دانشکده مهندسی عمران

ارزیابی عددی رفتار دوبعدی و سه‌بعدی دیوارهای میخکوبی شده در کنج‌های بیرون زده

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک

محمدرضا نبی زاده شهربابک

استاد راهنما:

دکتر محسن صابرماهانی

آبان ماه ۱۳۹۵

دانشکده مهندسی عمران

ارزیابی عددی رفتار دوبعدی و سه‌بعدی دیوارهای میخکوبی شده در کنج‌های بیرون زده

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک

محمدرضا نبی زاده شهربابک

استاد راهنما:

دکتر محسن صابرماهانی

آبان ماه ۱۳۹۵


بسم الله الرحمن الرحيم

تأییدیه‌ی هیئت‌داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه

نام دانشکده: مهندسی عمران

نام دانشجو: محمدرضا نبی زاده شهربابک

عنوان پایان‌نامه: ارزیابی عددی رفتار دوبعدی و سه‌بعدی دیوارهای میخکوبی شده در کنج‌های بیرون زده

تاریخ دفاع: ۱۳۹۵/۰۸/۲۳

رشته: مهندسی عمران

گرایش: ژئوتکنیک

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	محسن صابرماهانی	استادیار	دانشگاه علم و صنعت ایران	
۲	استاد مدعو خارجی	مجید مرادی	استادیار	دانشگاه تهران	
۳	استاد مدعو داخلی	علیرضا سعیدی عزیز کندی	استادیار	دانشگاه علم و صنعت ایران	

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

بسمه‌تعالی

این‌جانب محمدرضا نبی زاده شهربابک به شماره دانشجویی ۹۳۶۸۵۱۴۲ دانشجوی رشته مهندسی عمران – گرایش ژئوتکنیک مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه حاصل کار این‌جانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی) با این‌جانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی این‌جانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تقدیم به ...

دانشجویانی که می‌مانند ....

مهندسانی که می‌سازند .....

فداکارانی که جان می‌دهند .....

و ....

بزرگ‌مردانی که جاودانه می‌شوند .....

تشکر و قدردانی از.....

پدرم که مرا بزرگواری آموخت....

مادرم که مرا گذشت آموخت.....

همسرم که مرا صبر آموخت.....

و استادم که مرا فروتنی آموخت....

عزیزانی اند که مرا خالصانه آموزش دادند که به این جایگاه برسم،

دست آنان را به گرمی می‌فشارم و قدردان زحمات آنان هستم.

از اســاتید بزرگوار آقایان دکتر مرادی و دکتر ســعیدی عزیزکندی که زحمت

داوری این پایان‌نامه را قبول کرده‌اند، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

چکیده

در عملیات گودبرداری یکی از پراهمیت‌ترین پارامترهای مؤثر بر پایداری کلی توده‌ی خاک و کارایی گود، میزان تغییرشکل‌های ناشی از احداث دیوار است. روش‌های مسلح سازی مختلفی جهت کاهش و کنترل تغییرشکل‌ها و ایجاد پایداری در برابر گسیختگی استفاده می‌شود، که یکی از مؤثرترین، مقرون‌به‌صرفه ترین و پرکاربردترین این روش‌ها، روش اجرای دیوار میخکوبی شده است. پیش‌بینی میزان تغییرشکل‌ها و طرح بهینه‌ی میخ‌خاک‌ها مسئله‌ی مهم و اساسی در فرآیند طراحی و تحلیل سیستم‌های دیوار میخکوبی شده است که توسط محققین زیادی مورد مطالعه و بررسی قرارگرفته است.

در تحلیل دیوارهای میخکوبی شده به علت زمان‌بر بودن تحلیل‌های سه‌بعدی اغلب این دیواره‌ها به‌صورت دوبعدی تحلیل می‌شوند و در اکثر اوقات نتایج تحلیل دوبعدی مقادیر محافظه‌کارانه‌تری را ارائه می‌دهد. اما محاسبه تغییر شکل های ایجاد شده در کنج‌های بیرون زده از این قاعده مستثنی است و باید تحلیل رفتار آن‌ها در فضای سه بعدی صورت گیرد. در تحقیق حاضر به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از تحلیل سه‌بعدی با نتایج حاصل از تحلیل ساده‌شده‌ی دوبعدی و فرض شرایط کرنش صفحه‌ای خواهد پرداخته خواهد شد. بدین منظور مدل‌های نرم‌افزاری با نرم‌افزارهای المان محدود Plaxis 2D و Plaxis 3D Foundation ساخته و پس از تحلیل، میزان تغییرشکل‌ها با یکدیگر مقایسه شده اند. در ساخت مدل های سه بعدی دو نوع چینش میخ‌خاک ارائه شده است: چینش متقاطع و چینش موازی با نیمساز کنج.

پس از اجرای تحلیل ها و بررسی خروجی ها مهم ترین نتیجه مشاهده شده این است که میزان تغییر شکل های افقی محور راس دیواره در حالت چینش موازی کمتر از حالت چینش متقاطع است. از طرفی تغییر شکل های عمود بر دیواره در حالت چینش موازی در محور میانه یال کنج بیرون زده بیشتر می باشند. به عنوان یک نتیجه کلی می توان این گونه برداشت کرد که چینش موازی در کنترل تغییر شکل های افقی کنج های بیرون زده می تواند عملکرد بهتری داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: کنج بیرون زده، تحلیل سه‌بعدی، تغییرشکل، دیوارهای میخکوبی شده، روش اجزاء محدود

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- ضرورت تحقیق ۲

۱-۳- اهمیت تحقیق ۳

۱-۴- هدف تحقیق ۶

۱-۵- روش تحقیق ۶

۱-۶- ساختار فصول ۷

فصل ۲: مروری بر منابع ۸

۲-۱- مقدمه ۹

۲-۲- سیستم میخکوبی ۹

۲-۳- اجزاء اصلی سیستم میخکوبی شده ۱۰

۲-۴- تحلیل و طراحی دیوار میخکوبی شده ۱۳

۲-۵- شکست دیوار میخکوبی شده ۱۵

۲-۶- تغییرشکل دیوار میخکوبی شده ۱۶

۲-۷- ضرایب پیشنهادی اطمینان درروش ASD ۱۸

۲-۸- مروری بر ادبیات موضوع ۱۹

۲-۸-۱- مطالعه بنیادی پک (۱۹۶۹) ۱۹

۲-۸-۲- گلدبرگ و همکاران (۱۹۷۶) ۲۰

۲-۸-۳- اوه و همکاران (۱۹۹۶) ۲۲

۲-۸-۴- اسمیت و سو (۱۹۹۷) ۲۳

۲-۸-۵- ژانگ و همکاران (۱۹۹۹) ۲۴

۲-۸-۶- بابو و همکاران (۲۰۰۲) ۲۶

۲-۸-۷- یانگ و دروم (۲۰۰۲) ۲۷

۲-۸-۸- لیما و همکاران (۲۰۰۳) ۲۹

۲-۸-۹- مطالعات صورت گرفته در رابطه با تعیین تغییرشکل‌ها ۳۱

۲-۸-۱۰- میتل (۲۰۰۶) ۳۷

۲-۸-۱۱- فن و لو (۲۰۰۸) ۳۹

۲-۸-۱۲- سینگ و بابو (۲۰۱۰) ۴۰

۲-۸-۱۳- ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) ۴۱

۲-۸-۱۴- کیم و همکاران (۲۰۱۳) ۴۱
۲-۸-۱۵- ژائو و همکاران (۲۰۱۴) ۴۴
۲-۸-۱۶- ژائو و همکاران (۲۰۱۶) ۴۵
۲-۹- نتیجه‌گیری ۴۶

فصل ۳: روش تحقیق و معرفی نرم‌افزار **۴۷**
۳-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲- نسخه دوبعدی نرم‌افزار Plaxis ۴۸
۳-۲-۱- المان Plate ۵۰
۳-۲-۲- المان ژئوگرید ۵۳
۳-۲-۳- المان Interface ۵۴
۳-۲-۴- شرایط مرزی و مدل رفتاری ۵۶
۳-۳- مدل موهر – کولمب ۵۷
۳-۳-۲- رفتار الاستیک کاملاً پلاستیک ۵۸
۳-۳-۳- فرمول‌بندی مدل موهر – کولمب ۶۱
۳-۴- مدل رفتاری خاک سخت شونده ۶۲
۳-۵- محاسبه تنش برجا در نرم‌افزار Plaxis ۶۷
۳-۶- نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار Plaxis ۶۷
۳-۶-۱- المان سازه ای تیر ۶۸
۳-۶-۲- المان سازه ای دیوار ۶۹
۳-۶-۳- شرایط مرزی ۷۱
۳-۶-۴- المان تماسی (Interface) ۷۱
۳-۶-۵- مدل رفتاری و انواع تحلیل ۷۲
۳-۷- اعتبار سنجی نسخه دوبعدی و سه‌بعدی نرم افزار Plaxis ۷۲
۳-۷-۱- اعتبار سنجی نسخه دوبعدی نرم‌افزار ۷۲
۳-۷-۲- پروژه گودبرداری مرکز تجاری استانبول ترکیه ۷۲
۳-۷-۳- اعتبار سنجی نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار Plaxis بوسیله نسخه دو بعدی ۷۷
۳-۸- برنامه و روش تحقیق مدل‌سازی ۷۹
۳-۹- جمع‌بندی ۸۱

فصل ۴: مدل‌سازی عددی، ارائه و تحلیل نتایج **۸۲**
۴-۱- مقدمه ۸۳

۴-۲- معرفی مدل و پارامترهای مقاومتی خاک و سایر مصالح..... ۸۴
۴-۲-۱- پارامترهای مقاومتی خاک..... ۸۴
۴-۲-۲- خصوصیات مقاومتی مسلح کننده‌ها و پوشش شاتکریت..... ۸۵
۴-۳- گام اول: تعیین آرایش بهینه میخ‌خاک‌ها و محاسبه ضریب اطمینان پایداری توسط نرم‌افزار GeoSlope..... ۸۷
۴-۴- گام دوم: تحلیل کرنش صفحه‌ای دیوار در نرم‌افزار Plaxis2D..... ۸۸
۴-۵- گام سوم: تحلیل سه‌بعدی رفتار دیوار و مطالعه پارامتریک هندسی در نرم‌افزار Plaxis3D Foundation..... ۹۰
۴-۵-۱- شرایط اولیه و توضیح شرایط مدل..... ۹۱
۴-۵-۱- گام اول مدل‌سازی‌های سه‌بعدی : تعیین فواصل همسایگی‌ها در مدل سه‌بعدی.... ۹۴
۴-۵-۲- گام دوم مدل‌سازی‌های سه‌بعدی : ایجاد مدل‌های اولیه دوبعدی و کنج بیرون زده سه‌بعدی و مطالعه ماهیت تحلیل سه‌بعدی..... ۱۰۰
۴-۵-۳- گام سوم مدل‌سازی‌های سه‌بعدی : ایجاد مدل‌های اولیه کنج بیرون زده سه‌بعدی و مطالعه ماهیت تحلیل سه‌بعدی..... ۱۰۸

فصل ۵: جمع‌بندی و پیشنهادها **۱۱۹**

۵-۱- مقدمه..... ۱۲۰
۵-۱-۱- جمع‌بندی..... ۱۲۰
۵-۱-۲- پیشنهادها جهت مطالعات آتی..... ۱۲۲

مراجع **۱۲۳**

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) پلان گودبرداری مجتمع تجاری اداری ساحل..... ۴
شکل (۱-۲) ترک‌های ایجادشده در کنج محدب شماره ۱..... ۴
شکل (۱-۳) ترک‌های ایجادشده در کنج محدب شماره ۲..... ۵
شکل (۲-۱) اجزاء تشکیل‌دهنده دیوارهای میخکوبی شده [۳]..... ۱۲
شکل (۲-۲) سطوح احتمالی گسیختگی و نیروی کششی میخ‌خاک [۳]..... ۱۴
شکل (۲-۳) سطح گسیختگی بحرانی در حین مراحل ساخت [۳]..... ۱۴
شکل (۲-۴) حالات کلی گسیختگی دیوار میخکوبی شده [۳]..... ۱۶
شکل (۲-۵) تغییرشکل دیوار میخکوبی شده [۳]..... ۱۸
شکل (۲-۶) حالت‌های کلی تغییرشکل دیوار کاملاً صلب [۵]..... ۲۱
شکل (۲-۷) حالت‌های کلی تغییرشکل دیوار منعطف [۵]..... ۲۱
شکل (۲-۸) هندسه کنج مدل شده توسط اوه و همکاران [۶]..... ۲۲
شکل (۲-۹) دیوار میخکوبی شده سه‌بعدی با انحنا در پلان [۷]..... ۲۳
شکل (۲-۱۰) مقطع یک متری دیوار میخکوبی شده جهت تحلیل سهبعدی [۷]..... ۲۴
شکل (۲-۱۱) مقطع سهبعدی دیوار میخکوبی شده [۸]..... ۲۵
شکل (۲-۱۲) پروفیل تغییرشکل افقی و نشست در عمق دیوار میخکوبی شده [۸]..... ۲۵
شکل (۲-۱۳) تغییرشکل افقی در خاک درروش اول و دوم [۹]..... ۲۶
شکل (۲-۱۴) توزیع نیروی محوری در طول میخ خاک الف) اتصال صلب بین میخ خاک و پوشش ب) بدون اتصال[۹]..... ۲۷
شکل (۲-۱۵) ناحیه گسیخته شده تحت شرایط الف). بارگزاری در شرایط بهرهبرداری ب). سربار 90KNm2 [۱۰]..... ۲۸
شکل (۲-۱۶) پارامتر هندسی و شرایط مرزی [۱۳]..... ۲۹
شکل (۲-۱۷) تغییرشکل جانبی دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۵ متر با طول میخ خاک و فاصله قائم متفاوت [۱۳]..... ۳۰
شکل (۲-۱۸) تغییرشکل جانبی دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۱۰ متر با طول میخ خاک و فاصله قائم متفاوت [۱۳]..... ۳۰
شکل (۲-۱۹) انواع پروفیل نشست سطح زمین [۱۵]..... ۳۲

شکل (۲-۲۰) شکل پروفیل نشست نوع اسپاندرلی [۱۵]..... ۳۳
شکل (۲-۲۱) روش پیشنهادی برای پیش‌بینی نشست مقعر [۱۵]..... ۳۳
شکل (۲-۲۲) منحنی هم‌تراز جابجایی جانبی سطح زمین در مرحله ۶ گودبرداری [۱۷]..... ۳۴
شکل (۲-۲۳) منحنی هم‌تراز نشست سطح زمین در مرحله ۶ گودبرداری [۱۷]..... ۳۵
شکل (۲-۲۴) پارامترهای تناسبی حاصل از تابع خطای مکمل δVERT نشست و جابجایی جانبی δHORZ گود [۱۷]..... ۳۶
شکل (۲-۲۵) رابطه بین تغییرشکل جانبی و نشست بیشینه سطح زمین [۱۵]..... ۳۷
شکل (۲-۲۶) دیوار میخکوبی شده به همراه تمامی نیروهای محرک و مقاوم [۲۰]..... ۳۸
شکل (۲-۲۷) شکل شماتیک توزیع طولی میخ خاک در دیوار میخکوبی شده: الف) توزیع یکنواخت ب) کاهش طول میخ خاک با عمق پ) افزایش طول میخ خاک با عمق [۲۱]..... ۳۹
شکل (۲-۲۸) تأثیر زاویه نفوذ میخ خاک بر روی ضریب اطمینان شیروانی میخکوبی شده با خاک‌ریز افقی [۲۱]..... ۴۰
شکل (۲-۲۹) مقطع عرضی شیروانی میخکوبی شده [۲۸]..... ۴۲
شکل (۲-۳۰) نمای ایزومتریک شیروانی میخکوبی شده [۲۸]..... ۴۳
شکل (۲-۳۱) مقایسه سطح گسیختگی بحرانی در شیروانی میخکوبی شده الف) تزریق تحت وزن ب) تزریق تحت‌فشار [۲۸]..... ۴۳
شکل (۲-۳۲) مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در سه حالت غیرمسلح، تزریق تحت وزن و تزریق تحت‌فشار [۲۸]..... ۴۴
شکل (۲-۳۳) مش بندی هندسه مدل‌سازی شده توسط ژائو و همکاران [۳۴]..... ۴۵
شکل (۳-۱) نمونهای از مسائل کرنش صفحهای و تقارن محوری..... ۴۹
شکل (۳-۲) محل گره ها و نقاط تنش در المان خاک [۳۶]..... ۵۰
شکل (۳-۳) کاربردهایی از المان Plate و انکر و سطح تماسی در برنامه Plaxis2D [۳۶]..... ۵۱
شکل (۳-۴) مقطع شماتیک میخ خاک [۳۸]..... ۵۲
شکل (۳-۵) گره ها و نقاط تنش در المان تیر ۵ گره و ۳ گره [۳۶]..... ۵۳
شکل (۳-۶) کاربردهایی از المان Geogrid [۳۶]..... ۵۴
شکل (۳-۷) گره ها و نقاط تنش در المان Geogrid ۵ گره و ۳ گره..... ۵۴
شکل (۳-۸) گره ها و نقاط تنش در المان سطح تماس و نحوه اتصال آن به المان خاک [۳۶]..... ۵۵
شکل (۳-۹) سطوح تسلیم موهرکولمب در فضای تنشهای اصلی (c=0) [۳۶]..... ۶۰

شکل (۳-۱۰) $E50$ و $E0$ حاصل از نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده [۳۶] ۶۱
شکل (۳-۱۱) مکان هندسی سطوح گسیختگی مقادیر مختلف پارامتر سخت‌شوندگی γp در مدل رفتاری HS ۶۳
شکل (۳-۱۲) رابطه هایپربولیک تنش-کرنش در بارگزاری اولیه آزمایش سه محوری زهکشی شده [۳۵] ۶۴
شکل (۳-۱۳) سطح گسیختگی مدل رفتاری HS در صفحه $p-q$ [۳۶] ۶۵
شکل (۳-۱۴) تعیین $Eoedref$ از نتایج آزمایش اودومتری [۳۶] ۶۶
شکل (۳-۱۵) سیستم مختصات و مثالی از سطوح تعریف و جهت مثبت تنش‌ها [۴۱] ۶۸
شکل (۳-۱۶) محل گره ها و نقاط تنش در المان ۱۵ گره گوشه [۴۱] ۶۸
شکل (۳-۱۷) ممان اینرسی I، گشتاور خمشی مثبت M، انحنای مثبت k و سختی E در المان تیر در مختصات محلی [۴۱] ۶۹
شکل (۳-۱۸) محورهای محلی و جهت گشتاور خمشی در المان دیوار [۴۱] ۷۰
شکل (۳-۱۹) محورهای محلی و جهت نیروی محوری در المان دیوار [۴۱] ۷۰
شکل (۳-۲۰) پلان گودبرداری و محل استقرار انحراف سنج شماره ۹ [۴۳] ۷۳
شکل (۳-۲۱) نمای شماتیک مقطع دیوار میخکوبی شده در محل استقرار انحراف سنج شماره ۹ [۴۲] ۷۴
شکل (۳-۲۲) هندسه مدل دیوار میخکوبی شده در برنامه Plaxis 2D ۷۵
شکل (۳-۲۳) کانتور تغییرشکل افقی در پایان تحلیل ۷۶
شکل (۳-۲۴) مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی در Plaxis 2D و نتایج مانیتورینگ ۷۶
شکل (۳-۲۵) مقایسه تغییرشکل دیوار سه‌بعدی طویل و دوبعدی با ارتفاع های ۸ و ۱۶ متر [۳۸] ۷۸
شکل (۳-۲۶) شمای کلی ایده اولیه مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار Plaxis3D ۸۰
شکل (۳-۲۷) نشانه‌گذاری ابعاد تأثیرگذار بر ایجاد اثرات مرزی بر مدل سه‌بعدی ۸۱
شکل (۴-۱) مقطع ایده آل میخ‌خاک [۳۸] ۸۵
شکل (۴-۲) سطح لغزش بحرانی در دیوار به ارتفاع ۱۰ متری محاسبه‌شده در نرم‌افزار GeoSlope. ۸۸
شکل (۴-۳) گام‌های خاک‌برداری در مدل دوبعدی ساخته‌شده در نرم‌افزار ۸۸
شکل (۴-۴) نمودار تغییرات مقادیر تغییرشکل افقی دوبعدی دیوار میخکوبی شده نسبت به تغییرات خصوصیات مقاومتی خاک ۸۹

