



شبیه سازی عددی دیوارهای میخ کوبی شده با استفاده از روش بدون شبکه

محمد علیائی^۱، بهنام نوروزی^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس، M.Olyaei@modares.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، b.norози@modares.ac.ir

b.norози@modares.ac.ir

خلاصه

امروزه میخ کوبی خاک^۱ به صورت گسترده به عنوان یک تکنیک مقاوم سازی جهت نگهداری شیب‌ها و گودبرداری‌ها استفاده می‌شود. معمولاً تحلیل و طراحی دیوارهای میخ کوبی شده با استفاده از روش تعادل حدی انجام می‌گیرد. با این وجود پارامترهای متعددی بر رفتار این گونه سازه‌ها تأثیرگذار هستند، به طوری که ارزیابی درست اندرکنش بین میخ‌خاک‌ها و خاک اطراف دارای اهمیت زیادی جهت ایمنی و طراحی اقتصادی این گونه سازه‌ها می‌باشد که این موضوع در روند طراحی معمولی به صورت مناسب در نظر گرفته نمی‌شوند.

هدف از این تحقیق، مدل سازی دقیق فصل مشترک^۲ بین میخ‌خاک و خاک با روش بدون شبکه می‌باشد که مدل سازی دقیق آن در روش اجزاء محدود با معضلات تغییر شکل‌های نامتجانس المان فصل مشترک همراه است. در این تحقیق با بهره‌گیری از یک روش بدون شبکه، یک روش عددی جدید برای شبیه سازی دیوارهای میخ کوبی شده ارائه شده است. این روش با ایجاد هندسه مسئله توسط گره‌ها، مشکلات روش‌های عددی مبتنی بر شبکه را حل مینماید. یک برنامه با استفاده از روش بدون شبکه RPIM نوشته شده است. برنامه با چندین مثال صحت سنجی شده است و عملکرد بسیار خوب روش بدون شبکه در مسائل اندرکنش خاک-سازه با مدلسازی یک دیوار میخ کوبی شده و مقایسه نتایج با روش المان محدود نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: گودبرداری، دیوارهای میخ کوبی شده، اندرکنش میخ و خاک، روش عددی بدون شبکه

۱. مقدمه

عوامل متعددی از قبیل محدودیت زمین و افزایش قیمت‌های روزافزون آن در شهرها، ضوابط و محدودیت‌های شهرسازی و معماری خصوصاً ضوابط تامین پارکینگ در ساختمان‌ها، وجود خاک بکر و بهتر در عمق، کاهش ارتفاع سازه از تراز پایه و بسیاری از عوامل فنی و اقتصادی دیگر سبب اجرای گودبرداری‌های عمیق و نیمه عمیق در ساختمان‌سازی می‌شوند. بدیهی است با انجام گود برداری و بخصوص گودبرداری‌های عمیق تعادل خاک بر هم خورده و وضعیت تنش‌ها در خاک تغییر می‌کند و باعث تغییر شکل‌هایی در خاک می‌شود. هر یک از این حالتها می‌توانند موجب برهم خوردن تعادل و پایداری دیواره گود و در نتیجه سازه‌های مجاور گود شود. یکی از مهمترین مشکلات و دغدغه‌های موجود در مهندسی عمران محافظت از دیواره‌های گود می‌باشد که در صورت عدم بررسی اصولی و علمی این سازه‌ها تحت شرایط مختلف منجر به خسارات جبران ناپذیری خواهد گردید. یکی از روش‌های متداول در محافظت دیواره‌های گودبرداری‌ها، روش میخکوبی خاک می‌باشد. این روش سبب می‌شود که مقاومت برشی خاک در اثر ترکیب با المانهای مقاوم، میخ^۳، بهبود یابد. این المانها دارای مقاومت کششی زیاد بوده و باعث اصلاح رفتار مکانیکی توده خاک، بویژه افزایش مقاومت برشی آن میشود.

