با نتایج حاصل از مقادیر ثبت شده میدانی پرداخت. شکل (۱) لایه بندی خاک و وضعیت قرارگیری مهارهای متقابل را نشان می‌دهد [۱۱].

لازم به ذکر است که حفاری تا عمق ۱۹/۶ متری ادامه یافته و فاصله افقی مهارها از یکدیگر ۴ متر است. حفاری به روش از پایین به بالا^۵ انجام پذیرفته و مراحل اجرای

جدول ۲- پارامترهای خاک محل (شیونگ ۲۰۰۹)

عمق متناظر (m)	توصیف خاک	وزن مخصوص کل (kN/m^3)	عدد آزمایش SPT	C' (kN/m^2)	ϕ' ($^\circ$)
[	ماسه لای دار (زرد و خاکستری)	۱۹/۷	۵-۱۴	۰	۳۲
۷/۵-۱۰/۰	رسی لای دار خاکستری به همراه ماسه لای دار	۱۸/۶	۴	۰	۳۰
۱۰/۰-۲۲/۵	ماسه لای دار خاکستری و تا اندازه ای لای ماسه دار	۱۹/۶	۶-۲۲	۰	۳۲
۲۲/۵-۲۵/۰	رس لای دار خاکستری به همراه لای	۱۹/۳	۱۲-۱۶	۰	۳۳
۲۵/۰-۲۹/۵	ماسه لای دار خاکستری به همراه لای ماسه دار	۱۹/۷	۱۹-۲۹	۰	۳۳
۲۹/۵-۳۲/۰	رس لای دار خاکستری	۱۹/۵	۱۹-۱۳	۰	۳۲
۳۲/۰-۶۰/۰	ماسه لای دار خاکستری به همراه رس	۱۹/۹	۲۸-۴۲	۰	۳۳

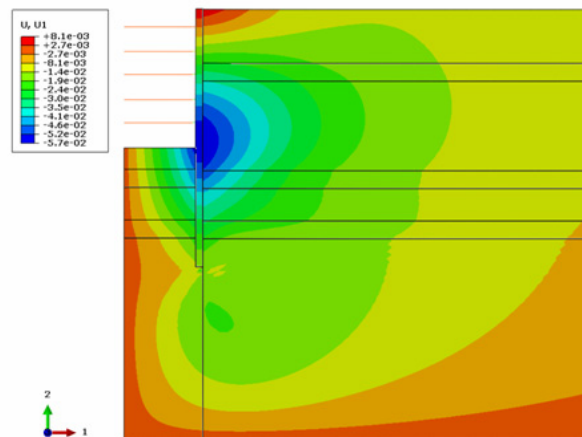


شکل ۲- هندسه‌ی مدل سازی شده: (الف) نرم افزار FLAC، (ب) نرم افزار ABAQUS

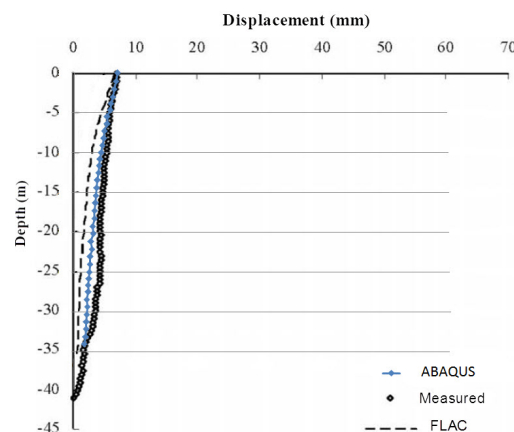
نمای هندسه به کار رفته در نرم افزار 4 FLAC و ABAQUS را نشان می‌دهد. مرزهای افقی مدل بر اساس طول عمیق‌ترین گمانه تا ۶۰ متر و مرزهای جانبی تا ۱۰ برابر عمق گود ادامه یافته‌اند. همچنین به دلیل تقارن، تنها نیمی از هندسه مدل سازی شده است. حرکت مرزهای جانبی در راستای قائم

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad (۶)$$

که G مدول برشی و ν نسبت پواسون است. شیونگ (۲۰۰۹) با استفاده از مدل رفتاری الاستیک-کاملاً پلاستیک مور کولمب اقدام به مدل سازی رفتار خاک کرد. شکل (۲)



شکل ۳- کانتورهای جابه‌جایی افقی گودبرداری مهار شده به روش دیواره دیافراگمی
در نرم افزار ABAQUS



شکل ۴- جابه‌جایی افقی دیواره گود در مرحله اول حفاری (۳/۴ متری)

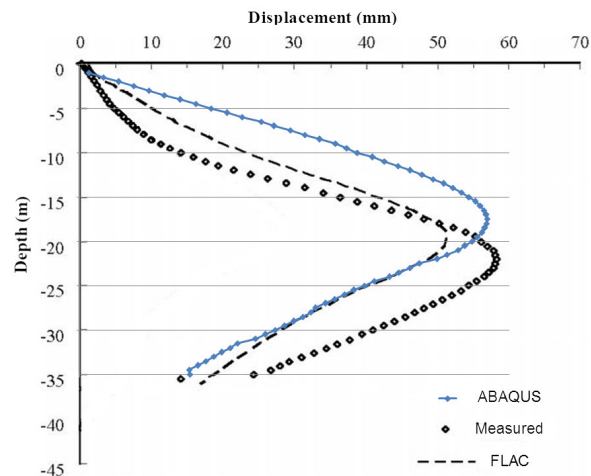
عوامل اختلاف جزئی نمودارها می‌توان به تفاوت ذاتی روش حلگر (اجزای محدود و تفاضل محدود)، نحوه اندرکنش خاک- سازه و جزء بندی اشاره کرد.

۳- مدل سازی

متغیرهای پارامتریک در این تحقیق شامل عمق، طول و عرض گودبرداری، پارامترهای مقاومت برشی خاک، ضریب الاستیسیته و سربار مجاور گودبرداری است. عمق‌های مورد

آزاد بوده و کف مدل در تمام جهات محدود شده است. شکل (۳) کانتورهای جابه‌جایی افقی در آخرین مرحله حفاری در نرم افزار ABAQUS 6.10 را نشان می‌دهد.

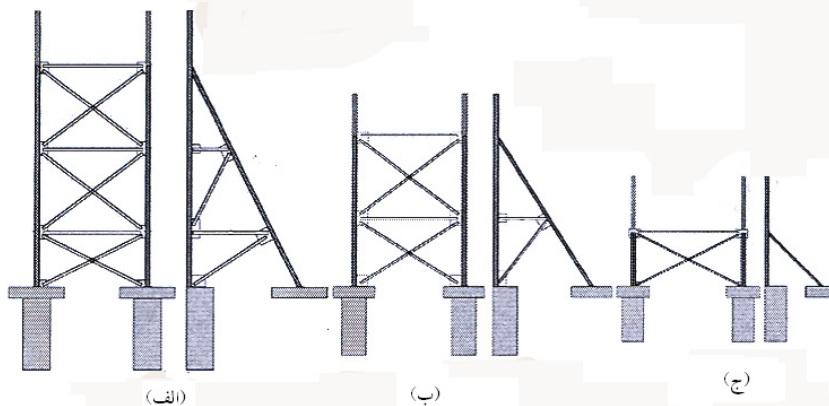
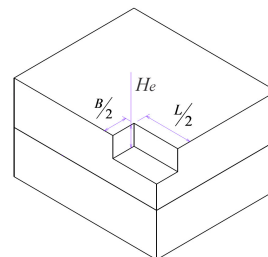
شکل‌های (۴) و (۵) مقادیر جابه‌جایی افقی حاصل از تحلیل انجام گرفته با مقادیر میدانی را به ترتیب در اولین و آخرین مرحله گودبرداری، نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر جابه‌جایی افقی دیواره در هر دو نرم افزار از الگوی مشابهی پیروی کرده و انطباق مناسبی دارند. از



شکل ۵- جابه‌جایی افقی دیواره گود در مرحله آخر حفاری (۱۹/۶ متری)

جدول ۳- ابعاد پارامتریک گودبرداری بر حسب متر

	نسبت های تقریبی عرض به طول گودبرداری		
	۱:۱	۱:۲	۱:۴
H_e	$B \times L$		
۴	۱۲*۱۲	۱۲*۲۴	۱۲*۵۲
۷	۱۵*۱۵	۱۲*۳۱	۱۵*۶۳
۱۰	۲۳*۲۳	۲۳*۴۷	۲۳*۸۷