شکل (۴-۵) نمودار تغییرات مقادیر نشست دوبعدی سطح بالای دیواره میخکوبی شده نسبت به تغییرات خصوصیات مقاومتی خاک ۹۰
شکل (۴-۶) محورهای مختصاتی x، y و z در مدل ساخته‌شده ۹۱
شکل (۴-۷) نقاط مهم پرتکرار در طول ارائه نتایج تحقیق ۹۲
شکل (۴-۸) محورهای موردمطالعه در بررسی تغییرشکل‌های افقی ۹۳
شکل (۴-۹) محورهای نشان داده‌شده بالا و پایین‌دیواره موردمطالعه جهت بررسی تغییرشکل‌های قائم ۹۴
شکل (۴-۱۰) نقاط مشخص‌شده جهت بررسی اثر ابعاد همسایگی بر تغییرشکل‌های مدل ۹۵
شکل (۴-۱۱) تأثیر افزایش طول بعد B بر تغییرشکل‌های افقی نقاط مشخص‌شده در کنج بیرون زده ۹۶
شکل (۴-۱۲) تأثیر افزایش طول بعد D بر تغییرشکل‌های افقی نقاط مشخص‌شده در کنج بیرون زده ۹۷
شکل (۴-۱۳) تأثیر افزایش طول بعد C بر تغییرشکل‌های افقی نقاط مشخص‌شده در کنج بیرون زده ۹۸
شکل (۴-۱۴) تأثیر افزایش طول بعد E بر تغییرشکل‌های افقی نقاط مشخص‌شده در کنج بیرون زده ۹۹
شکل (۴-۱۵) چینش متقاطع میخ‌خاک‌ها ۱۰۱
شکل (۴-۱۶) چینش موازی با نیم ساز میخ‌خاک‌ها ۱۰۱
شکل (۴-۱۷) بعد A در مدل‌سازی کنج بیرون زده ۱۰۲
شکل (۴-۱۸) حالات ایجادشده در آرایش متقاطع میخ‌خاک‌ها ۱۰۳
شکل (۴-۱۹) حالات ایجادشده در آرایش موازی نیم ساز میخ‌خاک‌ها ۱۰۳
شکل (۴-۲۰) فرم تغییرشکل یافته دیوار باحالت چینش متقاطع ۱۰۴
شکل (۴-۲۱) میزان برش ایجادشده در پوشش شاتکریت ۱۰۴
شکل (۴-۲۲) دیاگرام مقاومت فشاری و کششی الاستو پلاستیک پوشش شاتکریت ۱۰۶
شکل (۴-۲۳) دیاگرام مقاومت برشی الاستو پلاستیک پوشش شاتکریت ۱۰۷
شکل (۴-۲۴) دیاگرام مقاومت خمشی الاستو پلاستیک پوشش شاتکریت ۱۰۷
شکل (۴-۲۵) آرایش دوبعدی عمود بر دیواره(2D-PDD) (نماینده چینش متقاطع) ۱۰۸
شکل (۴-۲۶) آرایش دوبعدی زاویه‌دار با دیواره(2D-PRR) (نماینده چینش موازی نیمساز) ۱۰۸

شکل (۴-۲۷) تغییرشکل افقی ایجادشده در نقطه بالایی محور رأس کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع..... ۱۰۹
شکل (۴-۲۸) تغییرشکل افقی ایجادشده بیشینه محور رأس کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع ۱۰۹
شکل (۴-۲۹) تغییرشکل‌های ایجادشده افقی در کنج بیرون زده در دو حالت چینش، (A) چینش موازی و (B) چینش متقاطع..... ۱۱۰
شکل (۴-۳۰) تمایل به بازشدگی مدل در حالت چینش موازی..... ۱۱۰
شکل (۴-۳۱) تغییرشکل افقی ایجادشده نقطه بالایی محور میانه یال کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع..... ۱۱۱
شکل (۴-۳۲) تغییرشکل افقی ایجادشده بیشینه محور میانه یال کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع..... ۱۱۲
شکل (۴-۳۳) تغییرشکل افقی ایجادشده نقطه بالایی محور انتهای یال کنج بیرون زده در حالت چینش موازی و چینش متقاطع..... ۱۱۲
شکل (۴-۳۴) تغییرشکل افقی ایجادشده بیشینه محور انتهای یال کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع..... ۱۱۳
شکل (۴-۳۵) میزان تغییرشکل قائم نقطه رأس بالایی با دو چینش موازی و متقاطع..... ۱۱۳
شکل (۴-۳۶) میزان تغییرشکل قائم نقطه انتهای یال کنج بیرون زده با دو چینش موازی و متقاطع. ۱۱۴
شکل (۴-۳۷) توصیه اولریچ و همکاران به عدم استفاده از چینش متقاطع در کنج‌های بیرون زده [۴۵]. ۱۱۵
شکل (۴-۳۸) پیشنهاد بور لند و همکاران برای زاویه صحیح اجرای مهاری‌ها جهت افزایش پایداری بیشتر کنج‌های بیرون زده [۴۶]..... ۱۱۶
شکل (۴-۳۹) اشاره به زاویه تمایل میخ جهت بیشینه شدن طول گیرداری آن [۴۸]. ۱۱۷
شکل (۴-۴۰) گوه‌ایجادشده در کنج در حالت چینش متقاطع که با بررسی نیروهای برشی موجود در پوشش شاتکریت تصویر شده است..... ۱۱۸
شکل (۴-۴۱) گوه‌ایجادشده در کنج در حالت چینش موازی که با بررسی نیروهای برشی موجود در پوشش شاتکریت تصویر شده است..... ۱۱۸

فهرست جداول

جدول (۲-۱) مقادیر δhHi و C بر اساس شرایط خاک [۳]..... ۱۷
جدول (۲-۲) حداقل ضرایب پیشنهادی برای طراحی دیوار میخکوبی شده به روش ASD [۳]..... ۱۹
جدول (۳-۱) پارامترهای اساسی برای تعریف مدل رفتاری موهرکولمب..... ۶۰
جدول (۳-۲) مشخصات خاک مطالعه دورگونوقلو و همکاران [۴۲]..... ۷۴
جدول (۳-۳) مشخصات میخخاک..... ۷۵
جدول (۳-۴) مشخصات پوشش شاتکریت..... ۷۵
جدول (۴-۱) مشخصات خاک جهت تعریف مدل رفتاری موهر – کولمب و خاک سخت شونده (HS)..... ۸۴
جدول (۴-۲) مشخصات مقاومتی میخ‌خاک (به‌صورت معادل بین میخ و دوغاب تزریقی محاسبه‌شده است)..... ۸۶
جدول (۴-۳) مشخصات مقاومتی پوشش شاتکریت (به‌صورت معادل بین مش فولادی و بتن پاششی محاسبه‌شده است)..... ۸۶

فهرست علائم اختصاری

جابجایی افقی تاج دیواره ..... $(m)\ \delta_h$

جابجایی قائم تاج دیواره ..... $(m)\ \delta_v$

زاویه اصطکاک داخلی ..... $(\text{درجه})\ \varphi$

زاویه اصطکاک خاک ..... $(\text{درجه})\ \varphi_{Soil}$

زاویه اصطکاک سطح تماس ..... $(\text{درجه})\ \varphi_{Inter}$

زاویه اتساع ..... $(\text{درجه})\ \psi$

ضریب پواسون ..... $(\text{بی‌بعد})\ \upsilon$

تنش کل ..... $(kN/m^2)\ \sigma$

تنش مؤثر ..... $(kN/m^2)\ \sigma'$

کرنش ..... $(\text{بی‌بعد})\ \varepsilon$

نرخ کرنش ..... $(\text{بی‌بعد})\ \dot{\varepsilon}$

کرنش پلاستیک ..... $(\text{بی‌بعد})\ \varepsilon^P$

نرخ کرنش پلاستیک ..... $(\text{بی‌بعد})\ \dot{\varepsilon^P}$

وزن مخصوص ..... $(kN/m^3)\ \gamma$

زاویه خوابیدگی دیوار ..... $(\text{درجه})\ \alpha$

مساحت مقطع میخ‌خاک ..... $(m^2)\ A$

مساحت میلگرد تسلیح کننده ..... $(m^2)\ A_S$

مساحت دوغاب میخ‌خاک ..... $(m^2)\ A_G$

فاصله دیوار از مرز مدل ..... $(m)\ B_e$

چسبندگی ..... $(kN/m^2)\ C$

چسبندگی خاک ..... $(kN/m^2)\ C_{Soil}$

چسبندگی سطح تماس ..... $(kN/m^2)\ C_{Inter}$

فاصله افقی پشت دیوار ..... $(m)\ D_{DEF}$

قطر مؤثر گمانه میخ‌خاک ..... $(m)\ D_{DH}$

قطر میلگرد تسلیح کننده ..... $(m)\ d$

مدول الاستیسیته میلگرد ..... $(Gpa)\ E_S$

مدول الاستیسیته دوغاب ..... $(Gpa)\ E_G$

مدول الاستیسیته بتن پاششی ..... $(Gpa)\ E_{Sh}$

مدول الاستیسیته معادل ..... $(Gpa)\ E_{eq}$

مدول الاستیسیته خاک ..... $(Gpa)\ E$

مدول الاستیسیته ابتدایی ..... $(Gpa)\ E_0$
مدول الاستیسیته اولیه ..... $(Gpa)\ E_i$
مدول الاستیسیته مماسی ..... $(Gpa)\ E_{50}$
مدول الاستیسیته اودومتری ..... $(Gpa)\ E_{oed}$
مدول الاستیسیته مرجع ..... $(Gpa)\ E_{50}^{ref}$
مدول الاستیسیته اودومتری مرجع ..... $(Gpa)\ E_{50}^{oed}$
مدول الاستیسیته باربرداری - بارگزاری ..... $(Gpa)\ E_{50}^{ur}$
ضریب اطمینان ..... (بی‌بعد) FS
ارتفاع دیوار ..... $(m)\ H$
ممان اینرسی ..... $(m^4)\ I$
ضریب فشار جانبی در حالت سکون خاک ..... (بی‌بعد) K_0
پارامتر میزان وابستگی به تنش ..... (بی‌بعد) m
تنش مؤثر متوسط ..... $(N/m^2)\ p'$
فشار محصورکننده مرجع ..... $(N/m^2)\ p_{ref}$
تنش برشی انحرافی ..... $(N/m^2)\ q$
تنش مجانب مقاومت برشی ..... $(N/m^2)\ q_a$
تنش انحرافی نهایی ..... $(N/m^2)\ q_f$
ضریب سطح تماس ..... (بی‌بعد) R_{Inter}
نسبت $\frac{q_f}{q_a}$ ..... (بی‌بعد) R_{ref}
فاصله افقی مرکز به مرکز میخ‌ها ..... $(m)\ S_h$
فاصله قائم مرکز به مرکز میخ‌ها ..... $(m)\ S_v$

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

روش میخکوبی خاک[۱] اولین بار در سال ۱۹۷۲ در فرانسه در محلی نزدیک باغ ورسایلز[۲] مورد استفاده قرار گرفت و از آن پس به علت مزایای اقتصادی و اجرایی موردتوجه قرار گرفت به‌نحوی که امروزه استفاده از این روش در سراسر دنیا مرسوم شده است [۱]. به دنبال گستردگی استفاده از این روش محققان و صنعتگران فعال در این زمینه مطالعات وسیعی را در دستور کار قراردادند و مؤسسات علمی و پژوهشی معتبری در کشورهای توسعه‌یافته اقدام به جمع‌بندی نتایج این مطالعات و بررسی سازمان‌یافته این روش پرداختند. در خلال این مطالعات بررسی رفتار کلی و مخصوصاً میزان تغییرشکل این دیواره‌ها اهمیت بویژه‌ای دارد.

۱-۲- ضرورت تحقیق

امروزه با پیشرفت علوم محاسباتی رایانه‌ای و توسعه روش‌های محاسباتی مکانیکی ازجمله روش اجزاء محدود، محققین قادر شده‌اند که به تحلیل جوانب مختلف مسائل ژئوتکنیکی و مخصوصاً رفتار دیوارهای میخکوبی شده بپردازند. از اهداف مهم این تحلیل‌ها بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی در مطالعات و بررسی آن است. طبعاً به علت پیچیده بودن ماهیت مدل‌سازی و مطالعه رفتار دیوارهای میخکوبی شده، روش‌ها و فرضیات مختلفی جهت ساده‌سازی این مسائل استفاده‌شده که صحت سنجی این فرضیات از مسائل مهم و موردتوجه محققین است. یکی از مهم‌ترین این فرضیات که در تحلیل رفتار دیوارهای میخکوبی شده کاربرد زیادی نیز دارد، فرضیه کرنش صفحه‌ای در نظر گرفتن رفتار این دیواره‌هاست. این فرضیه می‌تواند یک مدل پیچیده سه‌بعدی را به مدل‌های دوبعدی ولی کرنش صفحه‌ای تبدیل کند که تحلیل آن‌ها چه از لحاظ زمانی و چه از لحاظ کاربردی به‌اندازه‌ای آسان بوده که تاکنون موردا ستفاده زیادی قرارگرفته‌اند. این فرضیه در مواردی صحت و اعتبار خود را از دست می‌دهد. اولاً این فرضیه الزاماً بیان‌کننده شرایط واقعی سازه نخواهد

[۱] Soil Nailing

[۲] Versailles

بود چون اساس بحث اندرکنش خاک و میخ‌خاک[1] ماهیتی سه‌بعدی دارد. دوماً روش تحلیل کرنش صفحه‌ای همان‌گونه که در تعریف آن بیان‌شده است، مواقعی کاربرد خواهد داشت که طول بعد سوم (عمود بر صفحه) در مقایسه با طول دو بعد دیگر آن‌قدر طویل باشد و متعاقباً کرنش‌های بعد سوم (عمود بر صفحه) نیز در مقایسه با کرنش های دو بعد دیگر آن‌قدر ناچیز باشند که بتوان اثر آن را نادیده گرفت. پس نتیجه می شود که در سازه‌هایی که شرط بالا را ندارند و یا نامنظمی‌های هندسی دارند (نظیر کنج‌ها، بیرون‌زدگی‌ها و گوشه‌ها) این فرضیه کاربردی نداشته و لزوم بررسی سه‌بعدی این نوع از سازه‌های سیستم میخکوبی خاک احساس می شود.

۱-۳- اهمیت تحقیق

در مورد گودبرداری‌هایی که در مناطق شهری و پرتراکم صورت می‌پذیرد یک نگرانی اساسی وجود دارد آن‌هم میزان تغییرشکل افقی و قائم (نشست سطح زمین) گود است. چراکه در صورت ایجاد و گسترش بیش‌ازحد این تغییرشکل‌ها، سازه‌های مجاور دچار مشکلات جدی سرویس‌دهی و یا حتی ایرادات اساسی ایمنی می‌شوند. بعنوان مثال در پروژه تجاری ساحل واقع در منطقه ۲۲ تهران، ضلع شمالی دریاچه مصنوعی خلیج‌فارس، گودی به عمق ۳۶ متر و با هندسه‌ی نامنظم و دارای دو کنج محدب با زاویه ۱۲۰ درجه ایجادشده است. دیواره های این گود با استفاده از سیستم ترکیبی میخکوبی و مهار گذاری به‌وسیله استرند به همراه شمع های نگهبان[2] در ردیف‌های فوقانی پایدار شده اند. روند اجرای این پروژه پس از رسیدن به مراحل پایانی اجرای سازه نگهبان و جمع‌آوری رمپ به دلایل مالی و حقوقی متوقف شد و اکنون پس از گذشت یک سال از توقف اجرا و عدم تکمیل پروژه، میزان تغییرشکل‌های ایجادشده در کنج‌های محدب به‌گونه‌ای است که لایه بتن پاششی رویه دیوار در محل اتصال دو یال کنج به یکدیگر گسیخته شده و ایمن بودن سازه نگهبان را زیر سؤال برده است. شکل (۱-۱) نشان‌دهنده پلان گودبرداری و دو کنج محدب با زاویه ۱۲۰ درجه آن است. در تصاویرشکل (۱-۲) و شکل (۱-۳) نیز به ترتیب ترک‌های غیرمتعارف ایجادشده در کنج شماره ۱ و ۲ نشان داده‌شده‌اند.

[1] Soil Nail

[2] Soldier Pile



شکل (۱-۱) پلان گودبرداری مجتمع تجاری اداری ساحل



شکل (۱-۲) ترک‌های ایجادشده در کنج محدب شماره ۱



شکل (۱-۳) ترک‌های ایجادشده در کنج محدب شماره ۲

ایجاد هندســـه‌های نامنظم دارای کنج‌های محدب و مقعر در پروژه های گودبرداری به دلیل وجود محدودیت‌های هندســـی و معماری اجتناب‌ناپذیر اســـت لذا می‌بایســـت با تحلیل‌های دقیق میزان تغییرشکل‌های تمامی نواحی این گودبرداری‌ها را تخمین زد. از طرفی به این نکته باید توجه داشت که محاسبه تغییرشکل‌ها در حالت کرنش صفحه‌ای باعث می شود که تغییرشکل‌های بدست آمده بیشـــتر یا کم‌تر از مقدار واقعی آن‌ها باشـــد که این موضـــوع موجب ارائه طرح‌های پایدارســـازی محافظه‌کارانه و غیراقتصادی یا غیر ایمن می‌شود. با شرایط ذکرشده لزوم ایجاد و اجرای تحلیل‌های ســـه‌بعدی احســـاس می‌شـــود. چراکه این تحلیل‌ها با در نظر گرفتن هندســـه‌ی واقعی گود، شـــرایط مرزی سه‌بعدی و اثرات محدودکننده دیوارهای هم‌جوار، نتایجی نزدیک به واقعیت را ارائه می‌کنند و اهمیت این مطالعه ازآنجا آ شکار می شود که در آن به مقایسه تغییر شکل‌های حالت دوبعدی و سه‌بعدی (نزدیک به واقعیت) پرداخته‌شده است.

۱-٤- هدف تحقیق

هدف این تحقیق مقایسه تغییرشکل‌های تحلیل دقیق سه‌بعدی با تغییرشکل‌های تحلیل ساده‌شده کرنش مسطح دوبعدی در کنج های بیرون زده می باشد. بدین منظور تغییرشکل های دیوار میخکوبی شده که شامل یک کنج بیرون زده با طول یال متغیر و چیدمان میخ‌خاک متغییر است با تغییرشکل‌های تحلیل دوبعدی دیوار معادل این دیوارها مقایسه شده است.

۱-۵- روش تحقیق

نرم‌افزارهای تعادل حدی، المان محدود و تفاضل محدود گسترده‌ترین نرم‌افزارهای مورد استفاده جهت تحلیل عددی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری سیستم دیوارهای میخکوبی شده‌اند. روش‌های تعادل حدی همچون Davis، Multicriteria، Kinematical، Cardiff،Yield و آلمانی سعی کرده‌اند تا از پیچیدگی‌های سیستم میخکوبی شده بکاهند و پارامترهای ا سا سی‌تر را مورد ارزیابی قرار دهند [۲]. با پیشرفت علوم و محا سبات مکانیک جامدات الگوریتم‌های پیشرفته‌ای برای محا سبات با در نظر گرفتن جزئیات دقیق سیستم میخکوبی توسعه یافت. حاصل این الگوریتم‌ها، نرم‌افزارهای ارائه شده در روش المان محدود و تفاضل محدود است. استفاده از این نرم‌افزارها به علت دقت بالا و در نظر گرفتن جوانب حداکثری در تحلیل سیستم دیوار میخکوبی شده، افزایش روزافزون دارد.

طبق مدل‌سازی‌های برخی از محققان پیشین، ابتدا طرح بهینه میخ‌خاک ها بوسیله نرم‌افزار تعادل حدی GeoSlope تعیین می شود و سپس مدل‌سازی کرنش مسطح با نرم‌افزار Plaxis2D و مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار Plaxis3D Foundation نسخه ۱,۶ صورت می گیرد. درنهایت پس از مدل‌سازی‌ها به بررسی شرایط مرزی و کنج‌های بیرون زده پرداخته می شود.

۱-٦- ساختار فصول

مطالب بررسی‌شده در این تحقیق در پنج فصل دسته‌بندی و ارائه‌شده‌اند :

فصل اول : که فصل جاری است و در آن به معرفی اولیه ضرورت تحقیق و اهداف آن پرداخته شده است.

فصل دوم : در این فصل طبق رویه حاکم بر تمام مطالعات علمی به بررسی مجموعه‌ای از مقالات، تحقیقات و مطالعات سایر دانشمندان در زمینه‌ی مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی دیوارهای میخکوبی شده پرداخته‌شده است. مرور بر ادبیات فنی موجود می‌تواند به جهت‌دهی موضوع تحقیق حاضر کمک فراوانی کند. هندسه مدل‌سازی شده در تحقیق پیش رو، هندسه‌ای جدید بوده و بررسی رفتار آن در ادبیات فنی موجود تاکنون صورت نپذیرفته است.

فصل سوم : در این فصل به بررسی ویژگی‌های مصالح و المان‌ها و مقادیر انتخاب شده برای آن‌ها پرداخته‌شده است. شناخت این ویژگی‌ها و انتخاب صحیح مقادیر آن‌ها می‌تواند ابزاری مهم و راهگشا جهت رسیدن به نتایج معتبر و نزدیک به واقعیت باشد.

فصل چهارم : بدنه‌ی اصلی تحقیق در این فصل ارائه شده است که در خلال آن دیواری به ارتفاع ۱۰ متر و طول همسایگی، چیدمان و طول یال مختلف موردبررسی قرارگرفته که نتایج تحلیل‌ها در این فصل به تفضیل ارائه‌شده است.

فصل پنجم : در این فصل نیز تمام نتایج حاصله مورد جمع‌بندی قرارگرفته است و پس از جمع بندی و نتیجه گیری، پیشنهاداتی جهت مطالعات آتی ارائه شده است.

فصل ۲:

مروری بر منابع

۲-۱- مقدمه

مسئله خیلی ساده است، امروزه ساخت‌وسازها با محدودیت‌های جدی روبرو هستند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به گرانی زمین، محدودیت در مرتفع سازی و رشد روزافزون تعداد خودروها اشاره کرد. در چنین فضایی ایجاد گودبرداری‌های عمیق با هندسه‌هایی جدید، راهکاری مناسب جهت افزایش فضای مفید سازه‌ها است. ایجاد گودبرداری‌های عمیق نیاز به شناخت دقیق تر رفتار سازه‌های نگهبان خاک را روشن می سازد. در این میان ارزیابی پایداری گودها و میزان تغییر شکل آن‌ها مهم‌ترین مسئله در ارزیابی رفتار گودبرداری‌ها است که سیستم‌های مختلف نگهبان خاک هرکدام توانسته‌اند نقشی را در برآورده کردن مسائل بالا ایفا کنند. در سال‌های اخیر سیستم میخکوبی خاک به‌عنوان یک روش اقتصادی پایدار سازی گودها توانسته است به‌خوبی نقش ایجاد گودهای ایمن را با رعایت ملاحظات تغییرشکلی ایفا کند. اما باید همیشه این نکته را در نظر داشت که قبل از اجرای یک روش خاص می‌توان مزایا و معایب اجرای سایر روش‌های سازه نگهبان خاک را با توجه به شرایط محل ازجمله جنس خاک، ابعاد و عمق گودبرداری، شرایط بارگزاری، سطح آب زیرزمینی و موقعیت گود بررسی نمود.