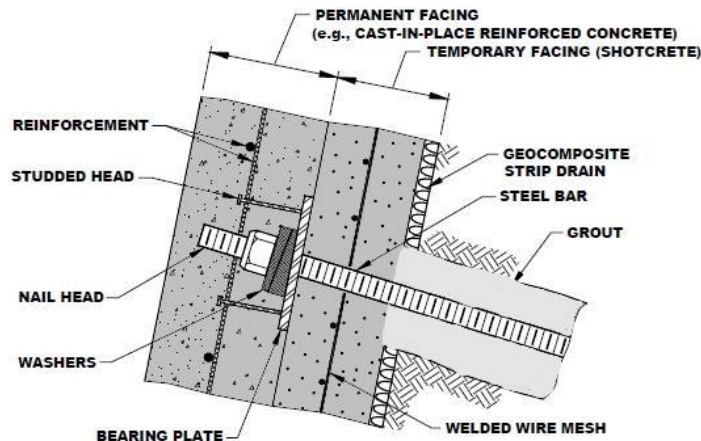
اولین کاربردهای میخ‌گذاری در خاک مربوط به یک پروژه راه‌آهن نزدیک ویرسایلز^۴ فرانسه در سال ۱۹۷۲ بود که ارتفاع گودبرداری در این پروژه ۱۸ متر می‌باشد [Rabejac and Toudic, 1]. به دلیل اینکه این روش مقرون به صرفه و سریع‌تر از دیگر روش‌های نگهداری بود، به سرعت در فرانسه و دیگر کشورهای اروپایی به کار گرفته شد.

¹ Soil Nailing

² Interface

³ Nail

⁴ Versailles



شکل (۱) اجزاء دیوار میخ کوبی شده [۲]

درباره شبیه‌سازی عددی دیوارهای میخ کوبی شده تحقیقات مختلفی از قبیل: روش المان محدود^۵ Zhou, Y و همکاران در [۳]، Olia, A. and J. Liu در [۴]، Singh در [۵]، روش المان مجزا^۶ Kim و همکاران در [۶]، روش تفاضل محدود^۷ Babu و همکاران در [۷] انجام شده است. که وابسته به شبکه می‌باشد و با معضلات تغییر شکل‌های نامتجانس المان فصل مشترک همراه هستند، در این پژوهش از روش بدون شبکه جهت حل این معضلات برای اولین بار در شبیه‌سازی دیوارهای میخ کوبی شده استفاده شده است.

۲- معرفی سیستم دیوار میخ کوبی

میخ کوبی به معنای تحکیم غیرفعال، بدون اعمال پیش تنیدگی، خاک می‌باشد که جهت انجام این کار میله‌های فولادی، میخ، در خاک نصب می‌گردند. اجزاء بک دیوار میخ کوبی شده در شکل (۱) نشان داده شده است. روند ساخت دیوارهای میخ کوبی شده در شکل (۲) نشان داده شده است.