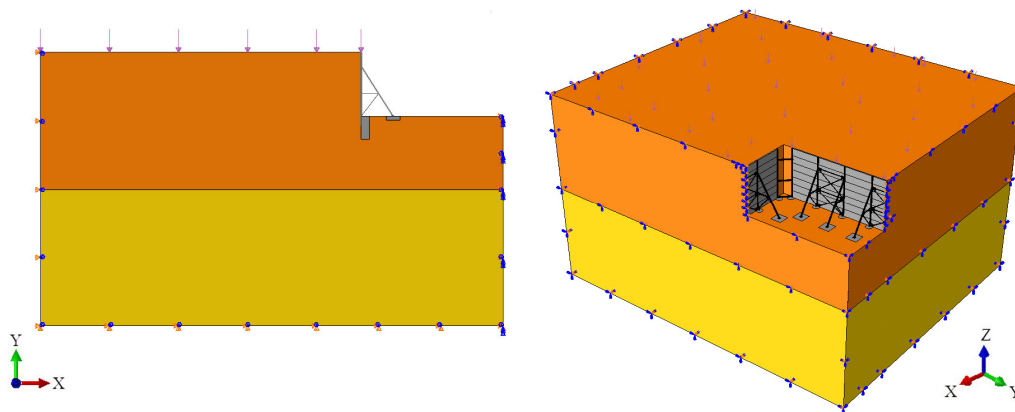
شکل ۶- ترکیب بندی اعضای سازه حائل: (الف) ۱۰ متر، (ب) ۷ متر، (ج) ۴ متر

دلیل تقارن تنها یک چهارم هندسه اصلی مدل شده است. شکل (۶) شمای کلی سازه‌های حائل را برای عمق‌های ۴، ۷ و ۱۰ متر نشان می‌دهد. همچنین مشخصات اعضای

بررسی در این تحقیق به همراه ابعاد پارامتریک گودبرداری در جدول (۳) آورده شده است. همچنین ابعاد گودبرداری با نسبت‌های تقریبی عرض به طول $\frac{1}{4}$ ، $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{1}$ هستند که به

جدول ۴- مشخصات اعضای اصلی سازه حائل بکار رفته در عمق های مختلف

ارتفاع گود (m)	عضو قائم	عضو مایل	ابعاد شمع (m)		ابعاد پی تکی (m)		
			قطر	طول	طول	عرض	ضخامت
۴	IPB14	*L80*80	۰/۸	۲	۱	۱	۰/۴
۷	IPB18	IPB12	۰/۹	۲/۵	۱/۵	۱/۵	۰/۴
۱۰	IPB18	IPB14	۱	۳	۲	۲	۰/۴

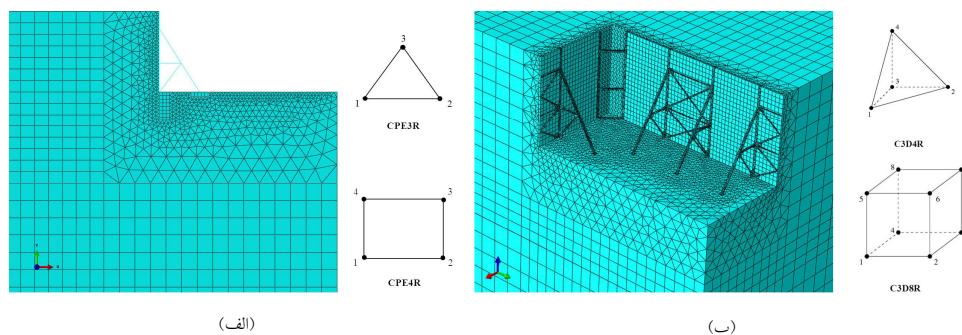


شکل ۷- نمونه شرایط مرزی و بارگذاری در حالت دو بعدی و سه بعدی (عمق گود ۷ متر و نسبت عرض به طول 1:2)

و سه بعدی برای گودبرداری با عمق ۷ متر را نشان می‌دهد. مرزهای پشت جداره گودبرداری به همراه سربار، تا ۵ برابر عمق گودبرداری در امتداد محورهای X و Y در حالت سه بعدی و در راستای محور X در حالت دوبعدی امتداد یافته است [۱۳]. مرزهای درونی مدل سه بعدی دارای تقارن بوده و حرکت سایر مرزهای جانبی در راستای محور Z در حالت سه بعدی و در راستای محور Y آزاد است. در مدل سازی سه بعدی نرم افزار ABAQUS 6.10 در فواصل دور از گود برداری از اجزای کاهش مرتبه یافته C3D8R^۸ و در مجاورت گود از اجزای C3D4^۹ استفاده شده است. در مدل دو بعدی نیز از اجزای کاهش مرتبه یافته CPE4R^{۱۰} و نیز CPE3R^{۱۱} به ترتیب در مرزهای دور و مجاورت گود استفاده شده است، شکل (۸) [۱۴]. همچنین خاک بستر از دو لایه تشکیل شده

اصلی سازه حائل، ابعاد پی تکی و شمع در جدول (۴) آورده شده است [۱۲]. لازم به ذکر است که فاصله‌ی اعضای سازه حائل از یکدیگر ۴ متر است. برای تامین صلبیت جانبی سیستم سازه‌ای متشکل از کل خریاها و به منظور به حداقل رساندن طول کماتش اعضای قائم و مایل خریاها، بین هر دو خریای مجاور، از مهاربندی مایل استفاده شده است. همچنین برای انتقال مناسب بار از دیواره گود به سازه حائل از پانل‌های پیش ساخته بتنی، مابین اعضای سازه حائل استفاده شده است. پانل‌های بتنی دارای طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۴، ۱ و ۰/۱۵ متر هستند. ضریب الاستیسیته و نسبت بواسون اجزای بتنی به ترتیب برابر ۲۰ مگاپاسکال و ۰/۳ اختیار شده‌اند.

شکل (۷) شرایط مرزی و بارگذاری را در حالت دو بعدی



شکل ۸- مش بندی و المان‌های به کار رفته: (الف) حالت دو بعدی؛ (ب) حالت سه بعدی (عمق گود ۷ متر و نسبت عرض به طول ۱:۲)

جدول ۵- مقادیر پارامتریک چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب الاستیسیته و سربار

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
C(kPa)	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۴۰	۵۰
ϕ (deg)	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	-
E(MPa)	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	-	-
Q(kPa)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	-	-

که برای هر عمق، طول و عرض معین، با انتخاب پارامترهای ستون ۳ جدول (۵) به عنوان پارامترهای پایه، هر کدام از پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب الاستیسیته و سربار مجاور گود به تنهایی و به صورت متناوب متغیر شده‌اند. سپس مقادیر جابه‌جایی افقی، نشست و نیروهای اعضای حائل برای مقایسه استخراج شده‌اند.

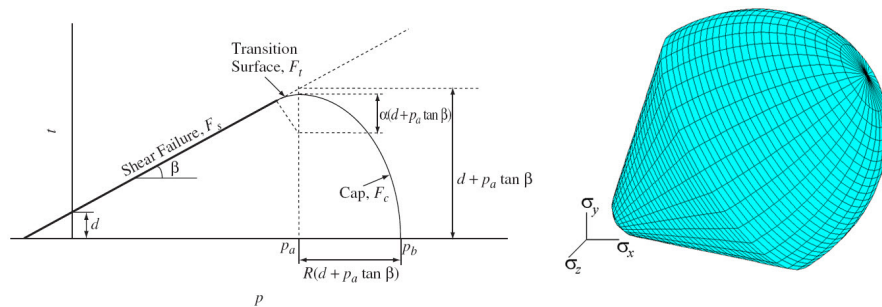
۵- مدل رفتاری خاک

مدل سخت شونده یک مدل رفتاری پیشرفته برای شبیه سازی رفتار انواع خاک‌های مختلف اعم از خاک‌های نرم و سخت است. از ویژگی‌های این مدل می‌توان به استفاده از نظریه پلاستیسیته به همراه الاستیسیته، در نظر گرفتن اتساع خاک، ارائه سطح تسلیم برای کنترل نرخ کرنش پلاستیک و وابستگی سختی خاک به تنش اشاره کرد. موارد عملی ثابت کرده است که در گود برداری (حالتی که رفتار باربرداری در

است که لایه فوقانی ماسه رس دار و لایه تحتانی از جنس رس سخت و هر یک به ضخامت ۱۵ متر است. برای انتقال تدریجی نیروی رانشی خاک به سازه حائل (اجرای مرحله‌ای^{۱۲})، گودبرداری‌های با عمق ۴، ۷ و ۱۰ متر به ترتیب در یک، دو و سه مرحله (پس از اجرای سازه حائل) حفاری و اجرا شده‌اند.