۲-۲- سیستم میخکوبی

میخکوبی خاک یک روش تسلیح درجا است که در آن از المان‌های مسلح کننده عموماً فلزی و از نوع میلگردهای معمولی و یا میله‌های توخالی استفاده می‌شود. برای اینکه سیستم میخکوبی بتواند عملکرد خود را به‌درستی آغاز نماید بایستی خاک مقداری تغییر مکان جانبی داشته باشد که با ایجاد اصطکاک جانبی بین میخ‌خاک و خاک باعث بسیج شدن کامل نیروی کششی المان میخ‌خاک گردد.

در ادبیات فنی و تخصصی به این رفتار، حالت مقاوم[۱] اطلاق می شود و در مقابل این رفتار می‌توان

[۱] Passive

مثالی از رفتاری حالت محرک[۱] بیان نمود. در سیستم مسلح سازی انکراژ[۲] با بهره‌گیری از الگوی رفتاری حالت محرک پس از اعمال نیروی کششی در سیستم، عملکرد مسلح سازی سیستم شروع شده و باعث افزایش پایداری توده خاک می‌گردد. در سیستم پایدار سازی میخکوبی، جهت ایجاد گیرداری بین میخ و توده خاک، پیرامون المان مسلح کننده به کمک تزریق دوغاب سیمان، پر می‌گردد و پس از گیرش دوغاب، المان میخ‌خاک تشکیل می‌شود. با ادامه روند ساخت که به صورت بالا به پایین انجام می شود، یک‌لایه پوشش بتن پاششی[۳] یا بتن درجا ریز[۴] نیز بر سطح دیواره اجرا می‌شود که اولاً نیروی ایجادشده در میخ‌خاک را با ایجاد پیوستگی میان میخ‌خاک‌ها بر سطح دیواره توزیع کند و دوماً در مواقعی که خاک دیواره سست است از ریزش سطح دیواره جلوگیری کند. میخ‌ها تقریباً به‌صورت افقی و گاهی به دلایل اجرایی جهت افزایش راندمان عملیات تزریق با زاویه ۱۰ تا ۲۰ درجه زیر افق اجرا می‌گردند. آنچه طراح می‌بایست در طراحی سیستم میخکوبی به آن توجه ویژه‌ای داشته باشد میزان تنش کششی ایجادشده در المان مسلح کننده و تغییر شکل دیواره میخکوبی شده پس از اجرا است. طبق دسته‌بندی آئین‌نامه بزرگراه‌های فدرال ایالات‌متحده، دیوار میخکوبی شده با طول مدت کاربری ۱۸ ماه یا کمتر در گروه سازه‌های موقت نگهبان خاک و دیوار میخکوبی شده با طول مدت کاربری بیش از ۱۸ ماه در گروه سازه‌های دائم نگهبان خاک دسته‌بندی می شوند [۳]. متعاقباً در هر کدام از این دسته بندی ها تمهیدات اجرائی و محاسباتی خاصی اندیشیده شده است.

۲-۳- اجزاء اصلی سیستم میخکوبی شده

- **میلگرد فولادی**[۵]: عنصر اصلی در این روش میله‌های فولادی است. میلگردها در چال‌های از پیش حفر شده جای گرفته و در اطراف آن ها به صورت درجا دوغاب ریزی می شود. تنش

[۱] Active

[۲] Soil anchorage system

[۳] Shotcrete

[۴] Cast-in-place concrete

[۵] Steel bar

کششی در میلگرد به‌صورت غیرفعال است بدین معنی که پس از استحکام دوغاب، میلگرد تحت کشش قرار نمی‌گیرد. درواقع تنش کششی به‌واسطه تغییرشکل و جابجایی زمین در آن‌ها بسیج خواهد شد و در ادامه گودبرداری، نیروی اصطکاک میان خاک و میخ‌خاک کاملاً بسیج شده و میخ‌خاک‌ها عامل نگه‌دارنده محسوب می‌شوند.

- **دوغاب**[۱]: پس از قرارگیری میلگرد در چال، تزریق دوغاب انجام می شود. کار ا صلی دوغاب انتقال تنش از خاک اطراف به میلگرد ا ست. همچنین دوغاب یک سطح محافظ خوردگی پیرامون میلگرد ایجاد می‌کند.
- **سرِ میلگرد**[۲]: انتهای میلگرد به شکل رزوه شده (پیچ‌دار) است که کمی بالاتر از سطح دیوار خاکی قرار می‌گیرد و جهت اتصال سایر اجزاء سیستم ا ست. این سر رزوه شده تو سط مهره‌ای شش‌گوش و وا شر به صفحه تکیه‌گاهی متصل می شود. سیستم نامبرده وظیفه تبدیل و انتقال تنش کششی میلگرد به تنش برشی پوشش دیواره را دارد.
- **پوشش موقت و دائمی**[۳]: پوشش در دیوار میخکوبی شده، یکپارچگی سازه را مهیا می‌نماید. هدف از به‌کارگیری لایه موقت شاتکریت محافظت خاک در مقابل هوازدگی، اتصال اولیه میان میخ‌خاک‌ها و حفاظت در برابر فرسایش و پوسته‌شدن خاک در جبهه کار حفاری است. مرحله بتن پاشی پس از نصب هر ردیف میخ‌خاک انجام می‌شود.
- **فاصله دهنده‌ها**[۴]: این قطعات در نقاط مشخصی از میلگردها نصب می‌شوند تا حداقل ضخامت تزریق را پوشش دهند. این قطعات در فواصل منظم و حدوداً ۲٫۵ متر از یکدیگر در طول میلگرد و ۰٫۵ متری ابتدا و انتهای میلگرد نصب می‌شود.
- **نوار زهکشی ژئوکامپوزیتی**[۵]: برای جلوگیری از اعمال فشار آب منفذی به پشت دیوار، بین سطح حفاری و پوشش موقت، نوارهای ژئوکامپوزیتی به صورت عمودی نصب می شوند. علاوه بر نوارهای زهکش، سیستم زهکشی شامل زهکشی پی و چال‌های زهکشی برای

---

۱ Grout

۲ Head nail plate

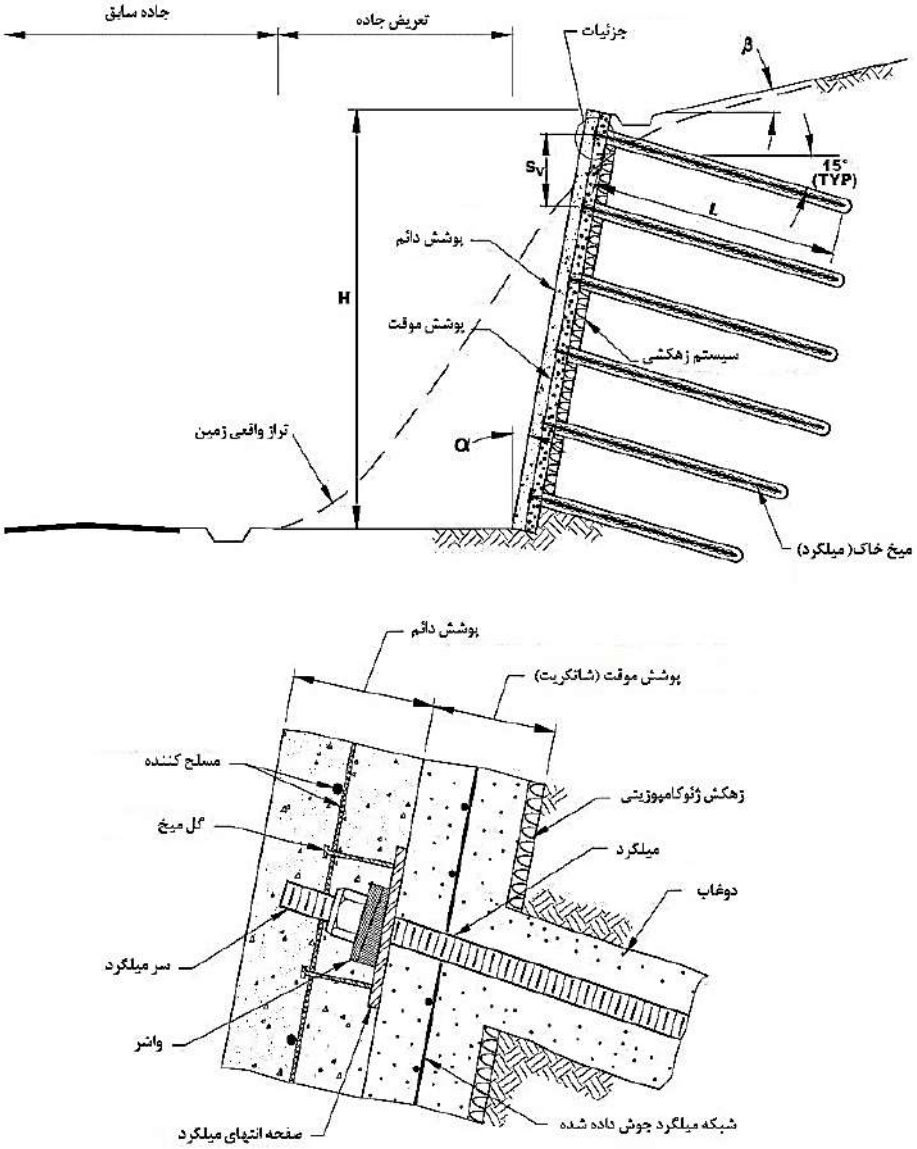
۳ Temporary facing

۴ Spacer

۵ Composite geo-drain

انتقال آب جمع شده در نظر گرفته خواهد شد.

در شکل (۲-۱) اجزاء تشکیل‌دهنده دیوار میخکوبی شده نشان داده‌شده‌اند.



شکل (۲-۱) اجزاء تشکیل‌دهنده دیوارهای میخکوبی شده [۳].

۲-٤- تحلیل و طراحی دیوار میخکوبی شده

برای تحلیل و طراحی دیوارهای میخکوبی شـــده باید دو حالت حدی مقاومت[۱] و حالت حدی بهره‌برداری[۲] را مدنظر قرارداد. برای تحلیل و طراحی مناسب سیستم میخکوبی خاک بایستی ابتدا با مکانیسم انتقال نیرو و چگونگی واکنش دیوار در مراحل مختلف اجرا آشنا شد:

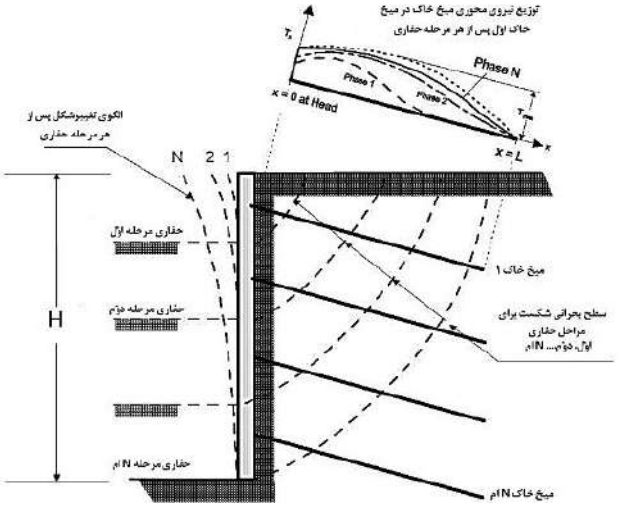
- حفاری خاک از ســطح زمین شــروع می‌شــود و اولین گام گودبرداری صــورت می‌پذیرد. مقاومت انسجام‌یافته خاک در بالای سطح احتمالی شکست، این اجازه را به خاک می‌دهد تا دیوار خاکی حاضر بدون مسلح کننده پایدار باقی بماند.
- با نصب میخ‌خاک‌ها ردیف اول و اجرای شاتکریت پوششی، مقداری نیرو در اثر تغییرشکل خاک به‌صورت تنش‌های برشی در امتداد میخ‌خاک‌ها وارد می‌شود.
- با انجام مرحله دوم گودبرداری، بخش فوقانی و قســمت مســلح نشــده به‌صــورت افقی تغییرشــکل می‌دهد. در این مرحله، ســطح احتمالی لغزش از قســمت پایین مرحله دوم حفاری عبور می‌نماید. سطح احتمالی شکست در این مرحله از حفاری با سطح شکست در مرحله قبل متفاوت است.
- ردیف دوم میخ‌خاک‌ها نصب شده، لایه شاتکریت ردیف دوم اجرا و با شاتکریت مرحله اول حفاری یکپارچه می‌شــود. جابجایی‌های حاصــل در خاک پس از پایان مرحله دوم حفاری موجب انتقال بارهای بیشــتر به میخ‌خاک‌ها ردیف اول و تولید تنش در میخ‌خاک‌ها ردیف دوم می‌شود.
- برای تأمین پایداری کلی، میخ‌خاک‌ها باید تا پشت سطح احتمالی شکست امتداد داشته باشند. با ادامه یافتن حفاری در مراحل بعدی، تغییر شکل‌های افقی دیواره میخکوبی شده بیشــتر می‌شــود و تنش‌های برشــی بیشــتری در امتداد میخ‌خاک ایجاد می‌شــود و نیروی محوری در میخ‌خاک‌ها نصــب‌شــده انســجام می‌یابد. با افزایش عمق حفاری، اندازه توده نگهداری شده نیز بزرگ‌تر می شود. تنش‌های کششی ایجاد شده در میخ به ناحیه پایدار خاک منتقل‌شده و باعث پایداری توده خاک می‌گردند.

---

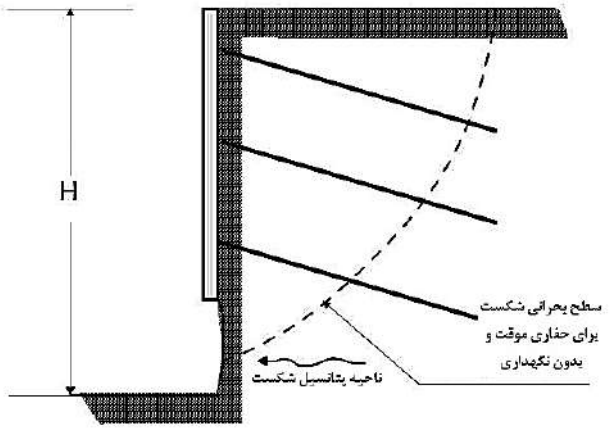
[۱] Strength limit state

[۲] Service limit state

- درحالی‌که نیروی کششی در میخ‌خاک‌ها ردیف‌های میانی و پایینی با افزایش عمق حفاری بیشتر می‌شوند، ممکن است نیروی کششی درنتیجه توزیع مجدد بار، در میخ‌خاک‌ها فوقانی کاهش یابد.
- با عمیق‌تر و بزرگ‌تر شدن صفحه احتمالی شکست، سهم میخ‌خاک‌ها فوقانی برای نگهداری توده خاک کمتر می شود. در برخی موارد که عمق صفحه شکست زیاد است، ممکن است میخ‌خاک‌ها بالایی به‌کلی غیر مؤثر شوند. هرچند، نباید این‌طور برداشت شود که حضور آن‌ها زائد است، زیرا این میخ‌ها در مراحل اولیه حفاری، پایداری دیوار را تأمین می‌نمایند و همچنین موجب کاهش جابجایی در مراحل بعدی می‌شوند.



شکل (۲-۲) سطوح احتمالی گسیختگی و نیروی کششی میخ‌خاک [۳].



شکل (۲-۳) سطح گسیختگی بحرانی در حین مراحل ساخت [۳].

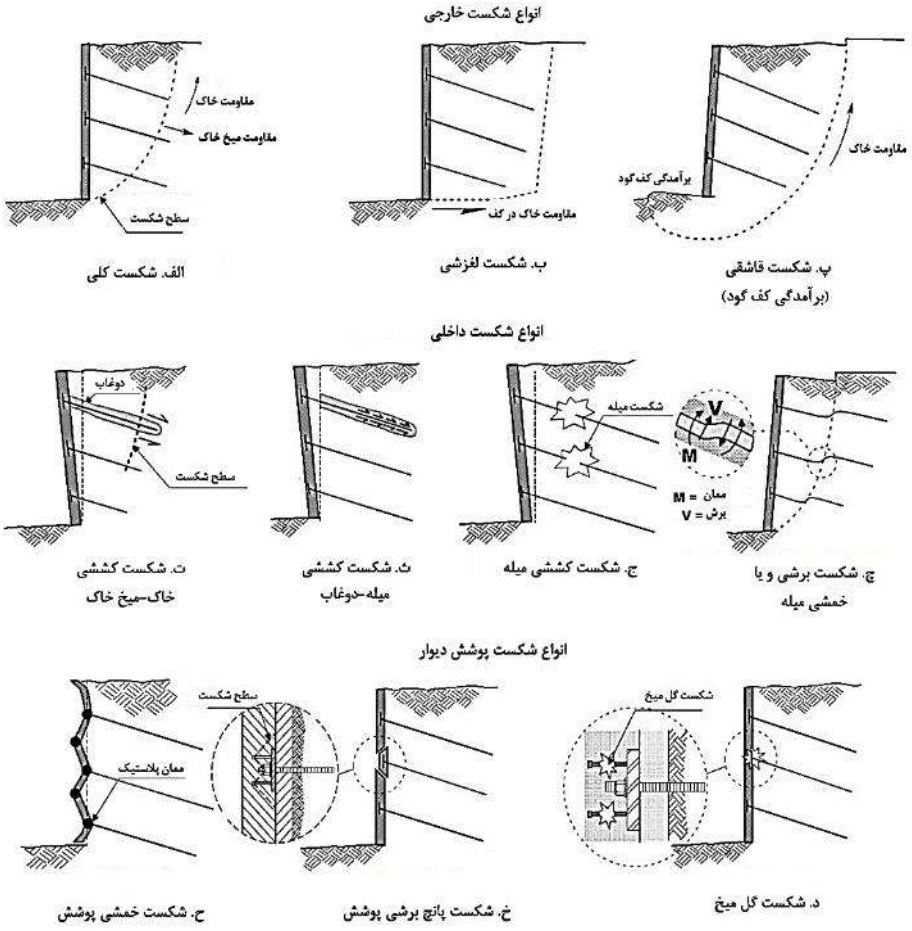
۲-۵- شکست دیوار میخکوبی شده

در رابطه باحالت حدی مقاومت، طراحی دیوار میخکوبی شده باید به‌گونه‌ای با شد که سیستم در برابر تمام شرایط احتمالی شکست پایدار باشد. در صورتی‌که تنش‌های ایجاد شده ناشی از بارهای وارده نهایی و حین اجرا در المان‌های مسلح کننده بیشتر از مقاومت کل سیستم و یا تک‌تک اجزاء باشد، سازه ناپایدار شده ایمنی گود تأمین نخواهد شد. انواع حالت‌های شکست با توجه به شکل (۲-۴) به‌صورت زیر است:

- شکست خارجی
- شکست داخلی
- گسیختگی پوشش دیواره

حد بهره‌برداری نیز باید در طراحی دیوارهای میخکوبی شده مدنظر قرار گیرد. این حالت برخلاف حد مقاومت با شکست همراه نیست و به‌طور مستقیم با میزان عملکرد بهینه سیستم میخکوبی شده (برای مثال میزان کنترل‌شده تغییرشکل دیواره) در ارتباط است.

علاوه بر دو حالت کلی حد مقاومت و حد بهره‌برداری، پارامترهای قابل‌توجه دیگری نیز حین طراحی و اجرای دیوار وجود دارند که باید به آن‌ها توجه ویژه‌ای داشت ازجمله: عملکرد صحیح سیستم‌های زهکشی خاک پشت دیوار و عدم خوردگی میخ‌خاک‌ها و اجزای فلزی دیگر. در مطالعه حاضر تنها به بررسی شرایط بهره‌برداری در حالت دوبعدی و سه‌بعدی پرداخته می‌شود و بررسی حالات شکست و گسیختگی مدنظر تحقیق نخواهد بود.



شکل (۲-۴) حالات کلی گسیختگی دیوار میخکوبی شده [۳].

۲-۶- تغییرشکل دیوار میخکوبی شده

در راهنمای طراحی دیوارهای میخکوبی شـــده اداره بزرگراه های فدرال آمریکا که به آئین نامه FHWA معروف اســت ذکرشــده اســت که حداکثر جابجایی افقی دیوار میخکوبی شــده در بخش فوقانی دیوار (تاج دیوار) رخ می‌دهد و روند آن به صورت کاهشی تا پا شنه دیوار ادامه می‌یابد. البته پس از تکمیل سازه مقادیری تغییر شکل در دیوار میخکوبی شده به علت آزاد سازی تنش و پدیده خزش رخ می‌دهد.

میزان جابجایی افقی و قائم دیوار به عوامل زیر بستگی دارد:

- ارتفاع دیوار، H (با افزایش ارتفاع دیوار میزان جابجایی‌ها نیز افزایش می‌یابد.)