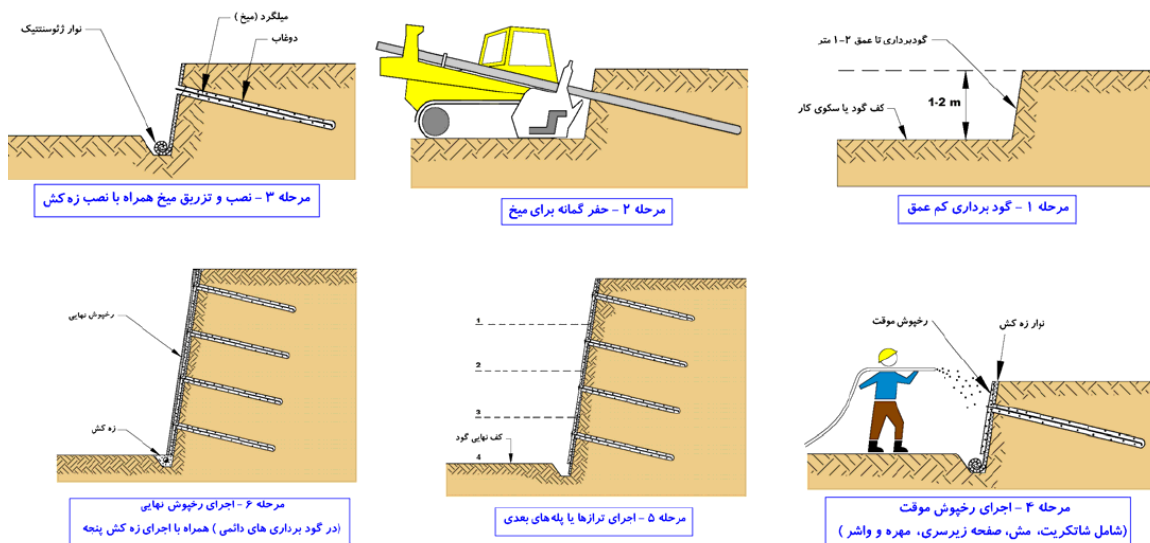
۳- روش بدون شبکه

تا کنون روش‌های بدون شبکه مختلفی توسط محققین ارائه شده است که در جدول (۱) به صورت خلاصه آورده شده است. در این تحقیق از روش بدون شبکه درون یابی نقطه ای (RPIM) تقویت شده با ترم چند جمله‌ای استفاده شده است. در ادامه ابتدا روش بدون شبکه درون یابی نقطه‌ای توضیح داده می‌شود سپس کاربرد این روش در شبیه‌سازی دیوارهای میخ کوبی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت با استفاده از مثالهای عددی درستی برنامه نوشته شده توسط نویسندگان ارائه شده است.

⁵ Finite Element Method

⁶ Discrete element method

⁷ Finite difference method



شکل (۲): مراحل ساخت دیوار میخ کوبی شده

۳-۱- روش بدون شبکه درون یابی نقطه‌ای (RPIM)

در محاسبه توابع شکل روش RPIM از توابع اساسی شعاعی^۸ استفاده می‌شود. استفاده از توابع اساسی شعاعی سبب جلوگیری از منفرد شدن ماتریس گشتاور^۹، P_Q ، و همچنین بهترین روش جهت تضمین معکوس پذیری ماتریس P_Q می‌شود. توابع اساسی شعاعی مختلفی موجود می‌باشد که در این تحقیق از توابع multi-quadratic (MQ) که به صورت زیر می‌باشد استفاده شده است:

$$R_i(X) = (r_i + c^2)^q \quad (1)$$

که در آن r_i فاصله نقطه مورد نظر (X) و یک گره میدانی^{۱۰} (X_i) میباشد.

$$r_i = \|X - X_i\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2)$$

c و q پارامترهای شکل می‌باشند که وابسته به نوع مسئله می‌باشند. برای مسائل مکانیک جامدات Liu مقدار $c=1.42$ and $q=0.98$ را پیشنهاد کرده است. [۲۴]

جهت دقت بیشتر و سازگاری روش RPIM توابع اساسی شعاعی با توابع چندجمله‌ای تقویت شده است. در این روش، تابع تقریب در دامنه پشتیبانی نقطه X نشان داده شده در شکل (۳) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$u(X) = \sum_{i=1}^n R_i(X) a_i + \sum_{j=1}^m p_j(X) b_j = R^T(X) a + P^T(X) b \quad (3)$$

که در آن R_i و p_j به ترتیب توابع اساسی شعاعی و چندجمله‌ای، a_i و b_j ضرایب درون یابی، m تعداد توابع چندجمله‌ای استفاده شده و n تعداد گره‌های موجود در دامنه پشتیبانی نقطه X می‌باشد. جهت بدست آوردن ضرایب a_i و b_j به $m+n$ معادله احتیاج است. n معادله از طریق اینکه مقدار تابع $u(X)$ در n گره دامنه پشتیبانی باید با مقادیر گرهی برابر باشد به دست می‌آید. پس خواهیم داشت:

⁸ Radial Basis Functions(RBF)

⁹ Moment matrix

¹⁰ Field node



جدول (۱): انواع روش های بدون شبکه

روش	مرجع
روش ذرات هیدرودینامیکی صاف	Gingold & Monaghan [۹, ۸]
روش المان های پراکنده	Nayroles [۱۰]
روش بدون المان گالرکین	Belytschko[۱۱]
روش ذره ای با هسته باز تولید کننده	W.K. Liu et al[۱۲]
روش درون یابی نقطه ای	G.-R. Liu & GU[۱۳]
ابره های HP ^{۱۱}	Durate & Oden[۱۴]
روش المان محدود با جزء بندی یکپارچه ^{۱۲}	Melenk & Babuska[۱۵]
مربع سازی با جزء بندی یکپارچه ^{۱۳}	Carpinteri, Ferro, & Ventura[۱۶]
روش ذره در سلول ^{۱۴}	Sulsky, Zhou & Schreyer[۱۷]
روش نقطه مادی ^{۱۵}	Sulsky, Chen & Schreyer[۱۸]
روش نقطه محدود ^{۱۶}	Onate et al[۱۹]
روش المان طبیعی	Sukumar[۲۰]
روش کره های محدود ^{۱۷}	DE & Bathe[۲۱]
روش تجمع نقاط ^{۱۸}	G.Liu[۲۲]
روش حداقل طول ^{۱۹}	G.Liu et al[۲۳]

$$u_k = \sum_{i=1}^n R_i(x_k, y_k) a_i + \sum_{j=1}^m p_j(x_k, y_k) b_j \quad k=1,2,\dots,n \quad (۴)$$

یا در فرم ماتریسی

$$U_s = R_Q a + P_m b \quad (۵)$$

$$P_m = \begin{bmatrix} P_1(x_1, y_1) & P_2(x_1, y_1) & \dots & P_m(x_1, y_1) \\ P_1(x_2, y_2) & P_2(x_2, y_2) & \dots & P_m(x_2, y_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_1(x_n, y_n) & P_2(x_n, y_n) & \dots & P_m(x_n, y_n) \end{bmatrix} \quad R_Q = \begin{bmatrix} R_1(r_1) & R_2(r_1) & R_3(r_1) & \dots & R_n(r_1) \\ R_1(r_2) & R_2(r_2) & R_3(r_2) & \dots & R_n(r_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_1(r_n) & R_2(r_n) & R_3(r_n) & \dots & R_n(r_n) \end{bmatrix} \quad (۶)$$

m معادله باقی مانده از طریق اعمال شرایط یکتایی جواب به صورت زیر بدست می آیند.

$$\sum_{i=1}^n p_j(x_i, y_i) a_i = 0 \quad j=1,2,\dots,ma \quad (۷)$$

- ¹¹ hp-Cloud
- ¹² Partition of Unity Finite Element Method
- ¹³ Partition of Unity Quadrature
- ¹⁴ Particle in Cell
- ¹⁵ Material Point Method
- ¹⁶ Finite Point Method
- ¹⁷ Method of Finite Spheres
- ¹⁸ Assembly Point Method
- ¹⁹ Minimum Length Method



یا در فرم ماتریسی

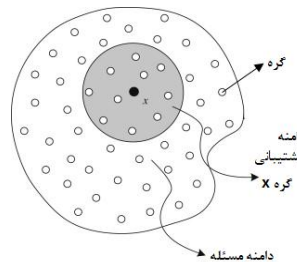
$$P_m^T a = 0 \quad (8)$$

با ترکیب معادلات (۸) و (۵) و انجام یک سری ساده‌سازی خواهیم داشت:

$$a_0 = \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = G^{-1} \bar{U}_s \quad (9)$$