۴- متغیرهای پارامتریک خاک، ضریب الاستیسیته و سربار مجاور گود

همان‌گونه که در بخش قبل نیز اشاره شد، علاوه بر عمق و ابعاد گودبرداری، پارامترهای مقاومت برشی، ضریب الاستیسیته و سربار مجاور گود نیز به عنوان متغیر (برای بررسی تاثیرپذیری ضریب PSR از این متغیرها) در نظر گرفته شده‌اند. جدول (۵) طیف مقادیر انتخابی پارامترهای فوق را نشان می‌دهد. روند انجام محاسبات بدین گونه است



شکل ۹- مدل اصلاح شده‌ی دراگر-پراگر به همراه کلاهیک تسلیم

جدول ۶- روابط تبدیل پارامترهای مدل مور کولمب به پارامترهای مدل اصلاح شده‌ی دراگر-پراگر به همراه کلاهیک تسلیم

حالت سه محوری	حالت سه بعدی	$\tan \beta = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$	$d = \frac{18c \cos \varphi}{3 - \sin \varphi}$
حالت کرنش صفحه ای	حالت دو بعدی	$\tan \beta = \frac{3\sqrt{3} \tan \varphi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}}$	$d = \frac{3\sqrt{3}c}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}}$

حالت‌های سه محوری^{۲۲} (حالت سه بعدی) و کرنش صفحه‌ای (حالت دو بعدی) با استفاده از روابط جدول (۶) انجام می‌پذیرند [۱۷و۱۴].

نمونه‌ی مقادیر معادل سازی شده برای خاکی با مشخصات ستون ۳ جدول (۵)، در جدول (۷) آورده شده است. خاطر نشان می‌شود واژه‌های Porous Elastic و Cap Plasticity/Hardening به ترتیب معرف بخش رفتار الاستیک و پلاستیک خاک در مدل اصلاح شده‌ی دراگر پراگر به همراه کلاهیک تسلیم نرم افزار ABAQUS هستند.

همچنین منحنی‌های سخت شوندگی به همراه مقادیر معادل سازی شده ضریب الاستیسیته، در شکل (۱۰) آورده شده است. خاطر نشان می‌شود که این مقادیر در فشار مرجع $p'_0 = 100 \text{ kPa}$ به دست آمده‌اند.

۶- نتایج

۶-۱- جابه‌جایی افقی و نشست قائم

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین اشاره شد، در نواحی شهری، کنترل جابه‌جایی مهم‌ترین عامل در طراحی سازه‌ی

خاک بسیار حائز اهمیت است) مدل سخت شونده پاسخ‌های واقع بینانه تری نسبت به مدل‌های الاستیک-کاملاً پلاستیک^{۱۳}، مانند مور کولمب به دست می‌دهد [۱۵]. مدل سازی تحقیق حاضر با استفاده از مدل اصلاح شده‌ی دراگر-پراگر به همراه کلاهیک تسلیم^{۱۴}، صورت پذیرفته است، شکل (۹). انحنای سطح تسلیم در مدل حاضر، مانع از شکستگی و دوگانگی جواب -که در گوشه‌های تیز فضای تسلیم الگوی مور کولمب روی می‌دهد- می‌شود [۱۶].

با مراجعه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که سطح گسیختگی مدل اصلاح شده دراگر-پراگر به همراه کلاهیک تسلیم، توسط رابطه زیر مشخص می‌شود:

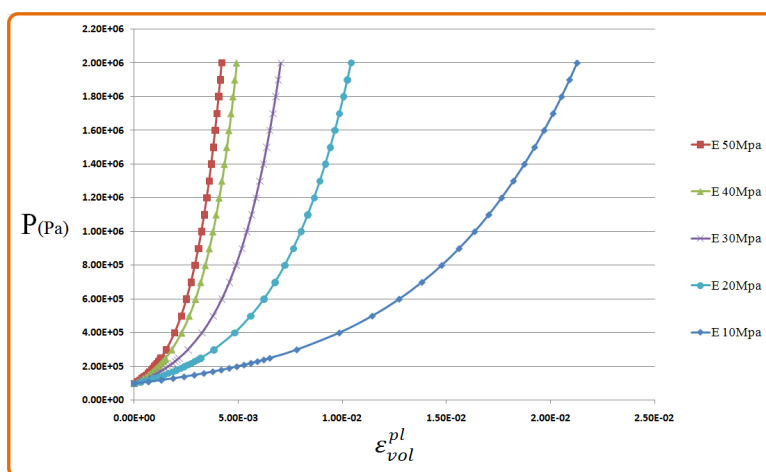
$$F_s = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (7)$$

که p ، t ، β و d به ترتیب برابر تنش موثر میانگین، تنش تفاضلی، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در مدل اصلاح شده دراگر-پراگر به همراه کلاهیک تسلیم‌اند.

تبدیل پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از معیار مور کولمب (C و φ) به پارامترهای مدل اصلاح شده‌ی دراگر-پراگر به همراه کلاهیک تسلیم، (d و β) در

جدول ۷- نمونه پارامترهای مدل اصلاح شده دراکر پراگر به همراه کلاهیک تسلیم

رفتار		ویژگی	شرایط کرنش سطح (2D)		شرایط سه محوری (3D)		واحد
			رس سخت	ماسه رس دار!	رس سخت!	ماسه رس دار!	
الاستیسیتیه !	الاستیک !	κ	$9/00E-04$	$1/48E-03$	$9/00E-04$	$1/48E-03$	-
		ν	$0/3$	$0/3$	$0/3$	$0/3$	-
پلاستیسیتیه	مدل اصلاح شده‌ی دراکر پراگر به همراه کلاهک تسلیم !	d	47904	31936	190909	127273	Pa
		β	39/76	30/16	50/19	37/67	degree
		R	0/3	0/3	0/3	0/3	-
		$(\epsilon_{vol}^{pl})_{ini}$	0	0	0	0	-
		α	0/02	0/02	0/02	0/02	-
		K	1	1	1	1	-
		رفتار سخت	شکل 10	شکل 10	شکل 10	شکل 10	-
جرم مخصوص		ρ	1900	1800	1900	1800	Kg/m ³

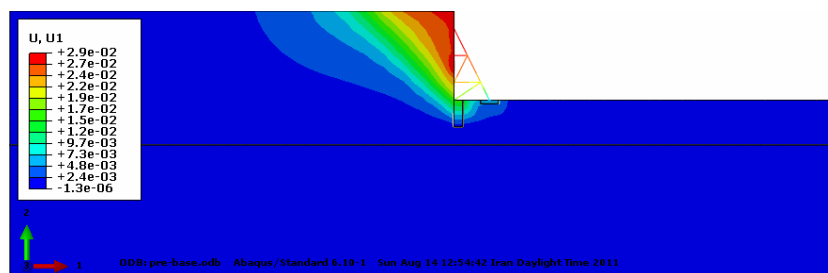


شکل ۱۰- منحنی سخت شوندگی خاک به همراه ضرایب الاستیسیتیه مرتبط

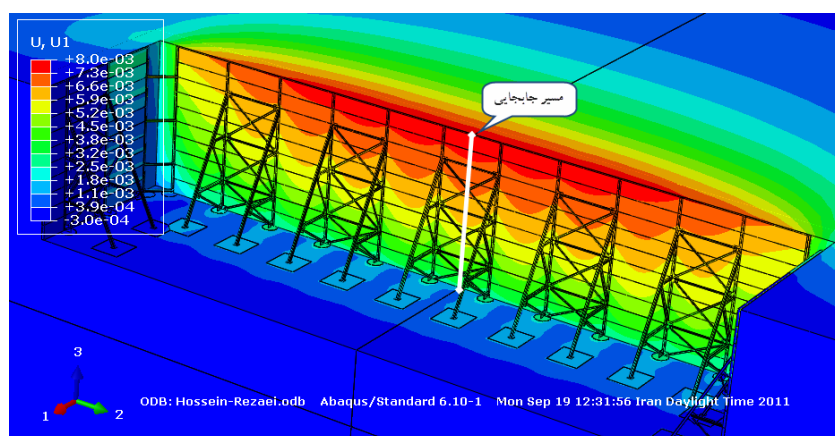
ضریب الاستیسیتیه متغیر است را برای یک گودبرداری به عمق ۱۰، طول ۴۷ و عرض ۲۳ متر نشان می‌دهد. این روند برای تمامی عمق‌ها، ابعاد و پارامترها تکرار می‌شود. همان گونه که انتظار می‌رود، بیشینه جابه‌جایی افقی در حالت دو بعدی به صورت قابل توجهی بیشتر از حالت سه بعدی است. از دیگر موارد مشهود در این نمودار افزایش دامنه تغییرات جابه‌جایی افقی در حالت دو بعدی نسبت به حالت سه بعدی است که نشان دهنده حساسیت پذیری بیشتر تحلیل دوبعدی نسبت

حائل است. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب توزیع جابه‌جایی افقی در حالت دو بعدی و سه بعدی را برای گودبرداری با عمق ۱۰ متر و پارامترهای پایه (ستون ۳ جدول ۵) نشان می‌دهد. برای بررسی جابه‌جایی در حالت سه بعدی، مسیری در میانه ضلع بزرگتر گودبرداری (مکانی که پیش بینی می‌شود جابه‌جایی بیشینه در آنجا رخ دهد) انتخاب شده است (شکل ۱۲).