- هندسه دیوار (هرچه زاویه دیوار نسبت به افق بیشتر باشد، تغییرشکل‌ها بیشتر است.)
- جنس خاک (خاک‌های با مقاومت کمتر تغییرشکل زیادتری خواهند داشت.)
- فواصل میخ‌خاک‌ها و ارتفاع خاک‌برداری در هر فاز (تراکم کمتر میخ‌ها و ارتفاع بیشتر خاک‌برداری در هر فاز، تغییرشکل‌های بزرگ‌تری را در پی دارد.)
- ضریب اطمینان کلی (FS_G کوچک‌تر با جابجایی‌های بزرگ‌تری همراه است.)
- نسبت طول میخ‌خاک به ارتفاع دیوار (استفاده از میخ‌خاک‌ها کوتاه‌تر نسبت به ارتفاع دیوار جابجایی جانبی بیشتری را در پی خواهد داشت.)
- شیب میخ‌خاک‌ها (در میخ‌خاک‌ها با شیب تندتر، به دلیل انسجام کم‌تر نیروهای کششی در امتداد آن‌ها، جابجایی افقی دیوار زیادتر می‌باشد.)
- میزان اضافه بار (بارهای دائمی روی دیوار موجب افزایش تغییرشکل می‌شوند.)

حداکثر جابجایی‌های افقی و قائم دیوار در بخش فوقانی دیوار، نسبت به مدت‌زمان طولانی به ترتیب δ_h و δ_v بوده و به‌صورت رابطه شماره (۲-۱) تخمین زده می‌شود :

$$\delta_h = \left(\frac{\delta_h}{H}\right)_i \times H \qquad (۲-۱)$$

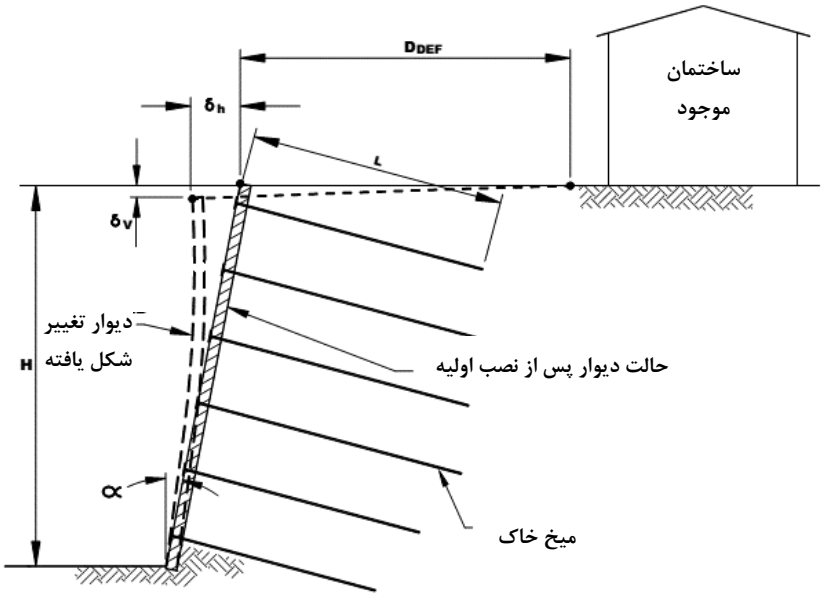
که در رابطه فوق H ارتفاع دیواره و $\left(\frac{\delta_h}{H}\right)_i$ نسبتی وابسته به شرایط خاک است و با توجه به جدول (۲-۱) لحاظ می‌شود. در محدوده تأثیر همان‌گونه که در شکل (۲-۵) نشان داده‌شده است تغییرشکل‌ها زمین می‌تواند مقادیری قابل‌توجه باشد که ابعاد این محدوده به‌صورت فاصله افقی پشت دیوار (D_{DEF}) طبق رابطه (۲-۲) تعریف می‌شود:

$$\frac{D_{DEF}}{H} = C(1 - \tan\alpha) \qquad (۲-۲)$$

که در آن α زاویه خوابیدگی دیوار و C ضریبی است که بر اساس جدول (۲-۱) تعیین می‌شود.

جدول (۲-۱) مقادیر $\left(\frac{\delta_h}{H}\right)_i$ و C بر اساس شرایط خاک [۳].

پارامتر	سنگ خردشده و خاک سفت	ماسه	خاک ریزدانه
$\frac{\delta_h}{H}$ ، $\frac{\delta_v}{H}$	۰,۰۰۱	۰,۰۰۲	۰,۰۰۳
C	۱,۲۵	۰,۸	۰,۷



شکل (۲-۵) تغییرشکل دیوار میخکوبی شده [۳].

در تخمین اولیه، دیوارهای با تغییرشکل افقی حین ساخت بیش از 0.005 H باشد لازم است تمهیداتی اندیشیده شود و تغییراتی در طرح اولیه اعمال گردد که عملکرد سیستم آسیب نبیند. با افزایش زاویه خوابیدگی دیوار، نصب میخ‌خاک‌ها بلندتر در بخش فوقانی، استفاده از ضریب اطمینان بزرگ‌تر یا حتی استفاده از انکرها در نقاط اتصال میخ‌خاک‌ها، می‌توان از جابجایی بیش‌ازاندازه جلوگیری نمود.

۲-۷- ضرایب پیشنهادی اطمینان درروش ASD

حداقل ضرایب اطمینان توصیه‌شده برای طراحی دیوارهای میخکوبی شده برای انواع شکست درروش ASD در جدول (۲-۲) آورده شده است.

ترکیبات مختلفی از انواع بارهای وارده می‌بایستی در طراحی موردتوجه قرار گیرد تا بدترین شرایط بحرانی به دست آید. درروش ASD بارها بدون ضریب می‌باشند.

جدول (۲-۲) حداقل ضرایب پیشنهادی برای طراحی دیوار میخکوبی شده به روش ASD [۳].

حالت شکست	نوع پایداری	نماد ضریب اطمینان	حداکثر		
			بار استاتیکی		بار دینامیکی (دیوار موقت و دائم)
			دیوار موقت	دیوار دائم	
شکست خارجی	پایداری کلی (طولانی‌مدت)	FS_G	۱/۵	۱/۳	۱/۱
	پایداری کلی (حین حفاری)	FS_G	۱/۲-۱/۳(*)		NA
	لغزش	FS_{SL}	۱/۳	۱/۵	۱/۱
	شکست قاشقی	FS_H	۲/۵	۳	۲/۳
شکست داخلی	بیرون کشیدگی میخ‌خاک	FS_P	۲		۱/۵
	گسیختگی کششی میله	FS_T	۱/۸		۱/۵۳
شکست پوشش دیوار	خمش پوشش دیوار	FS_{FF}	۱/۳۵	۱/۵	۱/۱
	برش پوشش	FS_{FP}	۱/۳۵	۱/۵	۱/۱
	گسیختگی گل‌میخ‌ها (میخ A307)	FS_{HT}	۱/۸	۲	۱/۵
	گسیختگی گل‌میخ‌ها (میخ A325)	FS_{HT}	۱/۵	۱/۷	۱/۳

(*) مربوط به مواردی است که خاک‌برداری موقت انجام‌شده تا ۴۸ ساعت قبل از نصب میخ‌خاک‌ها پابرجا باشد. مقادیر بزرگ‌تر ضرایب اطمینان در حالات بحرانی‌تر و زمانی که عدم قطعیت‌ها بیشتر است، می‌تواند استفاده شود.

۲-۸- مروری بر ادبیات موضوع

۲-۸-۱- مطالعه بنیادی پک (۱۹۶۹)

پک در سال ۱۹۶۹ در هفتمین اجلاس بین‌المللی مهندسی مکانیک خاک و پی گزارشی مفصل در ارتباط با رفتار گودبرداری‌های عمیق و فاکتورهای کنترل‌کننده پاسخ این گودبرداری‌ها ارائه داد که اولین جرقه‌های توسعه تحقیقات در مبحث گودبرداری‌های عمیق را در ذهن محققان مهندسی ژئوتکنیک ایجاد کرد. در این مطالعه، گودبرداری، مقطعی قائم در زمین فرض شده ا ست که جهت

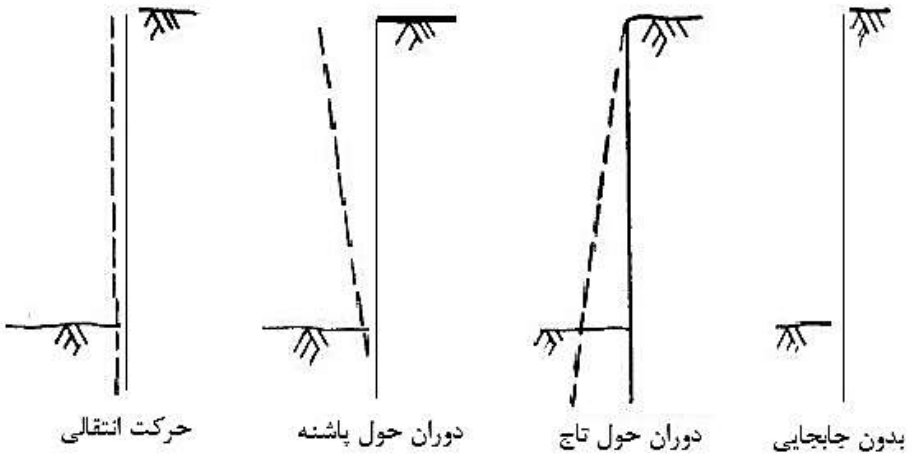
پایداری آن، به حائل‌های جانبی‌نیاز است. در این مطالعه پک به مباحث مهمی همچون جابجایی‌های جانبی، نشست زمین در مجاورت گود، گسیختگی به علت تورم و تغییر شکل قائم، روش‌های کاهش نشست سطح زمین در مجاورت گود و توزیع فشارهای خاک در گودبرداری‌های عمیق، اشاره نمود. سه نکته حائز اهمیت در این تحقیق بیان‌شده است:

- نوع خاک و مشخصات آن در میزان تغییرشکل‌ها و عملکرد گود تأثیر بسزایی دارد.
- ارتفاع گودبرداری در میزان تغییرشکل‌ها حائز اهمیت است.
- "مهارت" موضوعی پراهمیت است. مهارت شامل اجرای فوری حائل‌ها و حمایت‌کننده‌های جانبی در گودبرداری است.

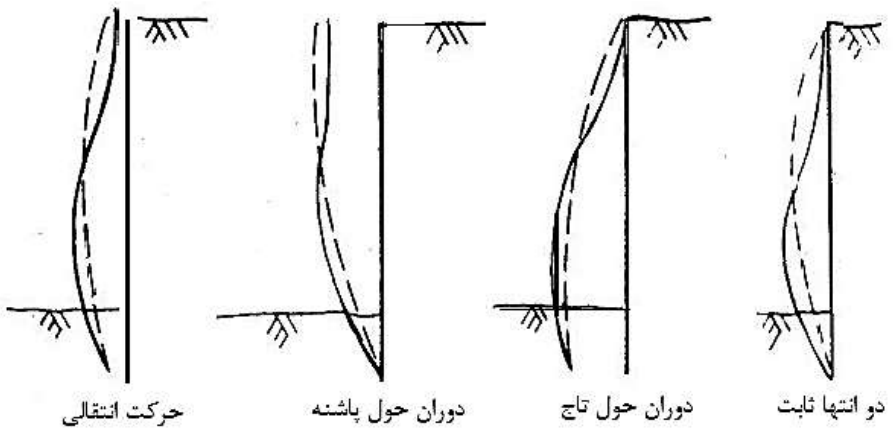
پک نشان داد که میزان نشست در مجاورت گودبرداری به نوع خاک بستگی دارد [۴].

۲-۸-۲- گلدبرگ و همکاران (۱۹۷۶)

این محققین گزارش کاملی را در سه جلد برای مؤسسه بزرگراهی فدرال آمریکا در مورد طراحی و اجرای فن‌های اجرای سیستم‌های حائل جانبی تنظیم نمودند و با توجه به داده‌های ۶۰ گودبرداری موجود به بررسی تغییرشکل‌های افقی و نشست سطح زمین پرداختند، همچنین به بررسی عوامل اصلی مؤثر ازجمله نوع دیوار، نوع سیستم مسلح کننده و نوع خاک بر روی نحوه‌ی تغییرشکل پرداختند [۵]. این محققین به این نکته اشاره کردند که در خاک‌های ماسه‌ای و شنی و رس‌های سخت تا سفت، نوع دیوار تأثیر محسوسی بر روی عملکرد نخواهد گذاشت. هرچند در خاک‌های رس نرم‌تر سیستم حائل سخت مثل دیواره دیافراگمی بتنی باعث محدود شدن تغییرشکل‌ها می شود. آن‌ها همچنین اشکال مختلف تغییر شکل دیوار کاملاً صلب و منعطف را به صورت شکل (۲-۶) و شکل (۲-۷) بیان داشتند.



شکل (۲-۶) حالت‌های کلی تغییرشکل دیوار کاملاً صلب [۵].



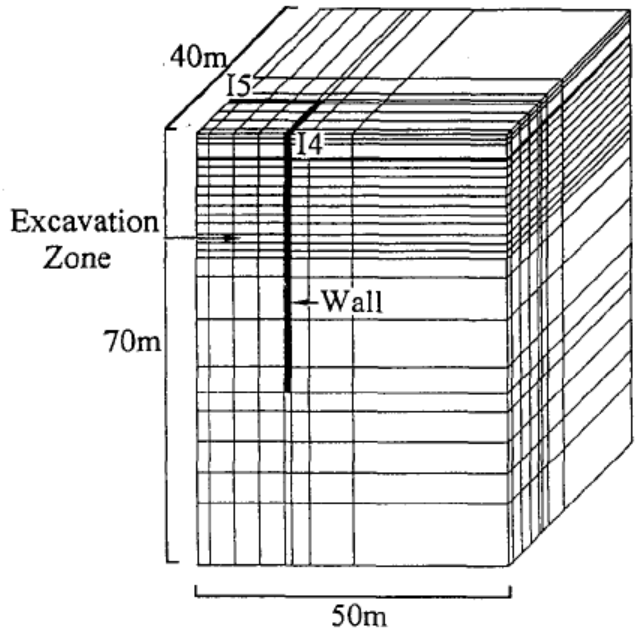
شکل (۲-۷) حالت‌های کلی تغییرشکل دیوار منعطف [۵].

حداکثر جابجایی جانبی در شـن و ماسـه برای دیواره گودبرداری شـده، کمتر از 0.2% ارتفاع گود است، که در خاک‌های رسی خیلی سخت به علت خاصیت خزشی در طول زمان این مقدار می‌تواند بیشتر باشد. برای سیستم دوخت به پشت[۱] میزان جابجایی جانبی بیشینه در رس‌های خیلی سخت حدوداً 0.4% ارتفاع گود بیان‌شده است.

[۱] TieBack

۲-۸-۳- اوه و همکاران (۱۹۹۶)

اوه و همکارانش در سال ۱۹۹۶ در قالب یک پژوهش پارامتریک، به بررسی تغییرشکل‌های یک مدل سه‌بعدی گو شه‌دار با دو مدل دوبعدی پرداختند. آن‌ها از یک روش غیرخطی سه‌بعدی المان محدود برای تحلیل گودبرداری‌های عمیق استفاده کردند [۶]. در این تحقیق هندسه‌ی تمامی مدل‌های ساخته‌شده دارای کنج‌های مقعر با زاویه ۹۰ درجه است و برای پایدارسازی گود از روش بالا به پایین، دال در طبقات و دیوار دیافراگمی باضخامت ۷۰ سانتی‌متر استفاده‌شده است.

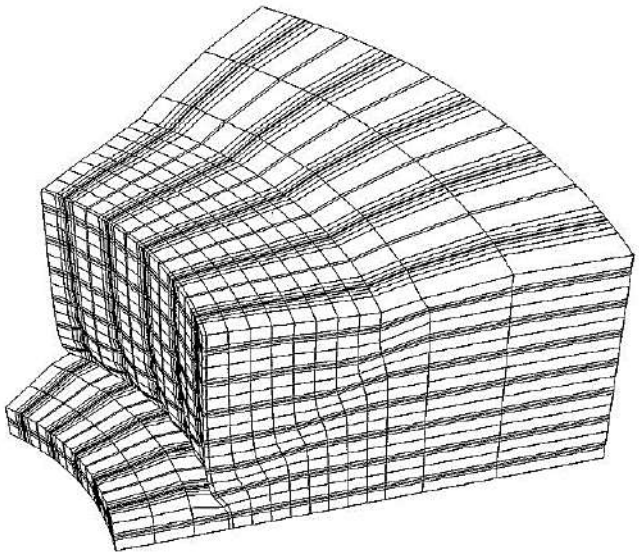


شکل (۲-۸) هندسه کنج مدل شده توسط اوه و همکاران [۶]

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تغییرشکل یک دیوار کوتاه می‌تواند به‌شدت تحت تأثیر کنج‌ها قرار بگیرد و برای یک طول نسبتاً کم از دیواره، فاصله کنج تا بخشی که در طول دیوار اولیه شرایط کرنش صفحه‌ای را دارد تقریباً برای طول‌های مختلف از دیوار اولیه یکسان بود.

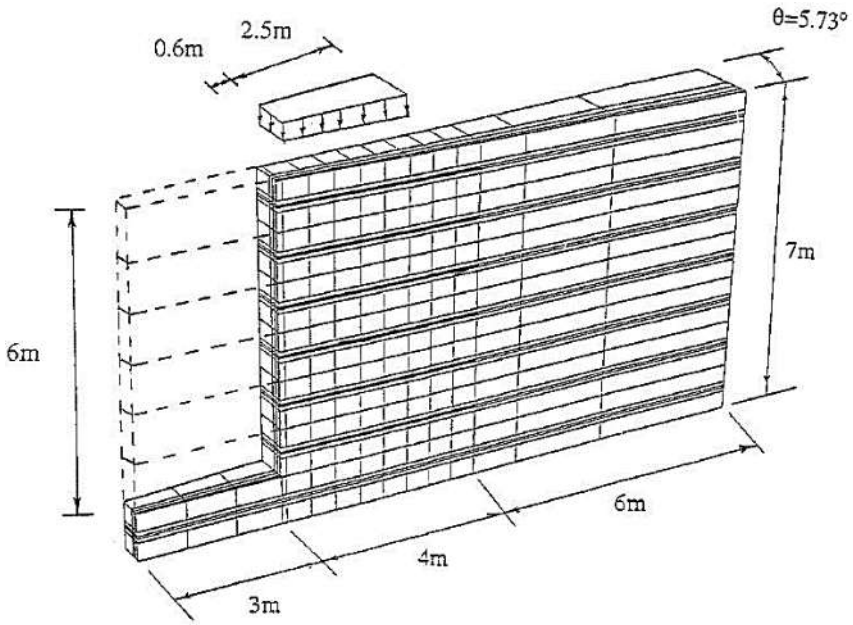
۲-۸-۴- اسمیت و سو (۱۹۹۷)

اسمیت و سو در مطالعه خود به بررسی دیوار میخکوبی شده در حین ساخت، بهره‌برداری و شرایط بارگزاری نهایی پرداخته‌اند و در مطالعه‌ی آن‌ها رفتار کلی دیوار میخکوبی شده، اندرکنش میخ‌خاک و خاک اطراف، نقش مسلح کننده‌ها و مکانیسم گسیختگی داخلی و کلی بررسی شده است [۷]. اهمیت این مطالعه ازآنجاست که به‌عنوان نخستین مطالعات درزمینه‌ی تحلیل ۳ بعدی دیوارهای میخکوبی شده محسوب می‌شود که در این مطالعه نیز به علت تکراری بودن آرایش میخ‌ها در راستای قائم و افق، تنها یک مقطع به عرض حدود یک متر از شکل سه‌بعدی کلی نشان داده‌شده در شکل (۲-۹) مورد تحلیل قرارگرفته است.



شکل (۲-۹) دیوار میخکوبی شده سه‌بعدی با انحنا در پلان [۷].

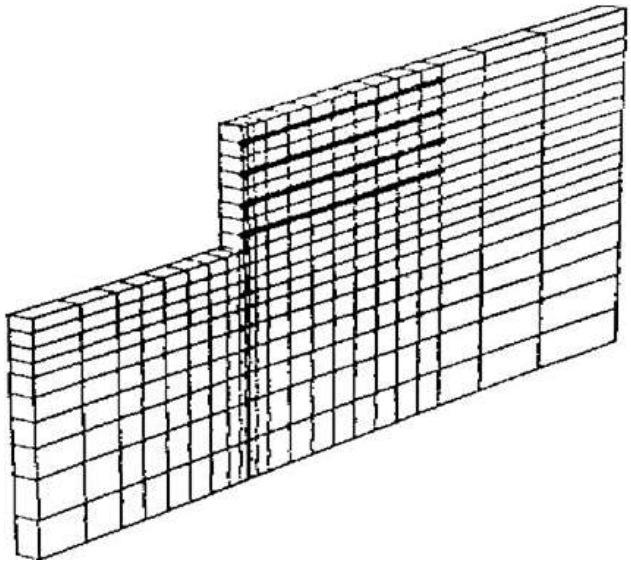
اسمیت و سو در مطالعه خود مشاهده کردند که بیشترین نیروی کششی در میخ‌خاک خاصی رخ‌داده است ولی با توجه به فرآیند بارگزاری ممکن است در سایر میخ‌خاک‌ها نیز حداکثر نیروی کششی بسیج شود.



شکل (۲-۱۰) مقطع یک متری دیوار میخکوبی شده جهت تحلیل سه‌بعدی [۷].