که در آن

$$G = \begin{bmatrix} R_Q & P_m \\ P_m^T & 0 \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad \bar{U}_s = \{u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n \ 0 \ 0 \ \dots \ 0\} \quad (10)$$



شکل (۳): دامنه پشتیبانی دایره‌ای نقطه X

همچنین با ترکیب معادله (۳) و (۱۰) خواهیم داشت:

$$u(X) = \{R^T(X) \ P^T(X)\} G^{-1} \bar{U}_s = \bar{\phi}^T \bar{U}_s \quad (11)$$

که در آن

$$\bar{\phi}^T = \{\varphi_1(X) \ \varphi_2(X) \ \dots \ \varphi_n(X) \ \varphi_{n+1}(X) \ \dots \ \varphi_{n+m}(X)\} \quad (12)$$

و بردار توابع شکل به صورت زیر خواهد بود:

$$\phi^T = \{\varphi_1(X) \ \varphi_2(X) \ \dots \ \varphi_n(X)\} \quad (13)$$

۴- مدل‌سازی دیوار میخ‌کوبی‌شده

روش‌های مختلفی جهت شبیه‌سازی فصل مشترک بین میخ و خاک موجود می‌باشد. در این تحقیق جهت مدل‌سازی فصل مشترک از روش بکار گرفته‌شده توسط بینش و همکاران در [۲۵] استفاده شده است. روش بدین صورت می‌باشد که خاک، میخ، فصل مشترک و پوشش دیوار به صورت جداگانه مدل‌سازی می‌شود. فصل مشترک به صورت دو صفحه موازی در نظر گرفته می‌شود که فاصله آنها از یکدیگر ناچیز بوده و فشرده‌ای ما بین دو صفحه در مقابل حرکتهای برشی و نرمال آنها نسبت به هم مقاومت می‌کنند. در این تحقیق مسئله توسط گره‌هایی که نشان‌دهنده خاک، میخ، فصل مشترک و پوشش دیوار است نمایش داده می‌شود. ابتدا فازهایی جهت گودبرداری در نظر گرفته شده است. در هر فاز ماتریس سختی محاسبه می‌گردد و معادله تعادل حل می‌گردد و در نهایت جابه‌جایی‌ها محاسبه می‌گردند.

۵- مثال‌های عددی

در این قسمت ابتدا جهت صحت سنجی برنامه نوشته‌شده مثالی که دارای حل تحلیلی می‌باشد بررسی شده است، سپس با استفاده از برنامه یک مثالی از دیوار میخ‌کوبی‌شده بررسی شده است.

۵-۱- ستونی از خاک تحت فشار یکنواخت در حالت کرنش مسطح (میدان تغییر شکل یک بعدی)

در این مثال مطابق شکل (۴) جعبه‌ای به ابعاد $3m \times 3m$ در نظر گرفته شده است که بالای آن بار گسترده یکنواخت اعمال شده است. جواب تحلیلی این مسئله به صورت زیر می‌باشد.



$$w = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2E(1-\nu)} (\gamma z^2 - 2\gamma Hz - 2Pz)$$

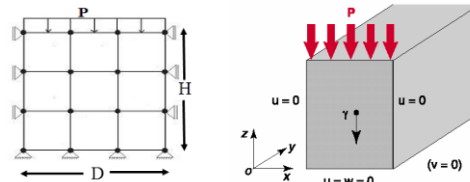
$$\sigma_{zz} = \gamma(z-H) - P$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{zz}$$