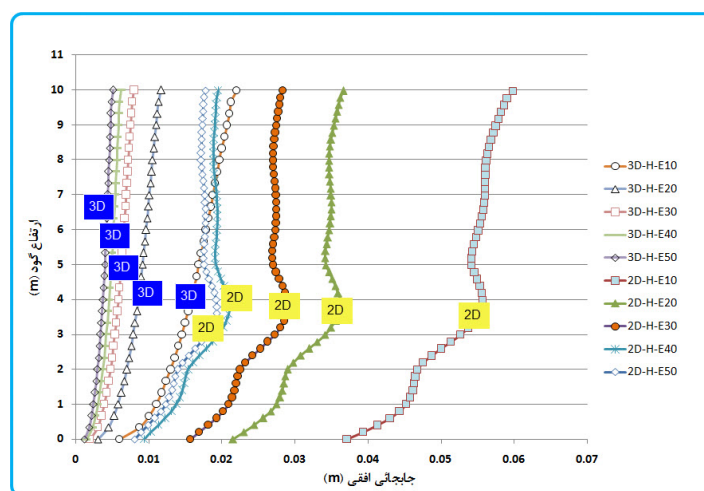
شکل (۱۳) نحوه تعیین جابه‌جایی دیواره در وضعیتی که



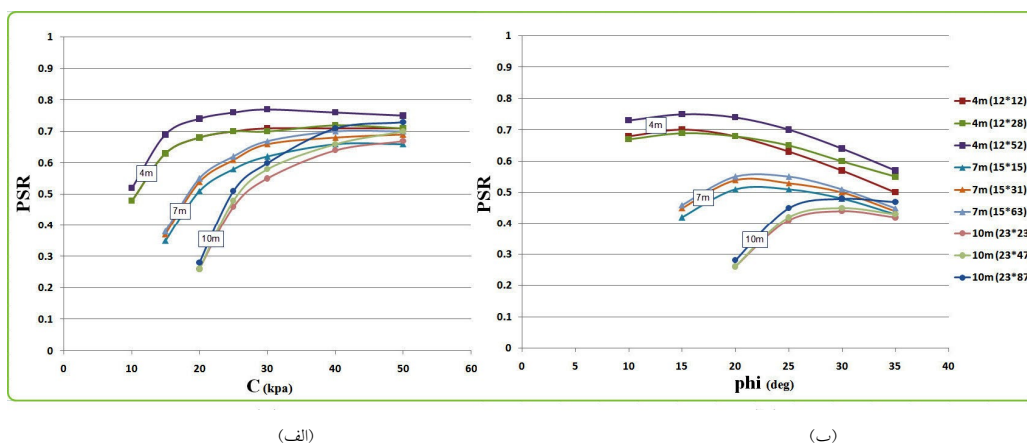
شکل ۱۱- نمونه توزیع جابه‌جایی افقی در حالت دو بعدی (عمق گود ۱۰ متر و نسبت عرض به طول 1:4)



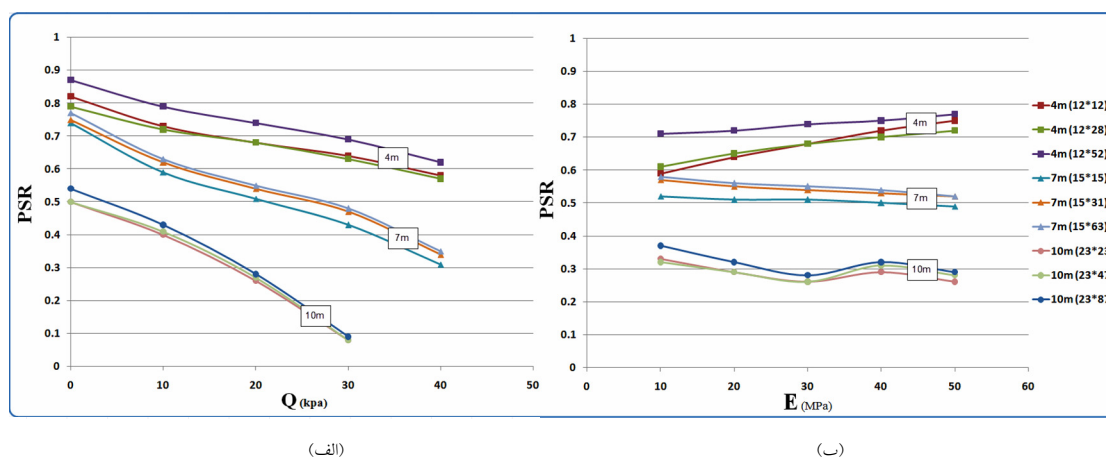
شکل ۱۲- نمونه مسیر انتخابی دیواره گود برای بررسی جابه‌جایی افقی در حالت سه بعدی (عمق گود ۱۰ متر و نسبت عرض به طول 1:4)



شکل ۱۳- توزیع جابه‌جایی افقی در حالت دو بعدی و سه بعدی (عمق ۱۰ متر، ضریب الاستیسیته متغیر)



شکل ۱۴- تغییرات نسبت PSR با (الف) چسبندگی، (ب) زاویه اصطکاک داخلی

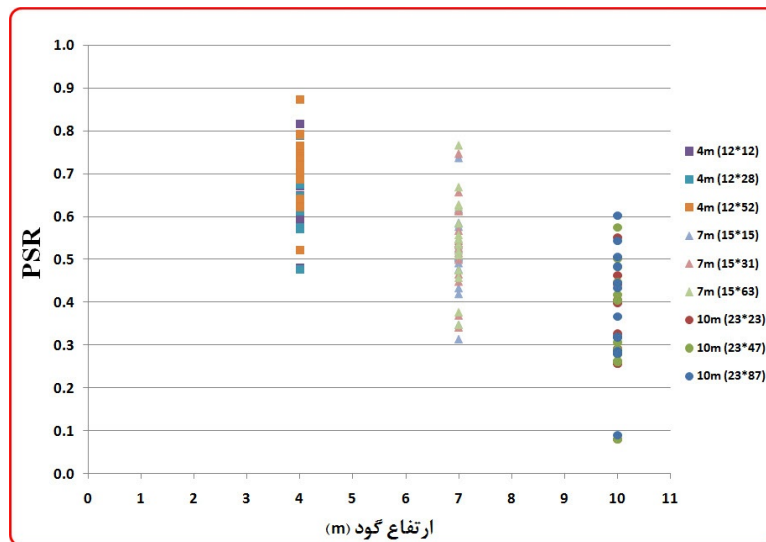


شکل ۱۵- تغییرات نسبت PSR با (الف) سربار مجاور گود، (ب) ضریب الاستیسیته

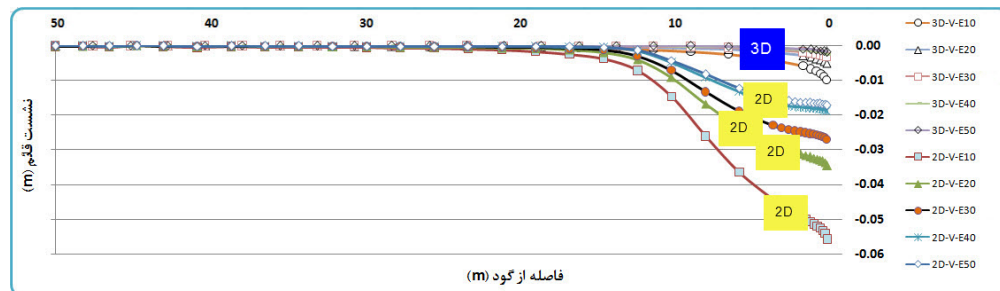
دارای شکل یکنواخت تری است. از مهم‌ترین عوامل اختلافات فوق می‌توان به اثر گوشه و در نظر گرفتن اثر تنش میانی در حالت سه بعدی اشاره کرد. به علاوه در حالت سه بعدی مقداری از نیروی رانشی خاک توسط پانل‌های بتنی (میان دو سازه خربایی متوالی) جذب شده و به صورت تغییر شکل نمایان می‌شود، این در حالی است که در حالت دو بعدی (کرنش صفحه‌ای) تمام نیروی رانشی خاک در واحد طول به سازه حائل منتقل می‌شود. در ادامه با استخراج مقادیر بیشینه جابه‌جایی به‌دست آمده

به تغییرات پارامترهای رفتاری خاک (در مقابل حالت سه بعدی) است.