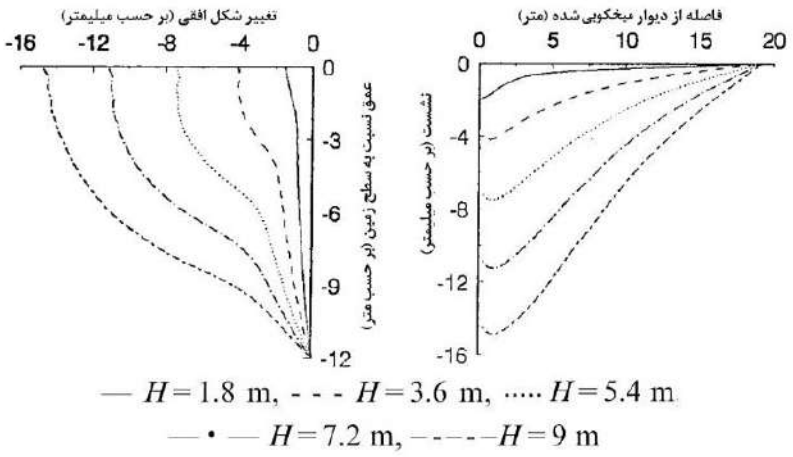
۲-۸-۵- ژانگ و همکاران (۱۹۹۹)

ژانگ و همکاران در مطالعه خود به بررسی سه‌بعدی دیوار میخکوبی شده و پارامترهای مهم مؤثر بر عملکرد آن پرداختند. برای مدل‌سازی المان‌های خاک از المان آجری ۲۰ گرهی و برای میخ‌خاک از المان میله ۳ گرهی استفاده‌شده است. در این مطالعه اندرکنش میخ‌خاک و خاک اطراف به کمک دو فنر عمود بر هم مدل شده است که نوعی شبیه سازی تنش‌های قائم و برشی در سطح تماس میخ‌خاک و خاک است. دیوار میخکوبی شده مدل شده در این تحقیق تحت شرایط بار بهره‌برداری تحلیل شده و تغییر شکل‌ها و نیروهای کششی بسیج شده در میخ‌خاک تنها در حالت اعمال بارهای بهره‌برداری موردمحاسبه قرارگرفته‌اند. در این تحقیق همچون مطالعه‌ی اسمیت و سو آرایش میخ‌خاک‌ها در طول دیوار میخکوبی شده یکنواخت بوده و تنها یک مقطع با عرض $\frac{S_h}{2}$ به‌صورت سه‌بعدی مدل شده است [۸]. در این تحقیق شرایط مرزی کف مدل به نحوی اعمال‌شده است که در کف مدل جابجایی در تمام جهت‌ها مقید شده است و در جداره‌های جانبی مدل نیز به حرکت به‌صورت غلتکی است و تنها در جهت عمود بر جداره محدودیت جابجایی خواهد داشت. پارامترهای موردبررسی در این مطالعه، عمق گودبرداری H، طول میخ‌خاک L و فاصله افقی بین میخ‌خاک S_h می‌باشند.



شکل (۲-۱۱) مقطع سه‌بعدی دیوار میخکوبی شده [۸].

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرشکل جانبی دیوار میخکوبی شده در عمق کاهش می‌یابد و بیشترین مقدار تغییرشکل در تاج گود رخ می‌دهد و این امر ناشی از خاصیت انعطاف پذیری دیوار میخکوبی شده است. بیشترین مقدار نشست در سطح زمین نیز در نزدیکی دیواره رخ می‌دهد. در این مطالعه بیان‌شده است که افزایش طول میخ‌خاک باعث کاهش تغییرشکل افقی و نشست سطح زمین می شود و میزان کاهش نشست در نزدیکی دیواره گودبرداری شده بیشتر است و همچنین با کاهش فاصله افقی میخ‌خاک‌ها و افزایش تراکم میخ‌خاک، میزان نشست و تغییرشکل افقی کاهش می‌یابد.



شکل (۲-۱۲) پروفیل تغییرشکل افقی و نشست در عمق دیوار میخکوبی شده [۸].

۲-۸-۶- بابو و همکاران (۲۰۰۲)

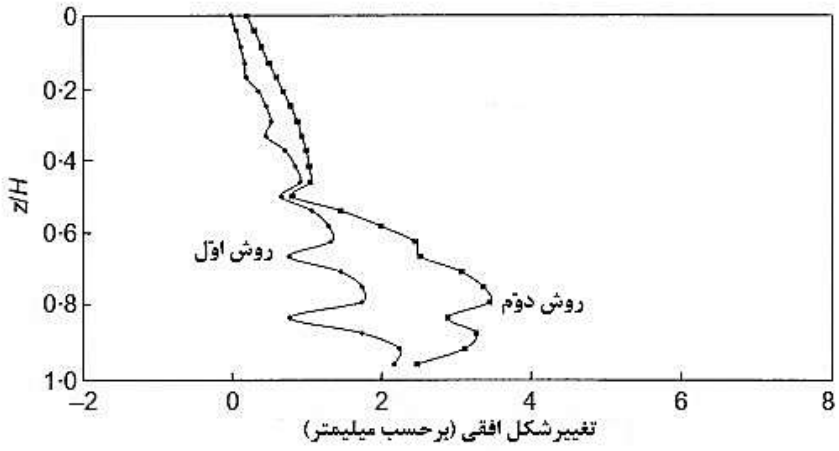
بابو و همکاران با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC و مدل‌سازی میخ‌خاک‌ها با المان شمع و پوشش دیواره با المان تیر در مطالعه خود به بررسی اثر عواملی بر روی رفتار دیوار میخکوبی شده پرداختند، مهم‌ترین این عوامل به شرح زیر اند [۹]:

- مراحل ساخت دیوار میخکوبی شده
- نوع پوشش دیواره
- چگونگی اتصال بین میخ و پوشش
- سختی پوشش دیواره
- زاویه پوشش دیواره

در این مطالعه مراحل ساخت به دو صورت موردبررسی قرارگرفته است :

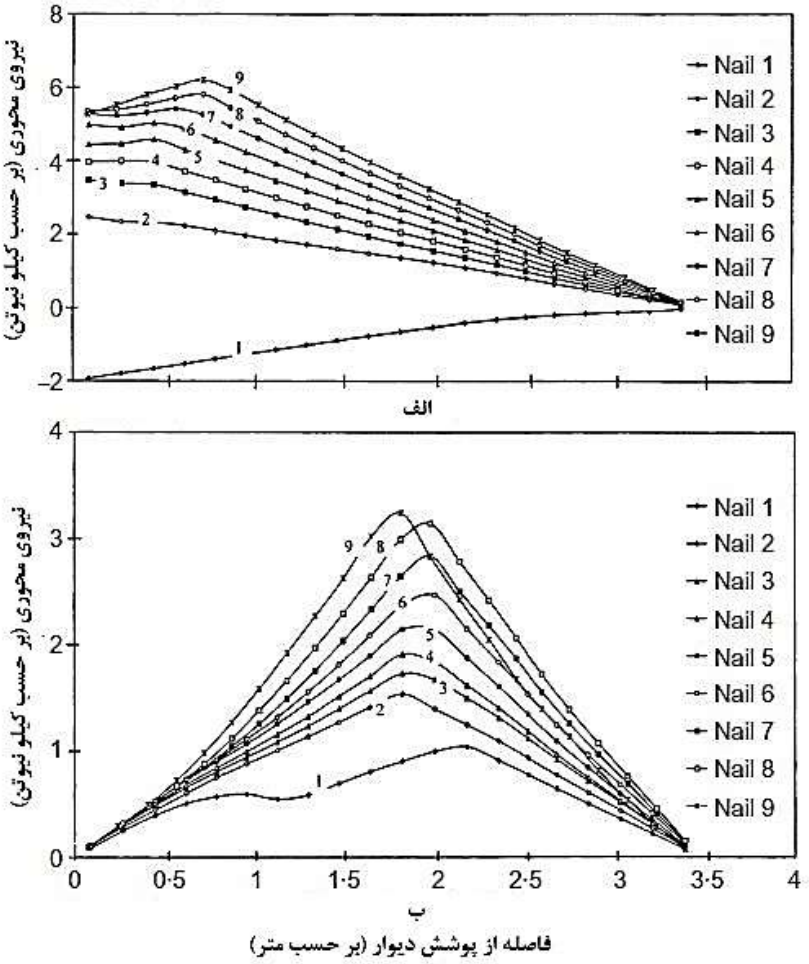
- روش اول: گام گودبرداری ۰,۵ متری و اعمال یک ردیف میخ‌خاک و پوشش در هر مرحله
- روش دوم: گام گودبرداری ۱,۵ متری و اعمال سه ردیف میخ‌خاک و پوشش در هر مرحله

درروش اول عمق بحرانی گودبرداری مقادیر بیشتری خواهد داشت و الگوی نیروی کششی بیشینه در عمق دیوار میخکوبی شده درروش دوم متفاوت از روش اول است ولی بیشینه نیروی کششی بسیج شده یکسان است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تغییرشکل جانبی بیشینه دیوار میخکوبی شده در عمق 0.8H رخ می‌دهد و میزان تغییرشکل جانبی در دو روش اول و دوم متفاوت است.



شکل (۲-۱۳) تغییرشکل افقی در خاک درروش اول و دوم [۹].

اثر اتصال میخ و پوشش دیوار به دو صورت آزاد و کاملاً مقید موردبررسی قرارگرفته است. نحوه اتصال میخ و پوشش دیوار به‌طور قابل‌توجهی میزان ارتفاع بحرانی گودبرداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. الگوی کلی توزیع نیروی کششی در طول میخ نیز وابسته نحوه اتصال میخ به پوشش دیوار است.



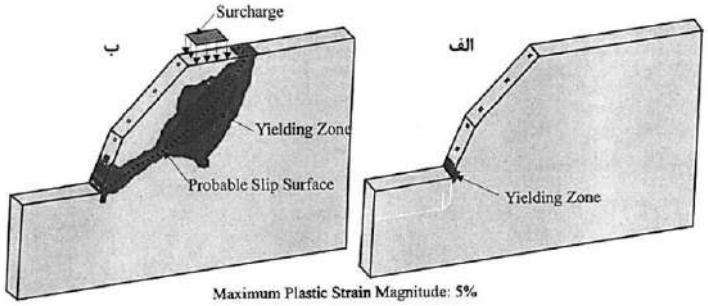
شکل (۲-۱۴) توزیع نیروی محوری در طول میخ خاک الف) اتصال صلب بین میخ خاک و پوشش ب) بدون اتصال[۹].

۲-۸-۷- یانگ و دروم (۲۰۰۲)

یانگ و دروم با استفاده از نرم‌افزار Abaqus یک مقطع از شیروانی میخکوبی شده واقعی را به‌صورت سه‌بعدی شبیه سازی نموده‌اند و نتایج حاصل را با داده‌های ثبت شده مقایسه کرده‌اند و مکانیسم گسیختگی شیروانی را با افزایش بار اعمالی موردبررسی قرار داده‌اند [۱۰]. نتایج ارائه شده در این

تحقیق نشان می‌دهد که میخ‌خاک‌های کوتاه بخش بالایی شیروانی میخکوبی شده چندان عملکرد مناسبی درازمدت نخواهد داشت و قادر به کنترل تغییرشکل‌های ناشی از خزش نخواهد بود. از طرفی یکی از عوامل مهم در کنترل گسیختگی کلی، میزان طول میخ‌خاک در پشت سطح گسیختگی احتمالی است. جهت بررسی گسیختگی شیروانی میخکوبی شده یک بار سطحی به‌صورت مرحله‌ای افزایش داده می‌شود و پس از رسیدن به مقدار بیشینه $160\frac{\mathrm{KN}}{\mathrm{m}^2}$ مقادیر تغییر شکل ثابت شده که نشان‌دهنده‌ی گسیختگی است. در این شرایط میزان ضریب اطمینان حدود ۱٫۰۷ و سطح لغزش حاصل نیز به‌صورت سهمی است. در مطالعات محققان ذکر شده است که در حالت کلی در تحلیل‌ها و مدل‌سازی عددی چهار رویکرد کلی جهت معرفی نقطه گسیختگی در نظر گرفته می‌شود که عبارت‌اند از [۱۱, ۱۲]:

- عدم همگرایی در حل مسئله
- گسترش ناحیه کرنش پلاستیک از پنجه دیوار میخکوبی شده تا بالای سطح زمین
- رخداد مقادیر مشخصی از کرنش برشی معادل و کرنش پلاستیک در طول سطح لغزش احتمالی
- رشد سریع تغییر مکان گره‌ها در سطح شیروانی



شکل (۲-۱۵) ناحیه گسیخته شده تحت شرایط الف). بارگزاری در شرایط بهره‌برداری ب). سربار $90\frac{\mathrm{KN}}{\mathrm{m}^2}$ [۱۰].

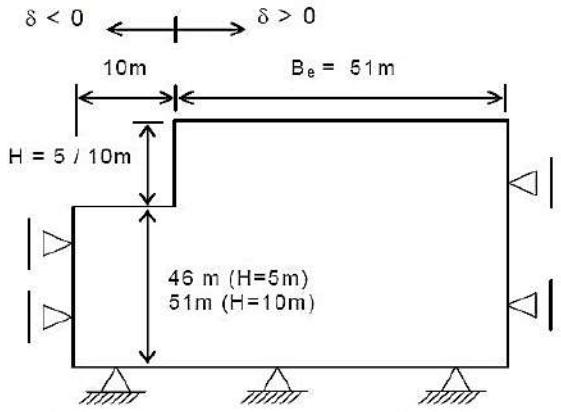
در شرایط بهره‌برداری میزان کرنش پلاستیک در پنجه شیروانی بسیار ناچیز است و نکته بیانگر قابل‌استفاده بودن سیستم میخکوبی در این مورد خاص است. میزان نیروی بسیج شده در میخ‌خاک‌ها بالایی بسیار ناچیز است و علت آن قرارگیری کل طول میخ‌خاک در بخش ناپایدار خاک است. ولی میزان نیروی ماکزیمم بسیج شده در میخ‌خاک‌ها پایین قابل‌توجه است و مکان نیروی ماکزیمم در میخ‌خاک‌ها تقریباً منطبق بر سطح بحرانی لغزش است.

۲-۸-۸- لیما و همکاران (۲۰۰۳)

لیما و همکاران با استفاده از نرم‌افزار FLAC در مطالعه خود نشان دادند که چنانچه نسبت $\frac{Be}{H}$ کوچک‌تر از ۴ باشد شرایط مرزی بر روی نتایج تأثیرگذار خواهند بود و لذا در مدل‌سازی‌ها مرزهای چپ و راست ناحیه گودبرداری شده باید به‌اندازه کافی از دیواره میخکوبی شده فاصله داشته باشند تا فواصل اثر همسایگی با شرایط مرزی از روی مدل حذف شود [۱۳, ۱۴].

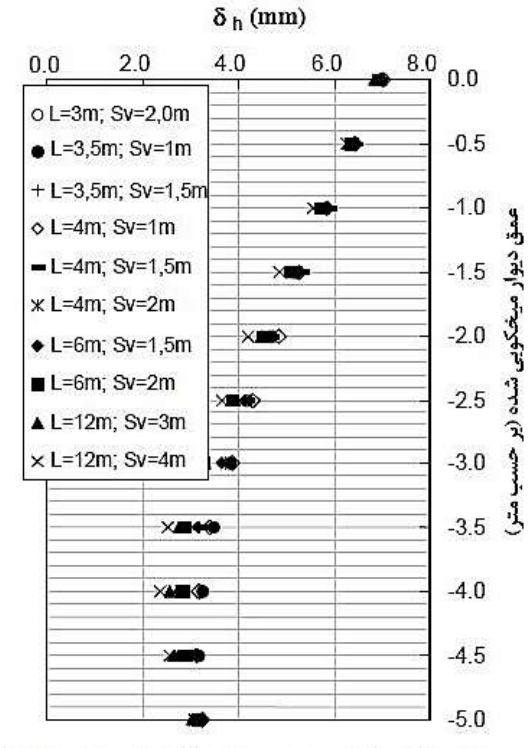
این محققین در مطالعه مشابهی در دیوار میخکوبی شده با ارتفاع ۵ متر نتیجه گرفته‌اند که مستقل از طول میخ و فاصله قائم S_v، همواره میزان تغییرشکل‌های دیوار میخکوبی شده مثبت و به سمت توده خاک است. این رفتار به‌گونه‌ای تعجب‌برانگیز برخلاف نتایج سایر محققین است چراکه اصولاً بر اساس آزاد سازی تنش در محل گودبرداری شده بایستی توده خاک تمایل به حرکت به سمت گود داشته باشد اما این محققین علت این موضوع را دو عامل زیر بیان نمودند:

- اثر شرایط مرزی
- سختی پوشش دیواره که همراه با سختی توده خاک باعث ایجاد رفتار کلی صلب می‌شود.

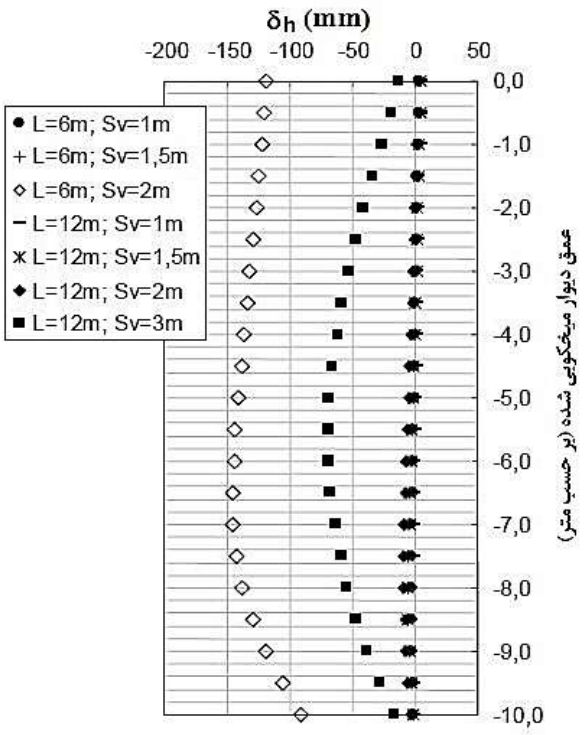


شکل (۲-۱۶) پارامتر هندسی و شرایط مرزی [۱۳].

زمانی که مرز سمت چپ دیوار میخکوبی شده به کمتر از H (ارتفاع دیوار) می‌رسد، نتایجی معکوس حاصل خواهد شد از طرفی در دیوارهای میخکوبی بلندتر مثلاً با ارتفاع ۱۰ متر مشاهده شده است که تمایل توده خاک به سمت ناحیه گودبرداری بیشتر شده است و بیشینه تغییرشکل افقی علی‌رغم تغییر تراکم میخ ها در میانه ارتفاع دیوار میخکوبی رخ می‌دهد که نتیجه‌ای مغایر با نتایج سایر محققان است.



شکل (۲-۱۷) تغییرشکل جانبی دیوار میخکوبی شده به ارتفاع ۵ متر با طول میخ خاک و فاصله قائم متفاوت [۱۳].



شکل (۲-۱۸) تغییرشکل جانبی دیوار شده به ارتفاع ۱۰ متر با طول میخ خاک و فاصله قائم متفاوت [۱۳].

۲-۸-۹- مطالعات صورت گرفته در رابطه با تعیین تغییرشکل‌ها

تغییرات تنش در المان‌های خاک حین و پس از گودبرداری باعث ایجاد تغییرشکل‌هایی می‌شود که میزان آن‌ها به عوامل زیر بستگی دارد:

- پارامترهای مقاومتی خاک
- هندسه و ارتفاع گود
- میزان تورم کف گود و پایداری خاک در برابر آن
- نوع سیستم حائل و مقاومت آن
- مهارت نیروی اجرایی در شیوه پیاده‌سازی صحیح سازه

پیش‌بینی تغییرشکل‌ها موضوعی است که در ادامه به بررسی آن در مرور بر ادبیات پرداخته می‌شود.