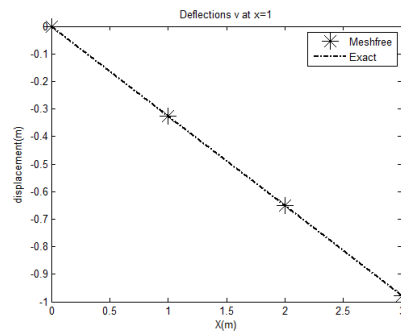
مشخصات استفاده شده در برنامه به صورت زیر می باشد.

$$H = 3m \quad D = 3m \quad P = 1000 \frac{kN}{m^2} \quad \gamma = 0 \frac{kN}{m^3}$$

جهت مدل سازی از یک مدل بدون شبکه با ۱۶ گره جهت نمایش محیط z^2 به همراه یک شبکه 3×3 با چهار نقطه گوس در هر بلوک جهت انگرال گیری عددی استفاده شده است. مقایسه نتایج تحلیلی و عددی نشان داده شده در شکل (۵) و همچنین جدول (۲) عملکرد بسیار خوب برنامه را در تحلیل الاستیک شرایط کرنش مسطح به خوبی نشان می دهد.



شکل (۴): ستونی از خاک تحت فشار یکنواخت در حالت کرنش مسطح



شکل (۶): مقایسه نتایج تغییر شکل نقاط حاصل از روش بدون شبکه و روش تحلیلی در مختصات $x=1$

جدول (۲): مقایسه تنش های ایجاد شده حاصل از روش بدون شبکه و روش تحلیلی در نقاط گوس

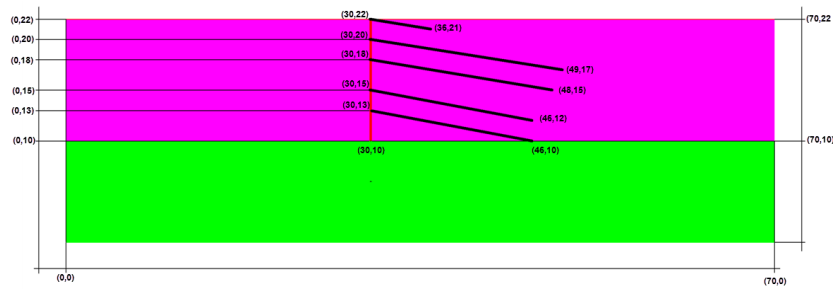
$\frac{kN}{m^2}$ روش تحلیلی	$\frac{kN}{m^2}$ روش بدون شبکه	
1000	1000	تنش قائم σ_{zz}
-111.1111	-0.1111×10^3	تنش های افقی σ_{yy} و σ_{xx}

۲-۵- مدل سازی گود مسلح شده با استفاده از میخ

در این مثالی یک گودبرداری مسلح شده با نیل با هندسه نشان داده شده در شکل (۷) با استفاده از روش های بدون شبکه مدل سازی شده و نتایج حاصل با نتایج حاصل از روش المان محدود بررسی شده است. مشخصات استفاده شده جهت مدل سازی در جداول (۳) و (۴) آورده شده است. جهت مدل سازی در روش



المان محدود با استفاده از نرم افزار plaxis از روند مدلسازی توصیه شده توسط plaxis استفاده شده است همچنین جهت نزدیک کردن نتایج به حل دقیق از ریزترین شبکه ممکن استفاده شده است. مدل‌های المان محدود و بدون شبکه در شکل (۸) آورده شده است. همچنین در مدلسازی روش بدون شبکه فقط آخرین مرحله بعد از حفاری مدلسازی شده است. در این مثال فقط ماکزیمم تغییر مکان افقی در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۹) حداکثر تغییر مکان افقی به دست آمده از روش المان محدود برابر با ۴۰/۹ میلی‌متر است که اختلاف ناچیزی با حداکثر تغییر مکان افقی به دست آمده از روش بدون شبکه که برابر با ۳۷/۸۹ میلی‌متر است دارد و این عملکرد بسیار خوب روش بدون شبکه در مدلسازی دیوارهای میخ کوبی شده را نشان می‌دهد.