همچنین نحوه تغییر شکل دیواره گود نیز به وضوح تمایز این دو حالت تحلیل را نشان می‌دهد؛ در این راستا، حذف‌اصل اعضای میانی عضو قائم و مایل خرپا در حالت دو بعدی، دچار تغییر شکل زیاد و به تعبیری "شکم دادگی" شده است که خود ناشی از نیروی رانشی بالا و عدم امکان تغییر شکل خارج از صفحه (عمود بر صفحه) در حالت دو بعدی است. از سوی دیگر تغییر شکل جداره‌ی گود در حالت سه بعدی



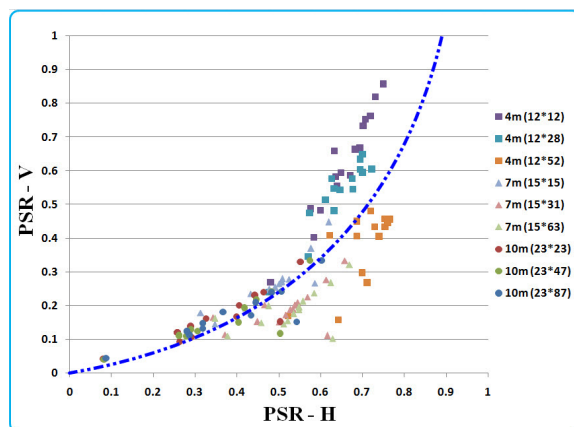
شکل ۱۶- تغییرات نسبت PSR با عمق گودبرداری



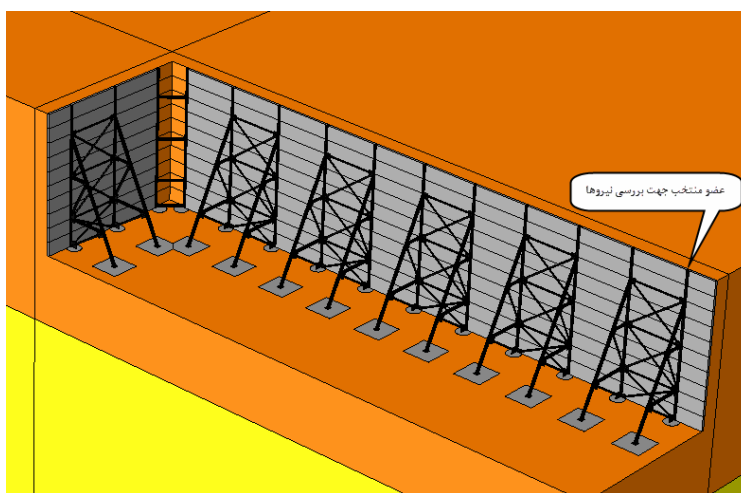
شکل ۱۷- نشست اطراف گود در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی (عمق ۱۰ متر و ضریب الاستیسیته متغیر)

می‌شوند و از تأثیر عمق کاسته می‌شود. شکل (۱۵) تغییرات نسبت PSR را به ازای تغییرات ضریب الاستیسیته و سربار مجاور گود نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۵-الف)، با افزایش سربار نسبت PSR کاهش می‌یابد و شیب تغییرات نسبت PSR با افزایش عمق، افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل (۱۵-ب) مشاهده می‌شود، برای هر عمق معین، با تغییر ضریب الاستیسیته نسبت PSR تغییر قابل توجهی از خود نشان نمی‌دهد و برای هر عمق این نسبت تقریباً ثابت باقی مانده است که خود نشان دهنده حساسیت یکسان مدل‌های سه بعدی و دو بعدی نسبت به

و با استفاده از معادله (۲)، نسبت PSR برای تمامی محاسبات حاصل می‌گردد. شکل (۱۴) تغییرات نسبت PSR به ازای تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را نشان می‌دهد. شکل (۱۴-الف) نشان می‌دهد که در مقادیر پایین چسبندگی، با افزایش عمق نسبت PSR کاهش یافته و با افزایش میزان چسبندگی از اثر عمق کاسته شده و عدد PSR به میزان تقریبی ۰/۷ نزدیک می‌شود. با توجه به شکل (۱۴-ب) مشاهده می‌شود که با کاهش زاویه اصطکاک داخلی، نسبت PSR می‌تواند روندی کاهشی یا افزایشی داشته باشد. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، مقادیر PSR به میزان ۰/۵ نزدیک



شکل ۱۸- رابطه نسبت PSR در جابه‌جایی افقی و نسبت PSR در نشست قائم

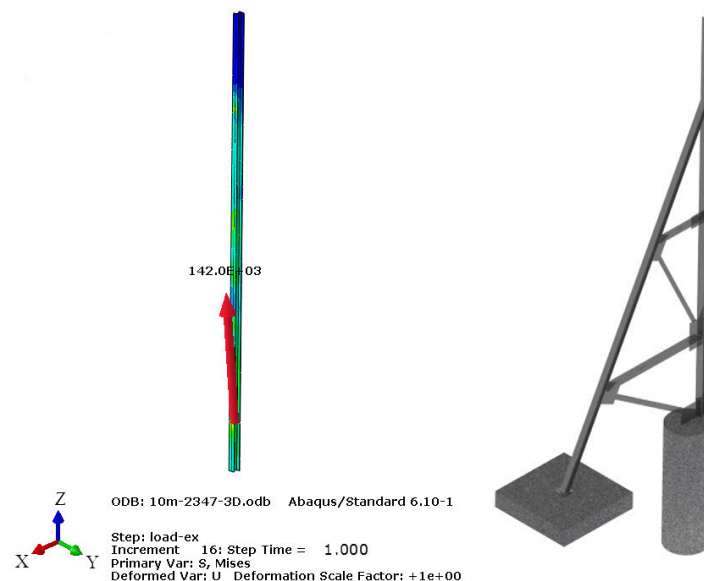


شکل ۱۹- عضو منتخب سازه حائل برای بررسی وضعیت نیروهای درونی در حالت سه بعدی

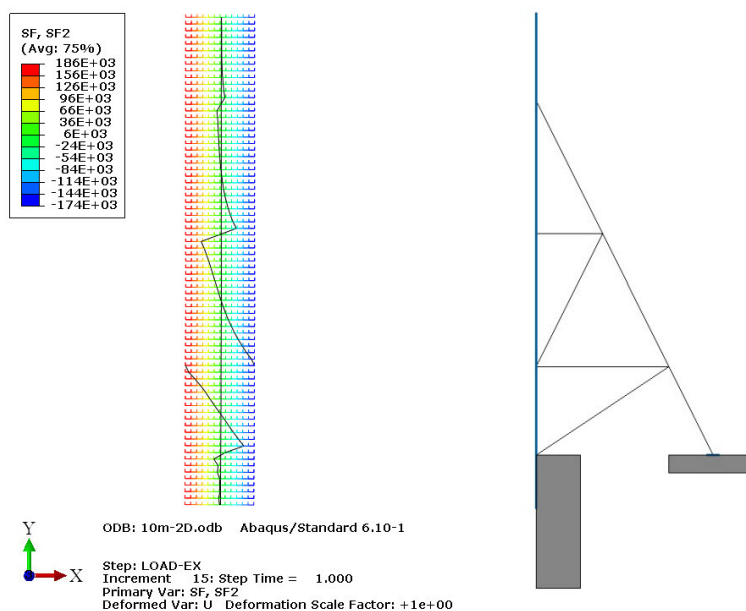
بیشتر شده و اهمیت مدل سازی سه بعدی، برای برآورد صحیح جابه‌جایی‌ها بیشتر می‌نماید. به طور میانگین نسبت PSR برای عمق‌های ۴، ۷ و ۱۰ متر به ترتیب برابر ۰/۷، ۰/۵۵ و ۰/۴ است که می‌توان با استفاده از این مقادیر (به عنوان ضرایب کاهنده‌ی جابه‌جایی افقی) به همراه تحلیل دو بعدی، برآوردی واقع بینانه تر از بیشینه جابه‌جایی افقی به دست آورد. لازم به ذکر است که ضرایب فوق تنها در شرایط مشابه می‌توانند مورد استفاده قرار گرفته و تغییر شرایط نیازمند

تغییرات ضریب الاستیسیته است. در تمامی موارد فوق، اثر طول و عرض گودبرداری کوچک و قابل صرف نظر کردن است.