◘ تعیین تغییرشکل‌های قائم و نشست سطح زمین

اوه و همکاران پس از مطالعه‌ی ۱۰ مورد گودبرداری در خاک های نرم تایوان، روشی را جهت تخمین تغییرشکل‌های ناشی از گودبرداری در سیستم دیوار حائل پیشنهاد نمودند [۱۵]. در مطالعه‌ی این محققان سیستم دیوار دیافراگمی به‌عنوان سیستم غالب در مطالعات ایشان بود. در این مطالعه بیان شده است که حداکثر تغییر شکل افقی دیوار در حدود 0.002H تا 0.005H است. از طرفی کلا و اورک در مطالعه خود میزان تغییرشکل های افقی در خاک‌های رس سخت و خاک‌های دستی و ماسه‌ای را در حدود 0.002H و پک میزان تغییر شکل‌های افقی را در سیستم پایدارسازی سپرکوبی[۱] حدود 0.01H گزارش نموده‌اند [۴, ۱۶]. از مطالعات این محققین نتیجه می‌شود که نحوه نشست سطح زمین وابسته عوامل متعددی است، عواملی همچون:

- شرایط سطح آب زیرزمینی
- هندسه گود
- مراحل گودبرداری
- زمان گودبرداری

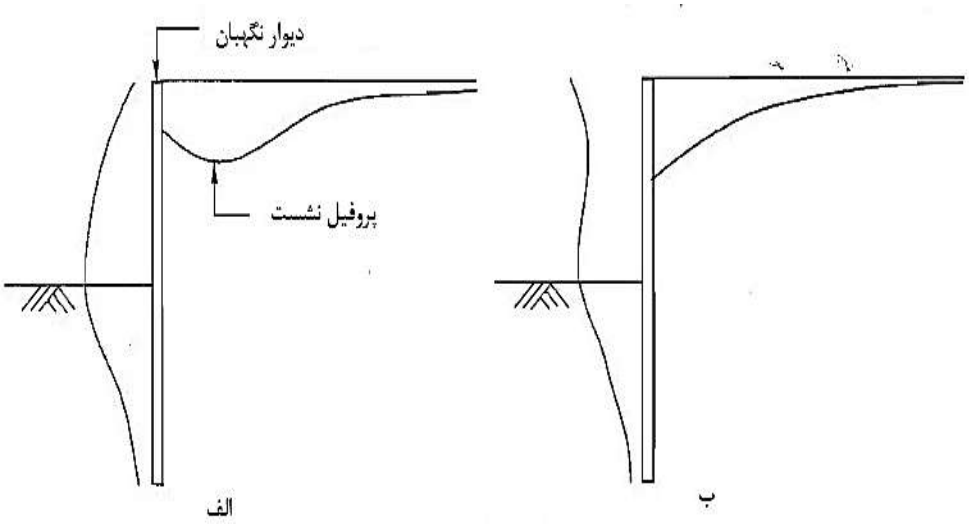
[۱] Sheet pile walls

- شرایط بارگزاری
- سازه‌های مجاور موجود
- نوع سازه پایدارکننده
- نحوه‌ی اجرای

عوامل فوق نه‌تنها بر میزان نشست سطح زمین تأثیرگذارند بلکه بر روی میزان تغییرشکل جانبی و بالا زدگی سطح زمین نیز مؤثر است. در این مطالعات نشان داده شده است که حداکثر نشست سطح زمین در حدود 0.5-0.7 برابر تغییرشکل جانبی ماکزیمم است که تحت تأثیر سیستم پایدارسازی و شرایط خاک است. در حالت کلی پروفیل نشست سطح زمین به دو صورت مشاهده‌شده است:

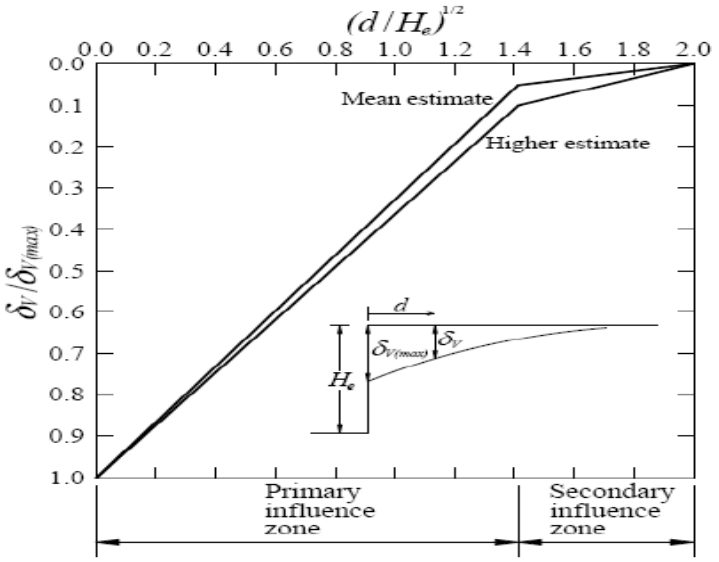
الف) حالتی که حداکثر نشست در فاصله معینی از دیوار رخ می‌دهد (فاصله تقریبی حدود $\frac{H}{2}$).

ب) حالتی که حداکثر نشست در نزدیکی دیوار رخ می‌دهد.



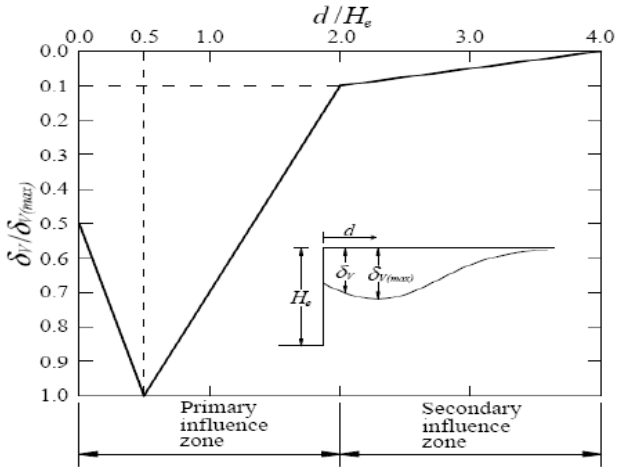
شکل (۲-۱۹) انواع پروفیل نشست سطح زمین [۱۵].

اوه و همکاران برای نشست نوع (ب) که در شکل (۲-۱۹) نشان داده شده است، پروفیل نشست سه خطی معرفی نمودند که در شکل (۲-۲۰) نشان داده‌شده است. این پروفیل نشست، نشانگر آن است که ماکزیمم نشست در نزدیکی دیواره به وقوع می‌پیوندد.



شکل (۲-۲۰) شکل پروفیل نشست نوع اسپاندرلی [۱۵].

هسیه و اوه بر پایه ۹ مطالعه موردی، تحقیق اوه و همکارانش را با پیشنهاد پروفیل نشست مقعر برای نشست نوع (الف) که در شکل (۲-۱۹) نشان داده‌شده است را ادامه دادند [۱۵].

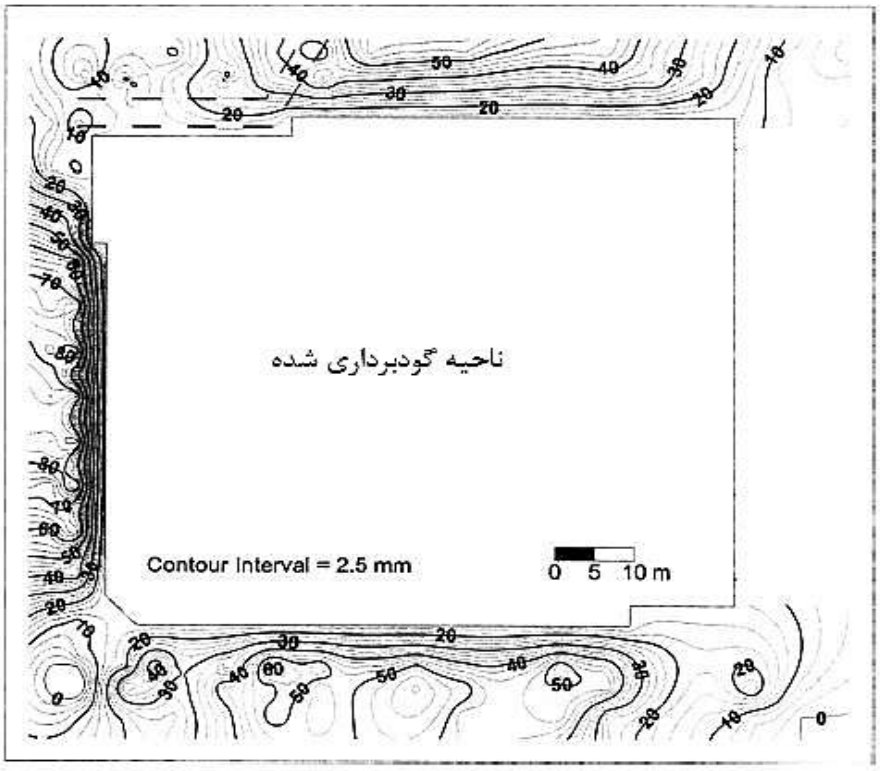


شکل (۲-۲۱) روش پیشنهادی برای پیش‌بینی نشست مقعر [۱۵].

در شکل (۲-۲۱) مشخص است که ماکزیمم نشست در فاصله $\frac{H_e}{2}$ از دیواره به وقوع می‌پیوندد و تغییرشکل بر روی دیواره برابر با $0.5\ \delta_{v(max)}$ است. در مطالعه‌های موردی استفاده‌شده در این تحقیق نشان داده‌شده است که محدوده تأثیر اولیه تقریباً ۲ برابر ارتفاع گود بوده و پس از طی شدن محدوده‌ای حدود ۴ برابر ارتفاع دیواره میزان نشست‌های سطح بسیار ناچیز خواهد بود [۱۵].

◘ تغییرشکل‌های افقی

فینو[۱] و روبوسکی[۲] توزیعی موازی برای مقادیر نشست و جابجایی‌های جانبی در گودبرداری‌های عمیق اجراشده در رس‌های نرم تا متوسط پیشنهاد نمودند که این پروفیل توزیع موازی از اطلاعات حاصل از مانیتورینگ گودی به عمق ۱۲/۸ متر در شیگاگو که سیستم حائل آن سپرکوبی و مهارهای اصطکاکی تزریقی بود، پیشنهادشده است [۱۷].



شکل (۲-۲۲) منحنی هم‌تراز جابجایی جانبی سطح زمین در مرحله ۶ گودبرداری [۱۷].

[۱] Finno

[۲] Roboski



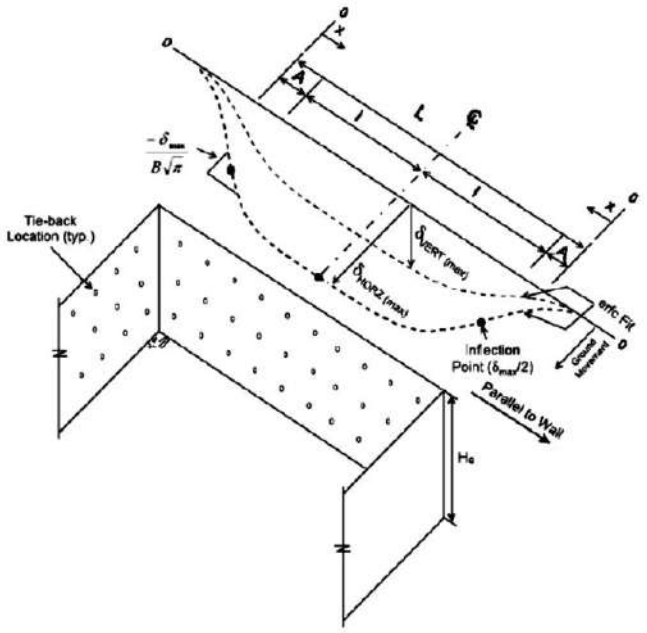
شکل (۲-۲۳) منحنی هم‌تراز نشست سطح زمین در مرحله ۶ گودبرداری [۱۷].

این محققین دریافتند، زمانی که از تابع خطای مکمل (Error Function) استفاده می‌شود، تنها هندسه و پارامترهای جابجایی ماکزیمم، جهت تعریف جابجایی‌های موازی موردنیاز است. تابع مکمل به‌صورت رابطه شماره (۲-۳) بیان می‌شود:

$$\delta(x) = \delta_{max}\left\{1 - \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}\left[\frac{2.8\,(x + L[0.015 + 0.035\ln\frac{H_e}{L}])}{0.5\,L - L\,[0.015 + 0.035\ln\frac{H_e}{L}]}\right]\right\} \qquad (۲-۳)$$

δ_x تغییرشکل جانبی یا نشست در فاصله x از گوشه دیوار است. δ_{Max} حداکثر جابجایی در مرحله مشخصی از گودبرداری در فاصله‌ای از دیوار است که تغییر شکل‌ها به‌صورت موازی با دیوار فرض شده‌اند. L طول گود و H_e ارتفاع گود بوده که در شکل (۲-۲۴) نشان داده‌شده است.

اگرچه رابطه شماره (۲-۳) حاصل مشاهداتی از دیوارهای انعطاف‌پذیر بوده و در ابتدا برای این‌گونه دیوارها پیشنهادشده است، اما روبوسکی و فینو گزارشی را مبنی بر اینکه این رابطه برای دیوارهای سخت‌تر نیز کاربرد دارد، منتشر نمودند.



شکل (۲-۲۴) پارامترهای تناسبی حاصل از تابع خطای مکمل δ_{VERT} نشست و جابجایی جانبی δ_{HORZ} گود [۱۷].

◘ رابطه بین $\delta_{H\,(max)}$ و $\delta_{V(max)}$ و ارتفاع دیواره

در ادبیات فنی عموماً ماکزیمم نشست سطحی زمین $\delta_{V(max)}$ را می‌توان با رجوع به ماکزیمم تغییر شکل جانبی گود $\delta_{H\,(max)}$ تخمین زد. شکل (۲-۲۵) رابطه بین بی‌شینه تغییر شکل جانبی گود را در برابر بی‌شینه نشست سطحی آن نشان می‌دهد. مقادیر ذکر شده برحسب ارتفاع گود نرمال سازی شده‌اند. از روی شکل می‌توان نتیجه گرفت که رابطه $\delta_{H\,(max)}$ و $\delta_{V\,(max)}$ به صورت رابطه شماره (۲-۴) است:

$$\delta_{V\,(max)} \approx 0.5\,\delta_{H\,(max)} \text{ to } 1.0\,\delta_{H\,(max)} \qquad (۴-۲)$$

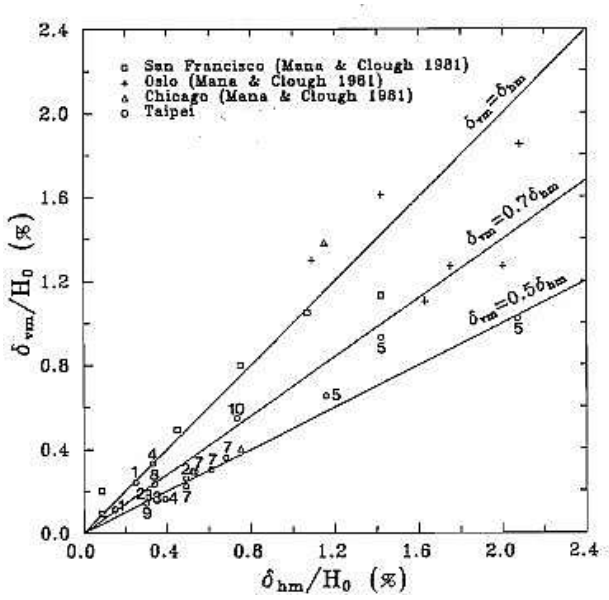
گاسلر[۱] و گودهاس[۲] (۱۹۸۱) و شن و همکاران[۳] (۱۹۸۱) با انجام آزمایش‌های تمام‌مقیاس (Full Scale) به این نتیجه رسیدند که برای دیوارهای میخکوبی شده با L/H (نسبت طول هر مسلح

[۱] Gassler

[۲] Gudehus

[۳] Shen et al.

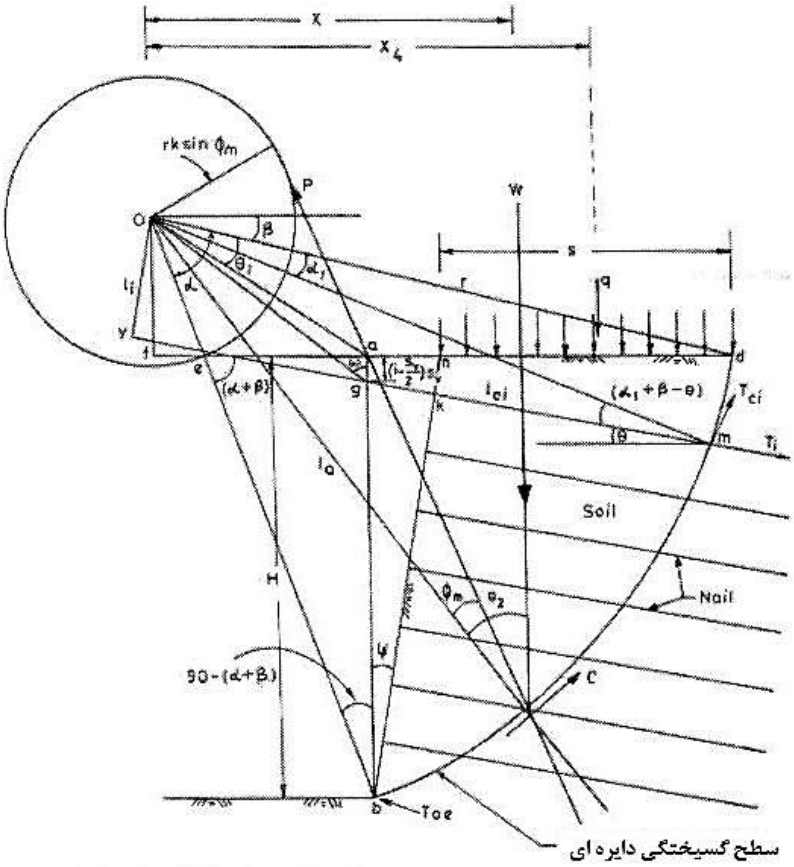
کننده به ارتفاع دیواره) بین ۰/۷ تا ۱ و ضریب اطمینان پایداری حدود ۱,۵ هنگامی‌که سربار‌ی در مجاورت گود قرار نداشته باشد، بیشینه تغییر شکل‌های بلندمدت افقی و قائم گود بین ۰/۱ تا ۰/۳ درصد ارتفاع عمودی گود متغیر خواهد بود [۱۸, ۱۹].



شکل (۲-۲۵) رابطه بین تغییرشکل جانبی و نشست بیشینه سطح زمین [۱۵].

۲-۸-۱۰- میتل (۲۰۰۶)

روش تحلیلی دایره اصطکاک که در شکل (۲-۲۶) نشان داده‌شده است، روش مورداستفاده میتل جهت بررسی پارامترهای مؤثر بر ضریب اطمینان کلی ترانشه های مسلح شده در دیوارهای میخکوبی شده بود [۲۰]. در این مطالعه فرض شده است که پایداری داخلی دیوار میخکوبی شده برقرار است و تنها به بررسی ضریب اطمینان کلی در مقابل شکست کلی پرداخته‌شده است. در این تحقیق نتیجه‌گیری شده است که افزایش زاویه اصطکاک خاک و چسبندگی و نسبت $\frac{L}{H}$ (L طول میخ و H ارتفاع دیوار میخکوبی شده) و افزایش زاویه میخ (حداکثر ۱۵ درجه) موجب افزایش ضریب اطمینان می‌گردد. اما در صورت افزایش زاویه نفوذ به میزان بیشتر از ۱۵ درجه میزان ضریب اطمینان (F.S.) کاهش خواهد داشت.



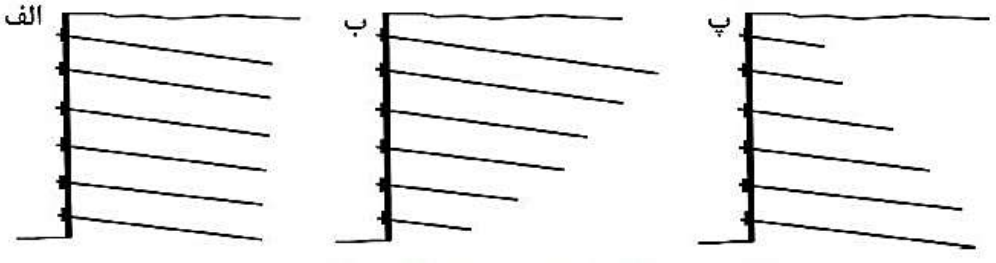
شکل (۲-۲۶) دیوار میخکوبی شده به همراه تمامی نیروهای محرک و مقاوم [۲۰].

علاوه بر پارامترهای فوق، افزایش قطر میخ و همچنین افزایش شیب دیوار با راستای قائم موجب افزایش ضریب اطمینان خواهد شد. در این مطالعه طول مناسب میخ‌خاک حدود 0.8H است. فرضیات در نظر گرفته‌شده در این تحقیق به شرح زیر است:

- کل توده خاک میخکوبی شده به‌صورت همگن فرض شده است و لذا فرض می‌شود دایره لغزش همواره از پنجه شیروانی می‌گذرد.
- ضریب اطمینان چسبندگی (F_C) و ضریب اطمینان زاویه اصطکاک (F_ϕ) با یکدیگر برابر و معادل ۱,۵ در نظر گرفته‌شده است.
- در بررسی تعادل نیروها در راستای قائم، نیروی محوری میخ در نظر گرفته نشده است.
- بررسی صورت گرفته بر اساس تعادل نیروها و گشتاور است.
- مقاومت برشی میخ که ناشی از سختی خمشی آن است نیز در نظر گرفته‌شده است.

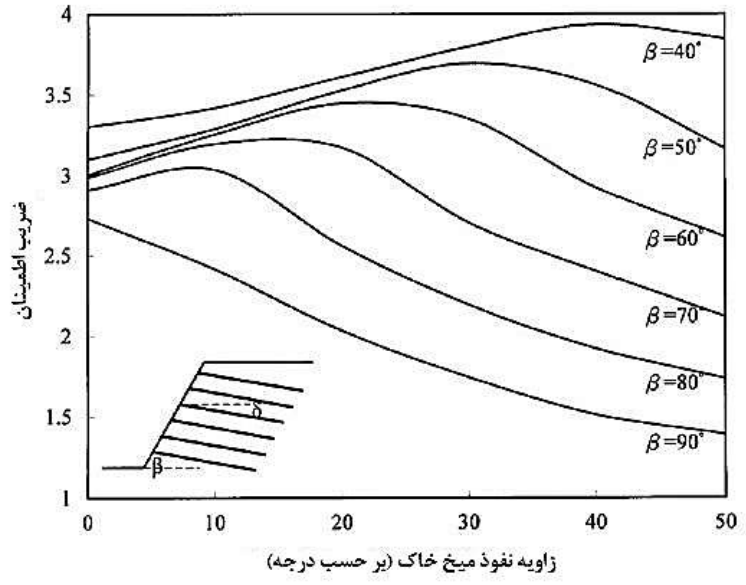
۲-۸-۱۱- فن و لو (۲۰۰۸)

فن و لو در مطالعه خود با استفاده از نرم‌افزار Plaxis2D با هدف یافتن الگوی بهینه برای سیستم مسلح کننده، به بررسی تأثیر سه عامل زاویه نفوذ میخ با افق (δ)، زاویه دیوار با قائم (β) و شیب خاک‌ریز بالای دیوار میخکوبی شده (α)، بر روی رفتار دیوار میخکوبی شده پرداختند [۲۱].
سه الگوی کلی جهت توزیع طولی میخ در ارتفاع دیوار می‌توان ارائه نمود.