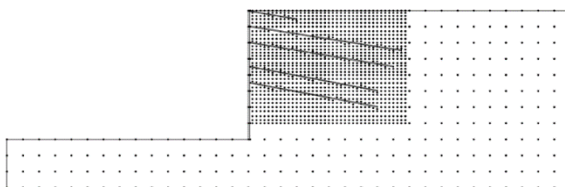
شکل (۷): مدل هندسی گودبرداری محافظت شده با نیل

جدول (۳): مشخصات لایه‌های خاک مسئله

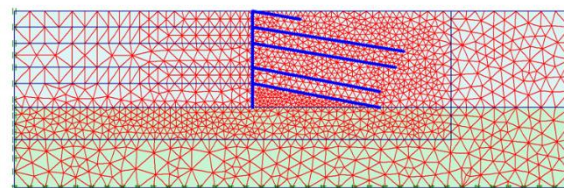
مشخصات	لایه ۱	لایه ۲	واحد
چسبندگی	۲۰	۲۰	kN/m^2
زاویه اصطکاک داخلی	۴۰	۴۰	degree
وزن مخصوص	۲۱/۶	۲۱/۶	kN/m^3
مدول یانگ	$۴/۰۷ \times ۱۰^۴$	$۹/۵۷ \times ۱۰^۴$	kN/m^2
ضریب پواسن	۰/۳۴	۰/۳۲	-
ضخامت لایه	۱۲	۱۰	m

جدول (۴): پارامترهای نیل و رویه

واحد	Poisson's ratio	EI	EA
نیل	۰/۲۰	۳۲۲	$۷/۳۷ \times ۱۰^۴$
رویه	۰/۱۸	۳۹۶۸۱	$۲/۷۳ \times ۱۰^۶$
واحد	-	$\text{kN/m}^2/\text{m}$	kN/m

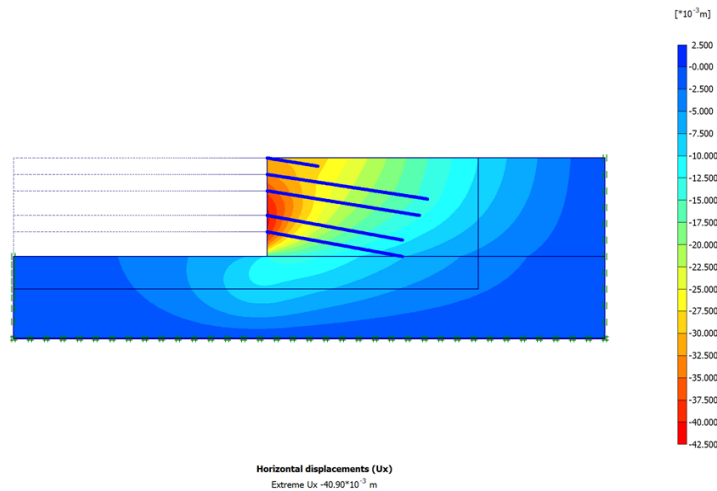


(ب)



(الف)

شکل (۸): مدلسازی (الف) روش المان محدود (ب) روش بدون شبکه



شکل (۹): تغییر مکان افقی حاصل از حل المان محدود

۶. نتیجه گیری و پیشنهادات:

در این تحقیق کاربرد روش بدون شبکه برای اولین بار در مدلسازی دیوارهای میخ کوبی شده استفاده شد و در مقایسه با نتایج حاصل از المان محدود مشاهده شد که عملکرد بسیار خوبی دارا می باشد به طوری که می تواند به عنوان یک روش جایگزین مناسب روش المان محدود در مدلسازی فصل مشترک نیل-خاک در حل معضلات تغییر شکل های نامتجانس المان فصل مشترک مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از مدل های رفتاری الاستو-پلاستیک جهت مدلسازی خاک و فصل مشترک جهت نزدیک کردن نتایج به واقعیت و مقایسه و نتیجه گیری بهتر توسط محققین در حال بررسی می باشد و در تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