در انتها تمامی ضرایب PSR به دست آمده از تحلیل پارامتریک در شکل (۱۶) برای عمق‌های ۴، ۷ و ۱۰ متر آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش عمق، متوسط نسبت PSR کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که با افزایش عمق، اختلاف تحلیل دوی بعدی با حالت سه بعدی



شکل ۲۰- تعیین نیروی محوری عضو قائم سازه حائل ۱۰ متری در حالت سه بعدی (بر حسب N)

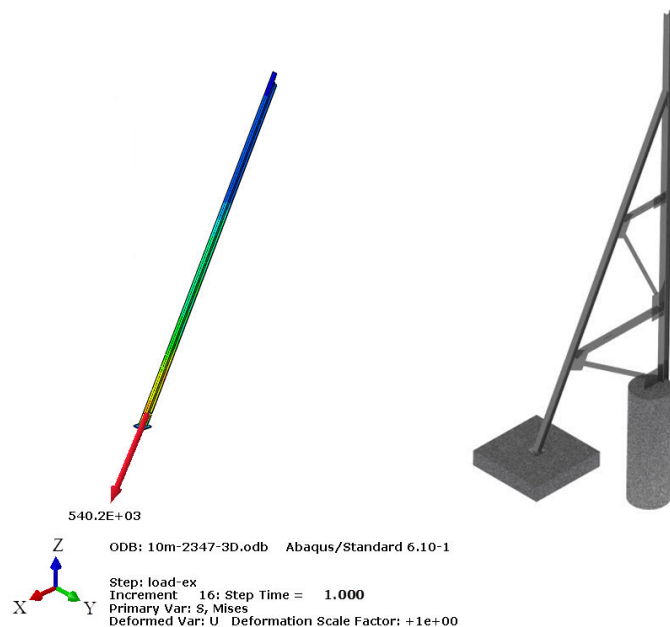


شکل ۲۱- تعیین نیروی محوری عضو قائم سازه حائل ۱۰ متری در حالت دو بعدی (بر حسب N)

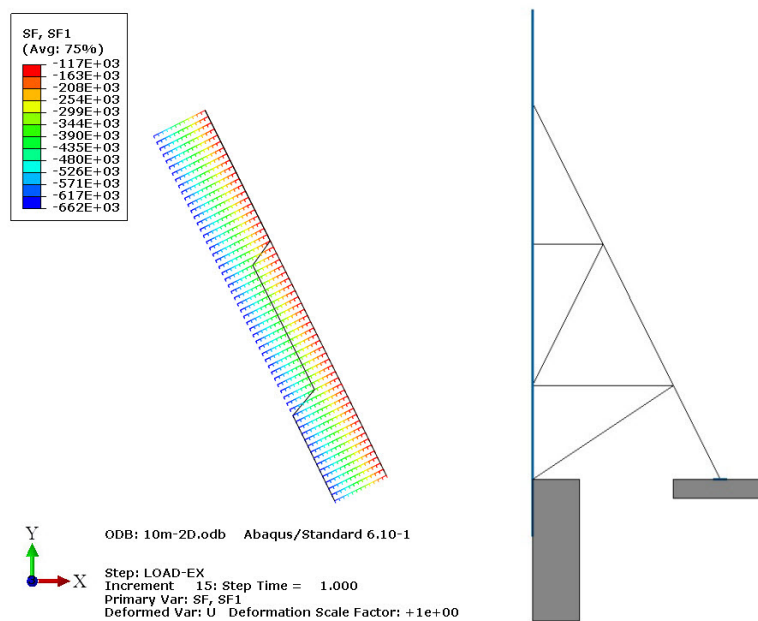
از نمودار این شکل می‌توان با در دست داشتن نسبت PSR مربوط به جابه‌جایی افقی، نسبت PSR متناسب با نشست قائم را نیز محاسبه کرده و از آن برای تعدیل مقادیر بیشینه نشست استفاده کرد. از سوی دیگر تجميع نسبت‌های PSR برای

تحقیقات مستقل در این زمینه است.

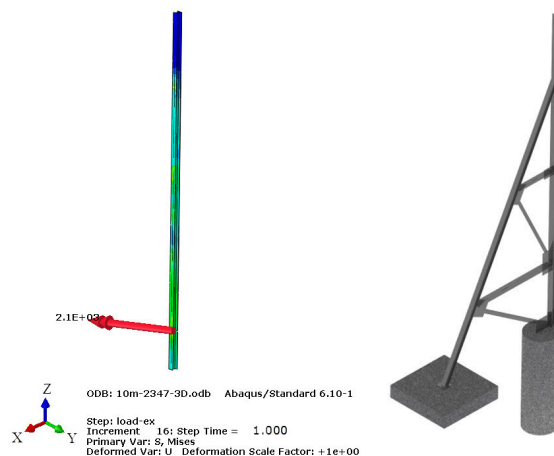
در ادامه با استخراج مقادیر بیشینه نشست قائم با استفاده از نمودارهای نشست، شکل (۱۷)، و محاسبه نسبت PSR برای نشست قائم، می‌توان شکل (۱۸) را ارائه کرد. با استفاده



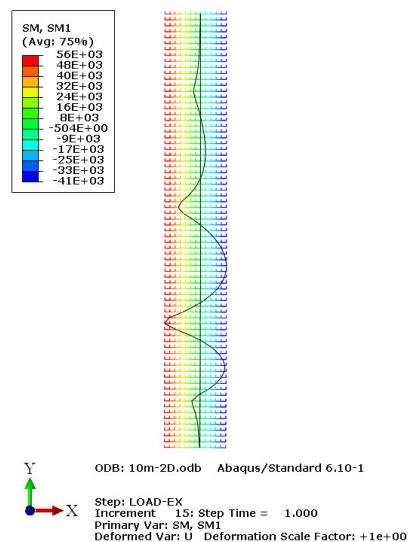
شکل ۲۲- تعیین نیروی محوری عضو مایل سازه حائل ۱۰ متری در حالت سه بعدی (بر حسب N)



شکل ۲۳- تعیین نیروی محوری عضو مایل سازه حائل ۱۰ متری در حالت دو بعدی (بر حسب N)



شکل ۲۴- تعیین لنگر خمشی عضو قائم سازه حائل ۱۰ متری در حالت سه بعدی (بر حسب N.m)



شکل ۲۵- تعیین لنگر خمشی عضو قائم سازه حائل ۱۰ متری در حالت دو بعدی (بر حسب N.m)

مقادیر نیروی محوری و لنگر خمشی اعضای اصلی سازه حائل، اقدام به تعیین مقادیر فوق شده است. در ادامه مقادیر بیشینه نیروی محوری و لنگر خمشی برای عضو اصلی قائم و نیز نیروی محوری عضو مایل خرپا در حالت دو بعدی و سه بعدی استخراج شده است. خاطر نشان می‌شود که در حالت سه بعدی، نزدیکترین عضو به میانه ضلع بزرگتر گودبرداری، شکل (۱۹) برای محاسبه مقادیر نیرو و لنگر خمشی انتخاب شده است (بحرانی ترین عضو به لحاظ نیروهای درونی).