شکل (۲-۲۷) شکل شماتیک توزیع طولی میخ خاک در دیوار میخکوبی شده: الف) توزیع یکنواخت ب) کاهش طول میخ خاک با عمق پ) افزایش طول میخ خاک با عمق [۲۱].

نصب میخ‌خاک‌ها بلند در قسمت‌های فوقانی یا تحتانی دیوار از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از آن‌ها درقسمت‌های فوقانی کمک به کنترل میزان تغییرشکل‌های دیواره و استفاده آن‌ها در قسمت‌های تحتانی دیواره کمک به افزایش مقدار ضریب اطمینان می‌کند. از طرفی این نکته مشخص است که با نصب میخ‌خاک به صورت افقی مقاومت برشی بیشتری جهت پایداری توده خاک فراهم می‌شود. طبق این مطالعه برای هر شیب مشخص دیوار با راستای قائم می‌توان یک زاویه نفوذ بهینه ارائه نمود که حداکثر ضریب اطمینان را ایجاد می‌کند.



شکل (۲-۲۸) تأثیر زاویه نفوذ میخ خاک بر روی ضریب اطمینان شیروانی میخکوبی شده با خاک‌ریز افقی [۲۱].

۲-۸-۱۲- سینگ و بابو (۲۰۱۰)

سینگ و بابو با ا ستفاده از مدل سازی عددی و به کمک نرم‌افزار Plaxis2D به مقای سه سه مدل رفتاری موهر-کولمب (MC) ، خاک سخت شونده (HS) و خاک سخت شونده با کرنش کوچک (HS Small) در برر سی رفتار دیوار میخکوبی شده، پرداخته‌اند که در آن اثر مقاومت خم‌شی میخ در نظر گرفته شد که پس‌ازآن اثر مقاومت خم شی و بر شی میخ در دیوار میخکوبی شده تو سط محققین زیادی موردبررسی قرارگرفته است [۲۲]. پس از مطالعه سینگ و بابو محققان زیادی نتایجی مهمی را ارائه نمودند. جوران در مطالعه خود بیان کرد که میخ‌های با شیب نفوذ ۱۰ تا ۱۵ درجه تمایل به دوران دارند و در آن‌ها اثر خمشی باعث بسیج شدن نیروی محوری خواهد شد [۲۳]. اسکلوسر با بررسی نتایج اندازه‌گیری شده پروژه کلوتر فرانسه و ترکیب آن با مشاهدات آزمای شگاهی خود تواند ست به این نتیجه د ست یابد که مقاومت خم شی و بر شی میخ‌خاک حین گسیختگی دیوار بسیج می‌شوند [۲۴]. اما در تحقیق جوول و پدلی و مقایسه بین نتایج مدل ارائه‌شده در تحقیق ژو و یین و داده‌های ثبت‌شده واقعی دیوار میخکوبی شده، آورده شده است که اثر پارامتر خمش در بحث مقاومت بیرون کشیدگی ناچیز است [۲۵, ۲۶].

نتایج مهم حاصل از مطالعه سینگ و بابو به شرح زیر است:

- نوع مدل رفتاری جهت تحلیل دیوار میخکوبی شده استفاده می‌شود تأثیری بر میزان ضریب اطمینان در مقابل شکست در مراحل مختلف گودبرداری ندارد.
- در نظر گرفتن خمش بر روی ضریب اطمینان پایداری کلی چندان تأثیرگذار نیست.
- مدل موهر-کولمب ماکزیمم جابجایی قائم کف گود (Heave) را دو برابر دو مدل رفتاری دیگر پیش‌بینی می‌کند.
- هر سه مدل رفتاری در پیش‌بینی حداکثر نیروی محوری میخ در مراحل حفاری، شبیه هم عمل می‌کنند ولی مدل MC اندکی نیروی محوری را کمتر پیش‌بینی می‌نماید.
- بیشینه تغییر مکان افقی دیوار میخکوبی شده چندان تحت تأثیر خمش میخ نخواهد بود.
- گشتاور خمشی و برشی میخ در نزدیکی سر میخ‌خاک (Head Nail) بسیج خواهد شد و باعث ایجاد انواع خرابی‌ها در پوشش دیوار میخکوبی شده، می‌گردد.

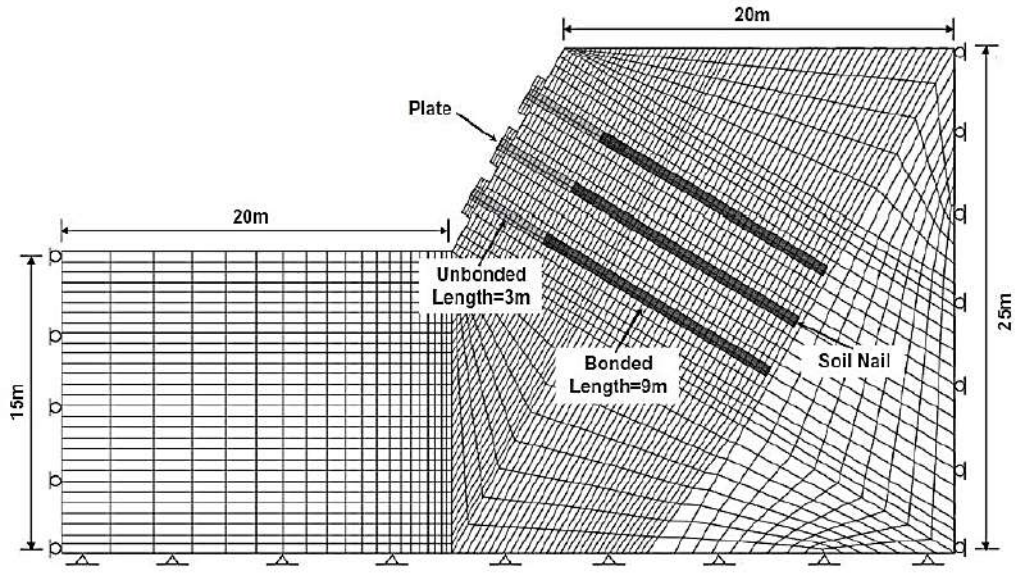
۲-۸-۱۳- ژانگ و همکاران (۲۰۱۱)

در این مطالعه ژانگ و همکاران کنج بیرون زده‌ای با زاویه قائمه را در ایستگاه مترو کیندو شمالی موردمطالعه قراردادند [۲۷]. در مطالعه فوق اثرات زاویه تقاطع و مشخصات مقاومتی خاک بر رفتار تغییر شکلی خاک موردبرر سی قرارگرفته ا ست. این دانشمندان نتیجه گرفتند که، تغییر شکل‌های ایجادشده در محل تقاطع دو دیوار با افزایش زاویه بین دو دیوار کاهش می‌یابد و در این رابطه پیشنهاد نمودند که در طراحی‌ها زاویه‌های کنج‌های بیرون زده در صورت امکان به صورت منفرجه لحاظ شود.

۲-۸-۱۴- کیم و همکاران (۲۰۱۳)

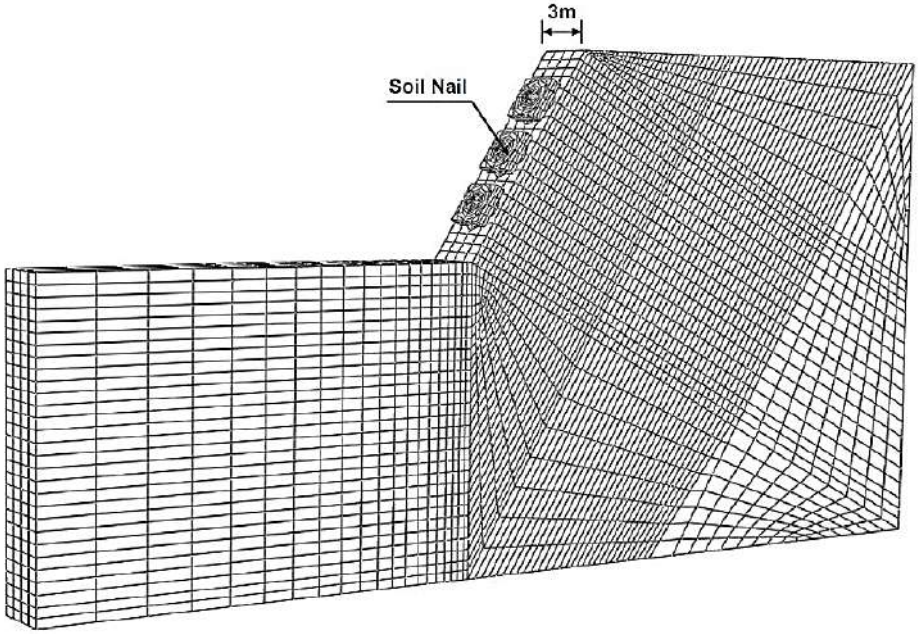
کیم و همکاران در این مطالعه به بررسی تأثیر فشار تزریق بر روی میزان نیروی کششی بسیج شده و ضریب اطمینان شیروانی میخکوبی شده پرداختند [۲۸]. شیروانی موردنظر در سه حالت بدون تسلیح و میخکوبی شده با تزریق تحت وزن و تزریق تحت‌فشار موردبررسی قرارگرفته است. ضریب

اطمینان در سه حالت بر اساس روش کاهش مقاومت برشی[1] به‌دست‌آمده است. روش کاهش مقاومت برشی به‌عنوان روش اصلی جهت بررسی ضریب اطمینان در مدل‌سازی عددی بر پایه اجزاء محدود و تفاضل محدود است که توسط محققین به‌صورت گسترده مورداستفاده قرارگرفته است و بر اصل کاهش مشخصات مقاومتی خاک یعنی چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی خاک تا مرز گسیختگی و عدم همگرایی استوار است [۲۹-۳۱]. در این مطالعه برای مدل سازی عددی از نرم‌افزار Abaqus استفاده‌شده است. برای مدل‌سازی سه‌بعدی از مقطع به عرض ۳ متر استفاده‌شده است. طول میخ‌خاک ۱۲ متر فرض شده است که ۳ متر ابتدایی آزاد و ۹ متر انتهایی به‌صورت تزریق شده است که میخ‌خاک و ورق در مدل سازی عددی به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است.

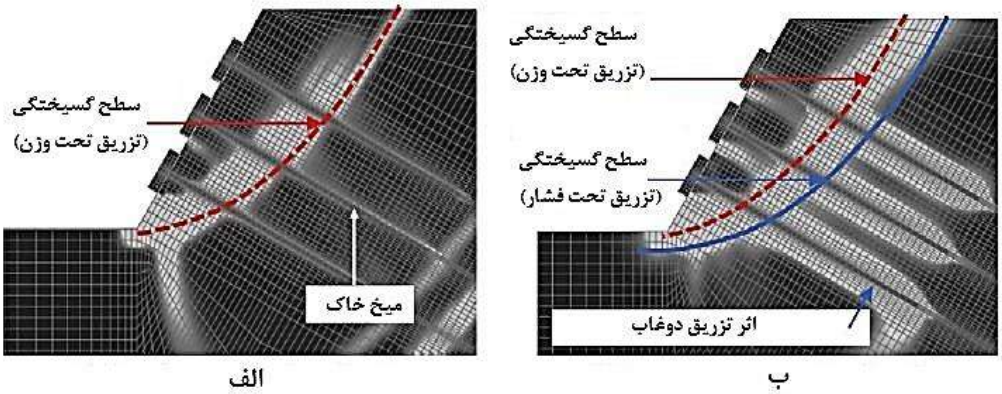


شکل (۲-۲۹) مقطع عرضی شیروانی میخکوبی شده [۲۸].

[1] SRM (Strength Reduction Method)

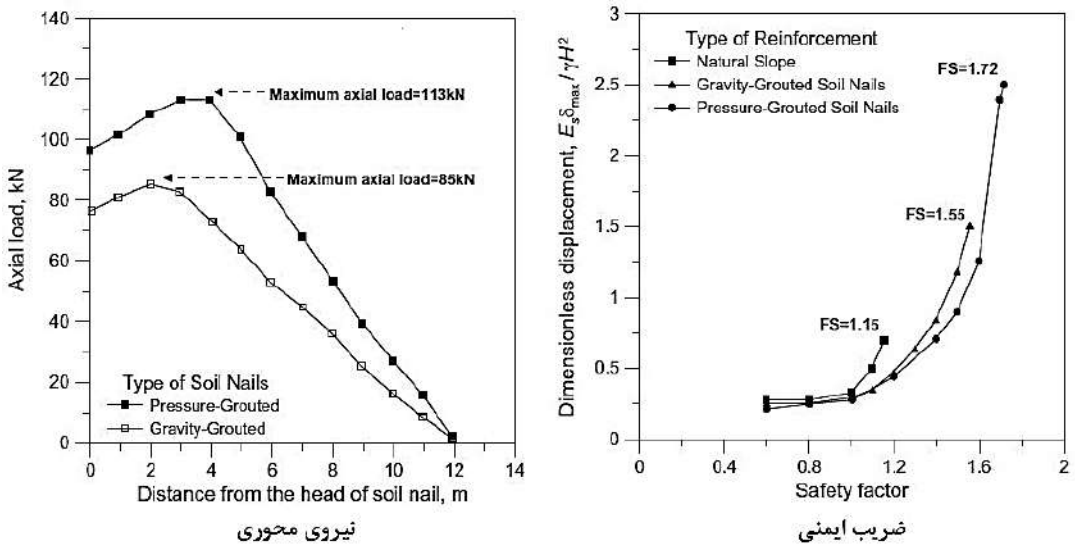


شکل (۲-۳۰) نمای ایزومتریک شیروانی میخکوبی شده [۲۸].



شکل (۲-۳۱) مقایسه سطح گسیختگی بحرانی در شیروانی میخکوبی شده الف) تزریق تحت وزن ب) تزریق تحت‌فشار [۲۸].

مقایسه سطح گسیختگی بر اساس کرنش برشی پلاستیک، بیان می‌دارد که سطح گسیختگی بحرانی در شیروانی میخکوبی شده با تزریق تحت‌فشار، عمیق‌تر از حالت تزریق تحت وزن است و این نشان‌دهنده سختی بیشتر شیروانی میخکوبی شده با تزریق تحت‌فشار است و ضریب اطمینان در حالت تزریق تحت‌فشار حدود ۵۰٪ افزایش‌یافته است.



شکل (۲-۳۲) مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در سه حالت غیرمسلح، تزریق تحت وزن و تزریق تحت‌فشار [۲۸].

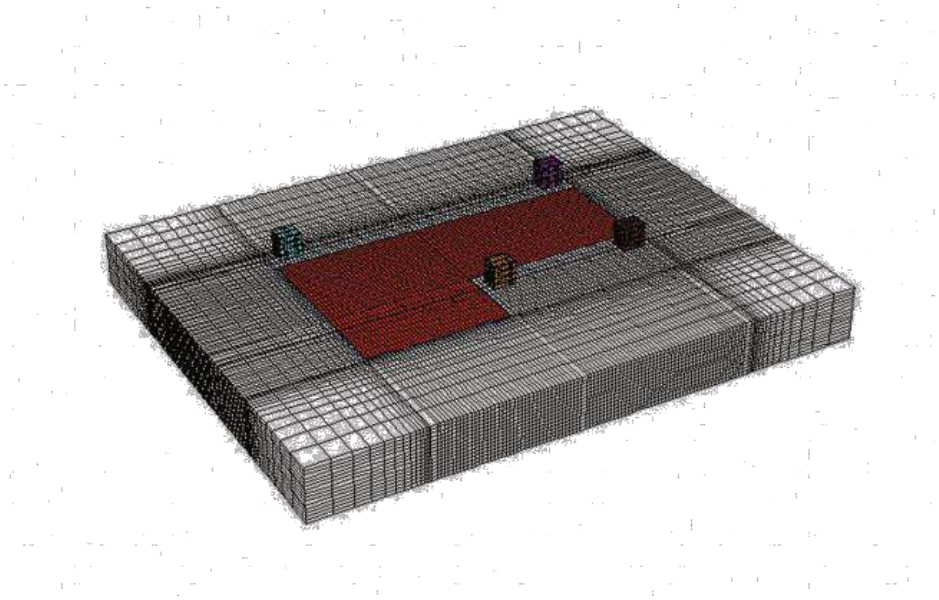
از دیگر مطالعات درزمینه‌ی مدل‌سازی سه‌بعدی شیروانی و دیوار میخکوبی شده می‌توان به تحقیق نیان و همکاران اشـاره کرد که با اسـتفاده از نرم‌افزار Abaqus و به کمک روش کاهش مقاومت به بررسی ضریب اطمینان شیروانی غیرمسلح با هند سه‌های مختلف و تحت شرایط مرزی متفاوت پرداخته‌اند [۳۲]. رسولی و مهیار نیز به بررسی سه‌بعدی دیوار میخکوبی شده ترانشه ورودی یکی از تونل‌های خط دو متروی تبریز در برنامه Plaxis 3D Tunnel پرداخته‌اند [۳۳].

۲-۸-۱۵- ژائو و همکاران (۲۰۱٤)

در این مطالعه که توسـط ژائو و همکاران هدایت‌شـده اسـت به اثر مهم کنج‌های محدب و مقعر بر میزان تغییر شکل‌های گودهای عمیق با هند سه‌ی نامنظم ا شاره شده ا ست [۳۴]. این محققان با مطالعه موردی یک گودبرداری عمیق ایجادشـده در شـهر شـائونگ‌ژینگ[۱] چین به بررسـی میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده در کنج‌های محدب و مقعر این گود که بر روی آن‌ها سازه‌هایی موجود بود پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سازه‌های مجاور بر روی کنج‌های محدب و مقعر

[۱] ShuangXing

تنها تأثیرپذیر از تغییرشکل‌های قائم (نشست‌ها) نیستند و در این کنج‌ها رفتاری پیچشی گونه نیز بر سازه‌ها تأثیر می‌گذارد. این مطالعه نشان می‌دهد که الگوی نشست‌های ایجادشده به‌مانند سطحی سه‌بعدی است و اگر سازه بر روی ناحیه‌ای که اثرات تغییرشکلی ترکیبی نشست و پیچش کنج در آن بیشینه است قرار گیرد موجب ایجاد ترک در آن خواهد شد. در شکل (۲-۳۳) هندسه‌ی مدل شده توسط این محققان که شامل یک کنج بیرون زده با زاویه ۹۰ درجه است نشان داده‌شده است. در این شکل سازه‌هایی مدل شده‌اند که نماینده سازه‌های هم‌جوار با کنج محدب و مقعرند. شایان‌ذکر است که در سازه واقعی اجراشده این گودبرداری از المان‌های افقی فلزی استفاده‌شده است.



شکل (۲-۳۳) مش بندی هندسه مدل‌سازی شده توسط ژائو و همکاران [۳۴]

۲-۸-۱۶- ژائو و همکاران (۲۰۱۶)

در این مطالعه که توسط ژائو و همکاران انجام‌شده است، گودی به ارتفاع ۱۲ متر در شهر هوان وانجیدون[۱] کشور چین توسط نرم‌افزار FLAC3D مدل شده است [۳۵]. علت مدل‌سازی این گودبرداری با نرم‌افزار فوق، پلان نامنظم اجرایی آن است. این دانشمندان در تحقیق خود توصیه

[۱] Wuhan wangjiadun

نموده‌اند که در گودبرداری‌های شهری که اغلب نسبت طول به ارتفاع گودبرداری‌ها مقادیر کوچکی (عموماً زیر ۱۰) است، می‌بایست از مدل نمودن دیواره‌های گودبرداری به‌صورت کرنش مسطح اجتناب نمود. چراکه در این موارد اثرات مضاعف جدارهای همسایه در میزان تغییرشکل‌های نهایی تأثیر زیادی می‌گذارد. از طرفی این محققین در مطالعه خود یک کنج بیرون زده (محدب) را نیز مدل‌سازی نموده‌اند و اذعان داشته‌اند که در مسائل در دنیای واقعی احتمال رخداد هندسه‌های نامنظم بالا است.

۲-۹- نتیجه‌گیری

در فصل جاری به بررسی تحقیقاتی معتبر درزمینه‌ی مقایسه رفتاری دوبعدی و سه‌بعدی دیوارهای میخکوبی شده پرداخته شد. لازم به ذکر است که هدف این تحقیق کنار گذاشتن تحلیل‌های دوبعدی نخواهد بود چراکه این تحلیل‌ها به علت عدم پیچیدگی و صرف زمانی کوتاه برای محاسبات همچنان موردتوجه متخصصان قرار می‌گیرند. به علت پیچیده بودن ماهیت تحلیل‌های سه‌بعدی و بحث‌های اندرکنش خاک و سازه در تحقیقات ارائه‌شده محققانی که قصد مطالعه پارامتریک دیوارهای میخکوبی شده در حالت سه‌بعدی را دارند به بررسی قطعات محدود شده‌ای پرداخته‌اند و لذا در مطالعات پیشین هدفی را که این تحقیق به دنبال آن است موردبررسی قرار نگرفته است و این خود دال بر تازگی این موضوع است. درنهایت هدف این تحقیق این است که اطلاعات حاصل از مدل سازی سه‌بعدی را به‌گونه‌ای قابل‌استفاده ارائه کند که درک عمیق‌تری از رفتار دیوار میخکوبی شده و مکانیسم گسیختگی آن‌ها را در حالت سه‌بعدی در اختیار قرار متخصصان دهد و این امکان را فراهم می‌نماید تا ماهیت رفتار سه‌بعدی دیوارهای میخکوبی شده با شرایط حقیقی و صحیح‌تری مدل شود که درنهایت منجر به تحلیل و طراحی دقیق‌تر می‌گردد که مانع هدر رفت منابع مالی و انسانی خواهد شد.