۷. مراجع

1. Rabejac, S. and P. Toudic, Construction d'un mur de soutènement entre Versailles-Chantiers et Versailles-Matelots. Revue generale des chemins de fer, 1974. 93: p. 232-237.
2. Byrne, R., et al., Manual for design and construction monitoring of soil nail walls. 1996.
3. Zhou, Y., et al., Simplified Numerical Analysis of the Strengthening Effect of Soil Nails in a Loose Fill Slope. 2008.
4. Olia, A. and J. Liu, Numerical investigation of soil nail wall during construction.
5. Singh, V.P. and G.S. Babu, 2D numerical simulations of soil nail walls. Geotechnical and Geological Engineering, 2010. 28(4): p. 299-309.
6. Kim, J., J. Kim, and S. Lee, Analysis of soil nailed earth slope by discrete element method. Computers and Geotechnics, 1997. 20(1): p. 1-14.
7. Babu, G.S., B.S. Murthy, and A. Srinivas, Analysis of construction factors influencing the behaviour of soil-nailed earth retaining walls. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2002. 6(3): p. 137-143.
8. Lucy, L.B., A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. The astronomical journal, 1977. 82: p. 1013-1024.



9. Gingold, R. and J. Monaghan, Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 1982. 46(3): p. 429-453.
10. Nayroles, B., G. Touzot, and P. Villon, Generalizing the finite element method: diffuse approximation and diffuse elements. *Computational mechanics*, 1992. 10(5): p. 307-318.
11. Belytschko, T., Y.Y. Lu, and L. Gu, Element-free Galerkin methods. *International journal for numerical methods in engineering*, 1994. 37(2): p. 229-256.
12. Liu, W.K., S. Jun, and Y.F. Zhang, Reproducing kernel particle methods. *International journal for numerical methods in fluids*, 1995. 20(8-9): p. 1081-1106.
13. Liu, G.-R. and Y. Gu, A point interpolation method for two-dimensional solids. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001. 50(4): p. 937-951.
14. Duarte, C.A. and J.T. Oden, An adaptive method using clouds. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1996. 139(1): p. 237-262.
15. Melenk, J.M. and I. Babuška, The partition of unity finite element method: basic theory and applications. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1996. 139(1): p. 289-314.
16. Carpinteri, A., G. Ferro, and G. Ventura, The partition of unity quadrature in element-free crack modelling. *Computers & structures*, 2003. 81(18): p. 1783-1794.
17. Sulsky, D., S.-J. Zhou, and H.L. Schreyer, Application of a particle-in-cell method to solid mechanics. *Computer Physics Communications*, 1995. 87(1): p. 236-252.
18. Sulsky, D., Z. Chen, and H.L. Schreyer, A particle method for history-dependent materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994. 118(1): p. 179-196.
19. Onate, E., et al., A stabilized finite point method for analysis of fluid mechanics problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996. 139(1): p. 315-346.
20. Sukumar, N., The natural element method in solid mechanics. 1998, Northwestern University.
21. De, S. and K.-J. Bathe, The method of finite spheres with improved numerical integration. *Computers & Structures*, 2001. 79(22): p. 2183-2196.
22. Liu, G., A point assembly method for stress analysis for two-dimensional solids. *International journal of solids and structures*, 2002. 39(1): p. 261-276.
23. Liu, G., et al., A mesh-free minimum length method for 2-D problems. *Computational Mechanics*, 2006. 38(6): p. 533-550.
24. Liu, G.-R., Mesh free methods: moving beyond the finite element method. Vol. 712. 2009: CRC Press Boca Raton.
25. Binesh, S., N. Hataf, and A. Ghahramani, Elastic analysis of reinforced soils using point interpolation method. *IRANIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 2007. 31(B5): p. 577.