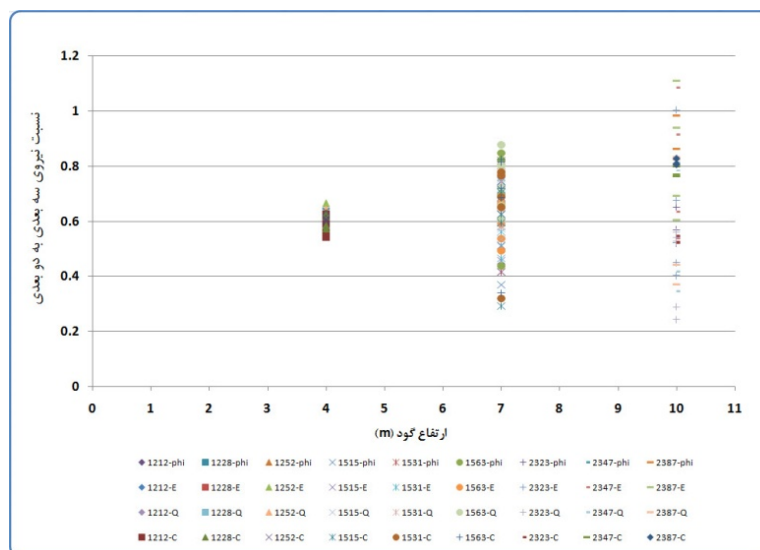
جابه‌جایی افقی و نشست قائم می‌تواند موجب حفظ ارتباط منطقی موجود میان جابه‌جایی افقی و نشست شود.

۲-۶- نیروی درونی اعضای سازه حائل

از مهم ترین مراحل طراحی سازه‌های حائل، برآورد مقادیر نیروی اعضای حائل برای طراحی سازه‌ای است. از این رو و برای مقایسه مقادیر نیروی ایجاد شده در اعضای اصلی سازه‌ی حائل در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی، با استخراج

جدول ۸- نمونه‌ی نحوه تعیین نسبت نیروی محوری و لنگر خمشی در حالت سه بعدی به حالت دو بعدی
مقادیر شکلهای (۲۰) الی (۲۵)

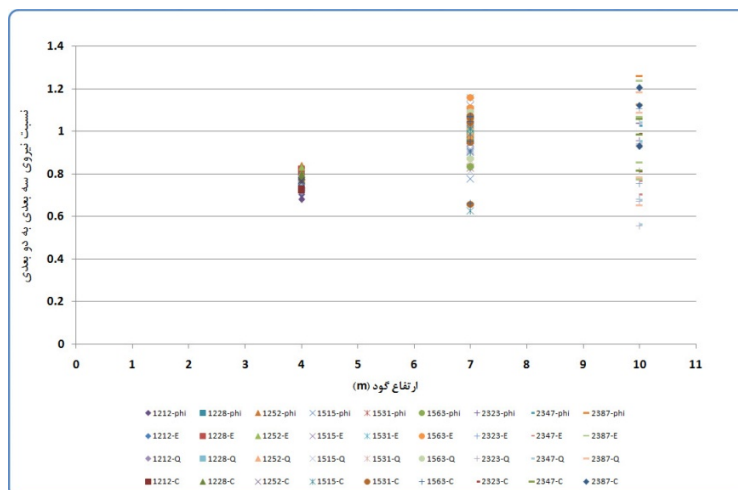
نسبت بیشینه نیرو و لنگر خمشی در حالت سه بعدی به حالت دو بعدی	حالت دو بعدی	حالت سه بعدی	
۰/۷۶	۱۸۶۳	۱۴۲۳	بیشینه نیروی محوری عضو قائم (N)
۰/۸۲	۶۶۲۳	۵۴۰۳	بیشینه نیروی محوری عضو مایل (N)
۰/۰۴	۵۶۳	۲/۱۳	بیشینه لنگر خمشی عضو قائم (N.m)



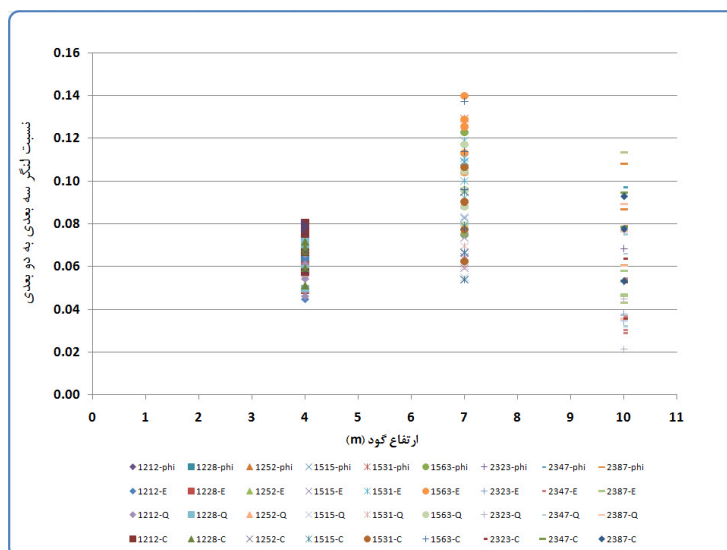
شکل ۲۶- تغییرات نسبت نیروی محوری عضو قائم در حالت سه بعدی به حالت دو بعدی به همراه عمق گودبرداری

پارامترهای پایه‌ای خاک، ستون (۳) جدول (۵) هستند. در ادامه با استخراج مقادیر بیشینه نیرو و لنگر خمشی به ازای تمام تحلیل‌های صورت پذیرفته، نسبت نیروهای درونی اعضای سازه حائل به دست می‌آیند. نمونه روند انجام شده در تحقیق، در جدول (۸) و با استفاده از مقادیر استخراج شده از شکل‌های (۲۰) الی (۲۵)، آورده شده است. این روند برای تمامی نتایج مدل سازی پارامتریک تکرار می‌شود. شکل (۲۶) نسبت نیروی محوری عضو قائم خرپا (به ازای تمام

مقادیر بیشینه در حالت دو بعدی به صورت مستقیم و با استفاده از نمودار توزیع^{۱۵} نیروی محوری و لنگر خمشی مربوطه به دست آمده است و در حالت سه بعدی با عبور یک صفحه عمود بر محور Z، شکل‌های (۲۰) الی (۲۵)، و پایش^{۱۶} سطح مقطع، مقادیر بیشینه نیروی محوری و لنگر خمشی استخراج شده‌اند. شکل‌های (۲۰) الی (۲۵) مربوط به استخراج پارامترهای نیروی محوری و لنگر خمشی گودبرداری به عمق ۱۰ متر، نسبت عرض به طول ۱:۴ و



شکل ۲۷- تغییرات نسبت نیروی محوری عضو مایل در حالت سه بعدی به حالت دو بعدی به همراه عمق گودبرداری



شکل ۲۸- تغییرات نسبت لنگر خمشی عضو قائم در حالت سه بعدی به حالت دو بعدی به همراه عمق گودبرداری

سه بعدی، به همراه عمق گودبرداری نشان داده شده است. با توجه به اینکه متوسط نسبت فوق در این عضو ۹۵٪ است، تطابق مناسبی میان نیروی محوری ایجاد شده در حالت دو بعدی نسبت به حالت سه بعدی مشاهده می‌شود. در نگاهی جامع تر، می‌توان نیروهای محوری به دست آمده از تحلیل دو بعدی را قابل اطمینان و با اختلاف قابل قبول نسبت به حالت سه بعدی ارزیابی کرد.

شکل (۲۸) نسبت لنگر خمشی را در حالت سه بعدی به حالت دو بعدی به همراه تغییرات عمق (به ازای تمام

تحلیل‌های صورت پذیرفته) را در حالت دو بعدی به حالت سه بعدی برای عمق‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۲۶) مشاهده می‌شود، دامنه نسبت نیروی محوری عضو قائم در حالت سه بعدی به حالت دو بعدی با افزایش عمق، افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که با افزایش عمق، اهمیت مدل سازی سه بعدی می‌تواند بیشتر شود. همچنین متوسط نسبت نیرو در عضو قائم، ۶٪ است. در شکل (۲۷) نسبت نیروی محوری عضو مایل در حالت دوبعدی به حالت

تحلیل‌های صورت گرفته) نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این شکل، مقادیر پایین این نسبت در هر سه عمق است که در بیشترین مقدار خود به میزان ۰/۱۴ می‌رسد. این نسبت نشان دهنده‌ی غیر واقعی بودن لنگر خمشی حاصل از تحلیل دو بعدی است. از عوامل موثر در این امر می‌توان به این نکته اشاره کرد که در حالت دو بعدی تمام نیروی رانشی خاک در واحد طول (عمود بر صفحه) به عضو قائم سازه حائل وارد می‌شود، شکم دادگی مشهود عضو قائم خراپ در شکل (۱۸)؛ این در حالی است که در حالت سه بعدی مقدار قابل توجهی از نیروی رانشی میان دو سازه حائل متوالی توسط پانل‌های بتنی جذب و به صورت تغییر شکل آزاد می‌شوند. از این رو مقادیر لنگر خمشی در تحلیل دو بعدی تا حدی قابل صرف نظر کردن و یا با استفاده از ضریبی در حدود ۰/۱۵ کاهش پذیر است. خاطر نشان می‌شود طراحی عضو قائم در کتاب مرجع [۱۲] نیز بر اساس نیروی کششی - و نه لنگر خمشی - است.

۷- نتیجه‌گیری

ایمنی و اقتصاد دو رکن انکارناپذیر طراحی سازه‌های حائل‌اند که این دو اصل نیاز به درک صحیح وضعیت و رفتار گودبرداری را ناگزیر می‌سازند. در تحقیق حاضر برای درک بهتر نحوه رفتار گودبرداری‌های مهار شده به روش خراپ، با مدل سازی آن به صورت دو بعدی و سه بعدی سعی در تبیین وجوه رفتاری این نوع مرسوم سازه حائل شد. از آنجا که کنترل مقادیر جابه‌جایی در نواحی شهری عامل تعیین کننده طراحی است، در ابتدا با معرفی نسبت PSR رابطه‌ی جابه‌جایی در حالت دو بعدی و سه بعدی معرفی شد. نسبتی که می‌توان با در اختیار داشتن آن و انجام تحلیل دو بعدی، جابه‌جایی در حالت سه بعدی (نزدیکتر به واقعیت) را محاسبه کرد. در این مطالعه به بررسی عوامل موثر بر نسبت PSR پرداخته شد که از آن جمله می‌توان به ابعاد گودبرداری، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب الاستیسیته و سربار مجاور گود اشاره کرد. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

۱. با افزایش چسبندگی، نسبت PSR افزایش یافته و به میزان تقریبی ۰/۷ رسیده و با افزایش عمق، تأثیر پذیری پارامتر

PSR از پارامتر چسبندگی مشاهده شد.

۲. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی مقادیر PSR به میزان ۰/۵ نزدیک شده و از تأثیر عمق کاسته شد.
۳. برای هر عمق معین، با تغییر ضریب الاستیسیته نسبت PSR تغییر قابل توجهی از خود نشان نداده و برای هر عمق این نسبت تقریباً ثابت است. با فرض ثابت ماندن ضرایب الاستیسیته، ضمن افزایش عمق، نسبت PSR کاهش یافت.
۴. با افزایش سربار، نسبت PSR کاهش و شیب تغییرات نسبت PSR با افزایش عمق افزایش یافت.
۵. با افزایش عمق، متوسط نسبت PSR کاهش و این نسبت به طور میانگین نسبت PSR برای عمق‌های ۴، ۷ و ۱۰ متر به ترتیب برابر ۰/۷، ۰/۵۵ و ۰/۴ حاصل شد که می‌توان از این ضرایب (به عنوان ضرایب کاهنده) برای منطقی‌تر کردن نتایج جابه‌جایی افقی حاصل از تحلیل دو بعدی استفاده کرد. بدیهی است دامنه مقادیر فوق برای شرایط مشابه کاربرد داشته و تغییر شرایط (لایه بندی خاک بستر، تأثیر شرایط آب زیر زمینی و ...) نیازمند تحقیقات مستقل است. از سوی دیگر به نظر می‌رسد با افزایش عمق، اثرپذیری رفتارگود از مدل سازی سه بعدی بیشتر شده و اهمیت در نظرگرفتن اثرات مدل سازی سه بعدی برای نیل به طراحی ایمن و اقتصادی بیشتر می‌شود.
۶. مقایسه مقادیر نیروی محوری در اعضای اصلی سازه حائل (عضو قائم و مایل) تطابق قابل قبول این پارامتر در حالت دو بعدی و سه بعدی را نشان داد. از سوی دیگر با مقایسه مقادیر لنگر خمشی عضو قائم مشاهده شد که نسبت این پارامتر در حالت سه بعدی به دو بعدی در بیشترین مقدار خود به ۰/۱۴ رسیده که نشان دهنده غیر حقیقی بودن مقدار حاصل شده این پارامتر در حالت دو بعدی است. بررسی موضوع فوق، می‌تواند پاسخ چرایی حذف پارامتر لنگر خمشی در محاسبات طراحی سازه حائل (علی رغم مقدار قابل توجه این پارامتر در حالت دو بعدی) است. عمده ترین دلیل این پدیده

سازی سه بعدی (نزدیک به واقعیت)، درصدی از نیروی رانشی توسط اعضای میانی دو سازه حائل مجاور (پانل‌های بتنی، قطعات الوار چوبی و ...) جذب و به صورت تغییر شکل آزاد می‌شود.

علاوه بر تفاوت‌های ذکر شده میان حالت‌های دو بعدی و سه بعدی، وارد آمدن تمامی نیروی رانشی خاک به عضو قائم (در واحد طول) در حالت دو بعدی است؛ در صورتی که در مدل

واژه‌نامه

1. corner effect	8. continuum 3dimensional Node, reduced integration	reduced integration
2. plane strain ratio	9. continuum 3dimensional Node, reduced integration	12. stage construction
3. plane strain	10. continuum plane strain node, reduced integration	13. elastic-perfectly plastic
4. axi-symmetric	11. continuum plane strain node,	14. Modified Drucker-Prager/Cap Model
5. bottom-up		15. trend
6. inclinometer		16. probe
7. settlement gage		

مراجع

۱. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، "مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان، پی و پی سازی"، وزارت مسکن و شهرسازی، (۱۳۸۸).
2. Ou, C.Y., Chiou, D.C., and Wu, T.S., "Three Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 5, pp. 337-345, 1996.
3. Finno, R. J., Blackburn, J. T., and Roboski, J. F., "Three-Dimensional Effects For Supported Excavations in Clay," *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 1, pp. 30-36, 2007.
4. Lee, F. H., Young, K.Y., Quan, K.C.N., and Chee, K.T., "Effect of Corners in Strutted Excavations: Field Monitoring and Case Histories," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 339-349, 1998.
5. Finno, R.J. and Roboski, J.F., "Three-Dimensional Response of a Tied-Back Excavation through Clay," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 3, pp. 273-282, 2005.
6. Lin, D.G. and Woo, S.M., "Three Dimensional Analysis of Deep Excavation in Taipei 101 Construction Project," *Journal of GeoEngineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 29-41, 2007.
7. Roboski, J.F., and Finno, R.J., "Distributions of Ground Movements Parallel to Deep Excavations in Clay," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, pp. 43-58, 2006.
8. Wu, C.H., Ou, C.Y., and Tung, N., "Corner Effects in Deep Excavations-Establishment of A forecast Model For Taipei Basin T2 Zone," *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-11, 2010.
9. Fuentes, R., and devriendt, M., "Ground Movements Around Corners of Excavations Empirical Calculation Method," *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 10, pp. 1414-1424, 2010.
10. Zdravkovic, L., Potts, D. M., and St. John H. D., "Modeling of a 3D Excavation in Finite Element Analysis," *Geotechnique*, Vol. 55, No. 7, pp. 497-513, 2005.
11. Hsiung, B.C.B., "A Case Study on the Behaviour of a Deep Excavation in Sand," *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, pp. 665-675, 2009.
۱۲. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، "اصول و مبانی گودبرداری و سازه‌های نگهدارنده"، وزارت مسکن و شهرسازی، (۱۳۸۵).
13. Lin, D. G., Chung, T. C., and Phienweij, N., "Quantitative Evaluation of the Three Dimensional Deformation of Multi Strutted Deep Excavation in Soft Clay Ground," *Geotechnical Engineering Journal*, South East Asian Geotechnical Society, Vol. 34, No. 1, pp. 41-57, 2003.
14. ABAQUS Inc, "Analysis of Geotechnical Problems with ABAQUS," 2003.
15. Brinkgreve RBJ., "PLAXIS 2D version 8 Manuals (Material Models)," A.A. Balkema, 2004.
۱۶. صدر نژاد، س.الف، "نظریه خمیری خاک و الگوسازی"، ویرایش دوم، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، (۱۳۹۰).
17. Helwany, S., *Applied Soil Mechanics: with ABAQUS Applications*, John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.