فصل ۳:

روش تحقیق و معرفی نرم‌افزار

۳-۱- مقدمه

یکی از مطرح‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل المان محدود ژئوتکنیک نرم‌افزار Plaxis است. این نرم‌افزار در سال ۱۹۸۷ در دانشگاه صنعتی دلفت[۱] که از مهم‌ترین دانشگاه‌های هلند و پیشگام درزمینه‌ی فعالیت‌های مدیریت منابع آب در هلند است، ارائه شد. هدف اولیه ارائه این نرم‌افزار تحلیل ساده و المان محدود خاک‌ریزهای رودخانه‌ای بر روی زمین‌های نرم و سست کشور هلند بود. در سال‌های متمادی این نرم‌افزار توسعه‌های بسیار زیادی یافت و در سال ۱۹۹۳ عرضه‌ی تجاری این نرم‌افزار آغاز شد. در سال ۱۹۹۸ اولین نسخه دوبعدی این نرم‌افزار تحت ویندوز ارائه شد و پس‌ازآن در سال ۲۰۰۱ نسخه سه‌بعدی تونل آن و پس‌ازآن نسخه سه‌بعدی تحلیل پی و شمع آن ارائه شد. در این مطالعه جهت بررسی‌های دوبعدی از نرم‌افزار Plaxis2D و جهت مدل‌سازی‌های سه‌بعدی از نرم‌افزار Plaxis3D Foundation استفاده‌شده است. لذا در فصل پیش رو پیش از بیان برنامه مطالعه به شرح خصوصیات اساسی این نرم‌افزارها پرداخته‌شده است.

۳-۲- نسخه دوبعدی نرم‌افزار Plaxis

در برنامه Plaxis2D امکان تحلیل محیط‌های سنگی و خاکی در موارد مختلفی ازجمله شمع‌ها، پی‌ها، دیوارهای حائل و همچنین دیوارهای مسلح شده و میخکوبی شده به‌وسیله‌ی المان‌های مختلف فراهم‌شده است. همان‌گونه که در قسمت‌های گذشته بیان شد درصورتی‌که بتوان بر مسئله‌ای شرایط کرنش صفحه‌ای را اعمال نمود این نرم‌افزار توانایی مدل سازی به صورت کرنش صفحه‌ای[۲] و مدل تقارن محوری[۳] را دارد. برقراری پیش‌شرط‌های تحلیل کرنش مسطح متضمن واقعی‌تر بودن خروجی‌های تحلیل‌ها است پس باید در موقعیت‌های مناسب از این فرضیات که

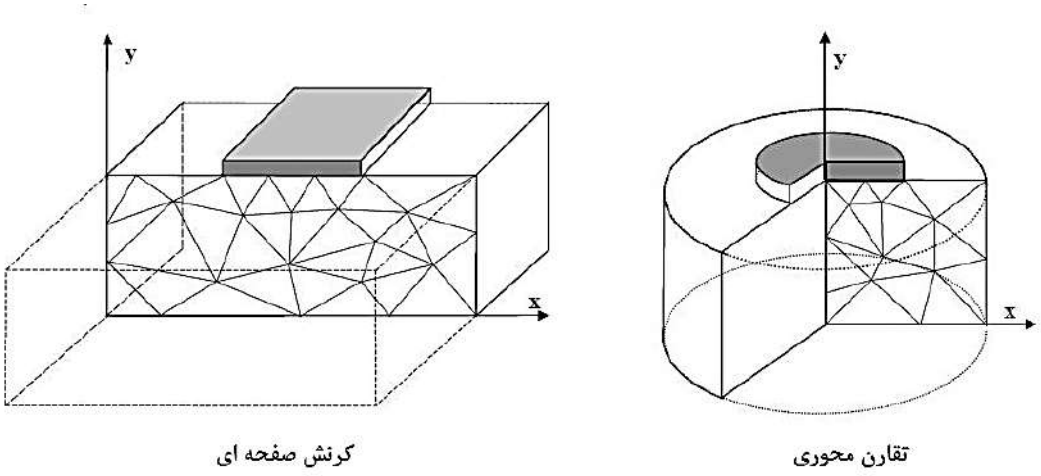
[۱] Delft University of Technology

[۲] Plane Strain

[۳] Axial Symetry

ساده کننده حل مدل هستند استفاده نمود.

مدل تقارن محوری نیز در مواقعی کاربرد دارد که در مدل تقارنی حل یک محور برقرار باشـد برای مثال از این مدل می‌توان در مدل سازی نشست‌های یک پی دایره‌ای و یا یک شمع که نیروها در مرکز آن وارد می‌شوند استفاده نمود. می‌شود [۳۶].

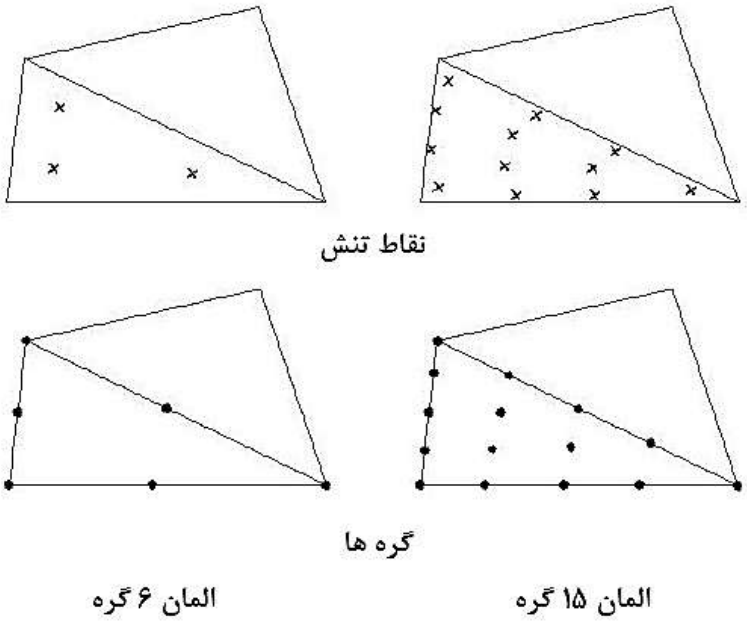


شکل (۳-۱) نمونه‌ای از مسائل کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری

در نرم‌افزار Plaxis2D از دو نوع المان بندی به شکل مثلثی[۱] استفاده می‌شود: المان با ۱۵ گره و ۶ گره. در المان ۱۵ گرهی، ۱۲ نقطه گاوسـین یا همان نقاط تنش[۲] به‌کاربرده می‌شـود و در المان ۶ گرهی، سـه‌نقطه تنش وجود خواهد داشـت. نقاط تنش درواقع نقاطی اسـت که در آن‌ها تنش‌ها و کرنش‌ها در حین تحلیل محاسـبه خواهد شـد و این امکان را به کاربر خواهد داد تا پس از تحلیل به نمودارهای تنش-کرنش در پایان آنالیز دسترسی داشته باشد.

[۱] Triangular Element

[۲] Stress Point



شکل (۳-۲) محل گره ها و نقاط تنش در المان خاک [۳۶]

یکی از پارامترهای مؤثر در نتایج تحلیل‌های عددی انتخاب نوع المان جهت شبکه‌بندی و دقت آن است. ازاین‌رو باید توجه نمود که هر چه نقاط تنش یک المان بیشتر و دقت شبکه‌بندی بیشتر باشد(مش بندی ریزتر باشد)، تحلیل مدنظر زمان‌برتر خواهد بود [۳۷].

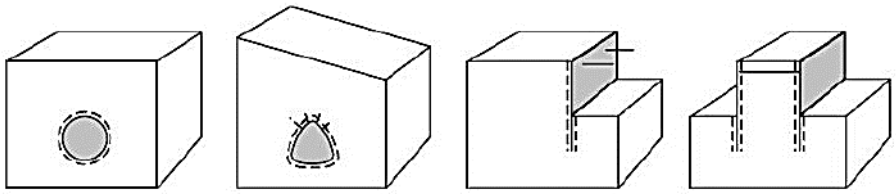
۳-۲-۱- المان Plate

در برنامه Plaxis2D دو المان بسیار مهم المان Plate و Geogrid کاربرد زیادی در مسائل دیوارهای میخکوبی شده دارند.

المان Plate یکی از اجزاء سازه‌ای است که جهت مدل‌سازی سازه‌های لاغر[۱] که دارای یک بعد کوچک نسبت به دو بعد دیگر است، استفاده می‌شود به‌عبارت‌دیگر این المان یک صفحه است که

[۱] Slender

ضخامت ناچیزی دارد. این المان دارای خواص مقاومتی مقاومت خمشی[1] و سختی محوری[2] است و برای شبیه‌سازی سازه‌هایی همچون دیوارهای حائل و صفحات و پوشش‌هایی که در راستای عمق مدل گسترش‌یافته‌اند، مورداستفاده قرار می‌گیرد. در مدل‌سازی دیوار میخکوبی شده المان‌های پوشش شاتکریت با استفاده از ابزار Plate در نرم‌افزار Plaxis2D مدل خواهد شد با استفاده از این المان می‌توان میخ‌خاک را نیز مدل نمود.

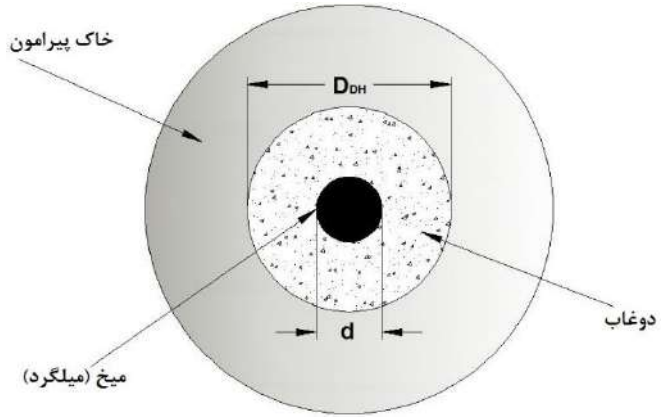


شکل (۳-۳) کاربردهایی از المان Plate و انکر و سطح تماسی در برنامه Plaxis2D [۳۶]

مهم‌ترین پارامترها جهت مدل‌سازی Plate در برنامه، مقاومت خمشی (EI) و سختی محوری (EA) است که برنامه با توجه به این دو داده، یک ضخامت معادل برای المان صفحه محاسبه می‌نماید. نکته قابل‌توجه این است که در نرم‌افزار المان‌های Plate و Geogrid سطح مقطعی مستطیلی با عرض واحد دارند و جهت مدل‌سازی میخ مسلح کننده در سیستم دیوار میخکوبی شده که سطح مقطع دایره‌ای دارد، نیاز به معادل‌سازی پارامترها است. روش رایج اجرای دیوار میخکوبی شده به صورت چال زنی و تزریق دوغاب است، لذا به صورت ایده آل سطح مقطع میخ در کل طول آن می‌تواند به‌صورت شکل (۳-۴) در نظر گرفته شود.

[1] Bending Stiffness

[2] Axial Stiffness



شکل (۳-۴) مقطع شماتیک میخ خاک [۳۸]

مدول الاستیک معادل که در رابطه شماره (۳-۱) نشان داده‌شده است، جهت مدل‌سازی بر اساس مدول الاستیک دوغاب و المان مسلح کننده (میلگرد) و بر اساس اصول مقاومت مصالح با استفاده از رابطه (۳-۲) به دست می‌آید:

$$E_{eq} = E_s\left(\frac{A_s}{A}\right) + E_g(\frac{A_g}{A}) \qquad (۱-۳)$$

در رابطه بالا E_g مدول الاستیک دوغاب و E_s مدول الاستیک مسلح کننده (میلگرد فولادی) است. A مساحت مقطع کلی است که به‌صورت $A = \frac{\pi}{4}D_{DH}^2$ است که D_{DH} قطر چال حفاری‌شده است. A_s مساحت مقطع مسلح کننده است و با رابطه $A_s = \frac{\pi}{4}d^2$ به دست می‌آید که d قطر اجزاء مسلح کننده است و لذا A_g مساحت مقطع دوغاب به‌صورت $A - A_s$ خواهد بود.

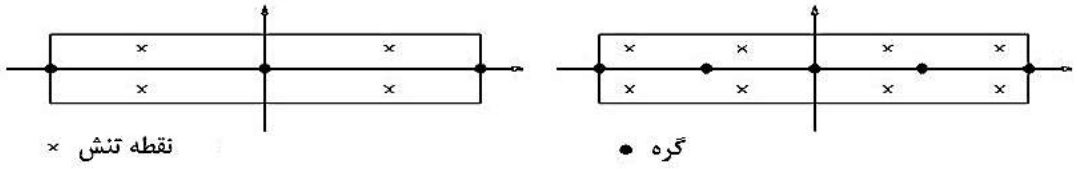
با توجه به مدول الاستیک معادل به‌دست‌آمده جهت تعریف سختی محوری و سختی خمشی به‌عنوان ورودی‌های برنامه Plaxis2D داریم:

$$EA = \frac{E_{eq}}{S_h}\left(\frac{\pi D_{DH}^2}{4}\right) \text{ سختی محوری} \qquad EI = \frac{E_{eq}}{S_h}\left(\frac{\pi D_{DH}^4}{64}\right) \text{ سختی خمشی} \qquad (۲-۳)$$

در رابطه بالا S_h فاصله افقی مرکز به مرکز میخ خاک‌های مجاور است. مش بندی المان صفحه به صورت خودکار تو سط برنامه صورت می‌پذیرد و برای این کار از المان تیر[۱] استفاده خواهد شد.

[۱] Beam

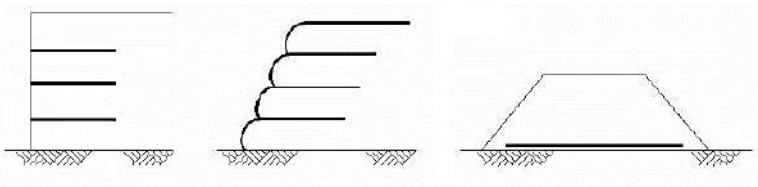
المان تیر دارای دو درجه آزادی حرکتی و یک درجه آزادی دورانی است (u_x, u_y, ϕ_z). المان تیر چنانچه خاک پیرامونی با المان ۱۵ گرهی مدل شود، دارای ۵ گره است و ۴ جفت نقاط تنش خواهد داشت ولی چنانچه المان خاک به صورت ۶ گرهی باشد، المان تیر متناظر دارای ۳ گره و ۲ جفت نقاط تنش خواهد بود. از المان Plate در مدل سازی دیوار میخکوبی شده معمولاً جهت مدل کردن میخ و پوشش شاتکریت استفاده می‌شود.



شکل (۳-۵) گره ها و نقاط تنش در المان تیر ۵ گره و ۳ گره [۳۶]

۳-۲-۲- المان ژئوگرید[۱]

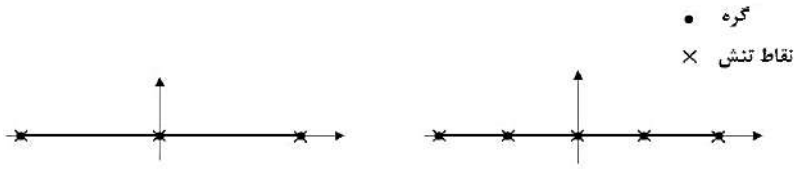
المان ژئوگرید یکی دیگر از اجزاء سازه‌ای موجود در برنامه Plaxis2D است که برای مدل‌سازی دیوار میخکوبی شده مورداستفاده قرار می‌گیرد. این المان زمانی که از مقاومت خمشی میخ صرف‌نظر می‌گردد، جهت مدل‌سازی میخ بکار می‌رود. در اصل المان ژئوگرید سازه لاغری است که تنها دارای مقاومت محوری است و فاقد هرگونه مقاومت خمشی است. ژئوگریدها فقط نیروی کششی را تحمل می‌نمایند و قادر به تحمل نیروی فشاری نیستند. از این المان معمولاً جهت مدل‌سازی سازه‌های خاک مسلح استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از سازه‌های خاکی شامل ژئوتکستایل ها می‌باشند در شکل (۳-۶) آورده شده‌اند که می‌توان آن‌ها را با المان ژئوگرید شبیه‌سازی کرد.



[۱] Geogrid

شکل (۳-۶) کاربردهایی از المان Geogrid [۳۶]

همان‌طور که در بالا اشـاره شـد تنها داده ورودی موردنیاز برای معرفی ژئوگرید، سـختی محوری (EA) اسـت. المان ژئوگرید نیز به‌صـورت خودکار توسـط برنامه مش بندی خواهد شـد و دارای دو درجه آزادی حرکتی (u_x, u_y) اسـت. زمانی که المان خاک پیرامون به‌صـورت ۱۵ گره مدل شـود، المان ژئوگرید دارای ۵ گره خواهد بود و در صورتی‌که المان خاک با ۶ گره مدل شده با شد، المان ژئوگرید دارای ۳ گره خواهد بود.



شکل (۳-۷) گره ها و نقاط تنش در المان Geogrid ۵ گره و ۳ گره

۳-۲-۳- المان Interface

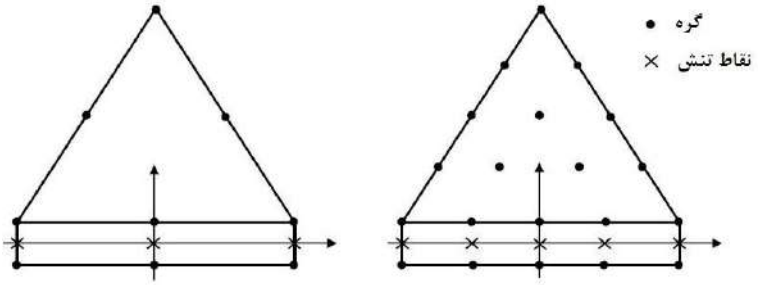
در برنامه Plaxis برر سی اندرکنش بین خاک و سازه با کمک ابزار Interface امکان‌پذیر ا ست. هر سطح تماس تعریف شده در برنامه دارای یک ضخامت مجازی ا ست که جهت تعریف م شخ صات م صالح Interface به‌کاربرده می شود. ضخامت مجازی خیلی بزرگ منجر به تغییر شکل الا ستیک زیاد خواهد شـد. برای تعیین ضـخامت مناسـب المان Interface می‌توان از حاصـل‌ضـرب ضـریب ضـخامت مجازی[۱] در اندازه متوسـط المان‌های مش بندی خاک بهره برد. مقدار ضـریب ضـخامت مجازی به‌صـورت پیش‌فرض برابر ۰,۱ در نظر گرفته می‌شـود که قابل‌تغییر نیز اسـت. برای معرفی میزان زبری و صافی سطح تماس از پارامتر R_{inter} ا ستفاده می شود که در تعریف م صالح اعمال خواهد شد [۳۸]. پارامتر R_{inter} در حقیقت رابطه بین چسبندگی و ا صطکاک سازه (مانند شمع، سپر و ...) و چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک است و به‌صورت رابطه (۳-۳) است.

[۱] Virtual Thickness Factor

$$R_{inter} = \frac{C_{inter}}{C_{soil}} = \frac{\tan \phi_{inter}}{\tan \phi_{soil}} \qquad (۳-۳)$$

چنانچه تماس بین سازه و خاک به‌صورت صلب باشد، $R_{inter} = 1$ در نظر گرفته می‌شود. در رابطه بالا C_{soil} ، ϕ_{soil} زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک مجاور سطح تماس میخ و خاک است و C_{inter} ، ϕ_{inter} زاویه اصطکاک و چسبندگی سطح تماس میخ‌خاک است.

برای بررسی مقاومت تماسی بین میخ و خاک یین و چو یکسری آزمایش بیرون کشیدگی را ترتیب دادند که نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد نسبت $\frac{C_{inter}}{C_{soil}}$ حدود ۰,۸۵ تا ۱,۱۸ است و نسبت $\frac{\tan \phi_{inter}}{\tan \phi_{soil}}$ حدود ۰,۹۵ تا ۱,۰۷ است [۳۹]. همچنین بر اساس مشاهدات ونگ و ریچوین از آزمون‌های صحرایی کشش میخ‌خاک، ضریب اندرکنش بین خاک و نیل بیش از یک است [۴۰]. بنابراین می‌توان به‌درستی برای اغلب مدل‌سازی‌های دیوار میخکوبی شده از $R_{inter} = 1$ بهره برد. در شکل (۳-۸) المان‌های تماسی متصل شده به المان خاک قابل‌مشاهده است. همان‌طور که مشخص است چنانچه المان مش بندی خاک از نوع ۱۵ گره باشد، المان تماسی دارای ۵ جفت گره و چنانچه المان مش بندی خاک از نوع ۶ گره باشد المان تماسی دارای ۳ جفت گره خواهد بود.



شکل (۳-۸) گره ها و نقاط تنش در المان سطح تماس و نحوه اتصال آن به المان خاک [۳۶]

در شکل (۳-۸) المان‌های تماسی دارای ضخامت محدود هستند ولی در فرمول‌بندی اجزاء محدود مختصات هر جفت از گره‌های تماسی، مشترک است و لذا المان تماسی دارای ضخامت صفر خواهد بود.

۳-۲-۴- شرایط مرزی و مدل رفتاری

شرایط مرزی یکی دیگر از عوامل مؤثر بر روی نتایج تحلیل عددی سیستم دیوار میخکوبی شده، است که بایستی به‌درستی انتخاب گردد. علاوه بر فاصله مناسب مرزها، نوع آزادی اعمال شده در مرزهای مدل، در نتایج تحلیل مهم و مؤثر است. در اغلب پژوهش‌های صورت گرفته در دو بعد، یک نوع خاص شرایط مرزی اعمال‌شده است که طی آن تکیه‌گاه جداره جانبی به‌صورت غلتکی است و تنها در جهت عمود بر جداره محدودیت جابجایی دارد و مرز پایین مدل نیز در راستای افقی و قائم در برابر جابجایی بسته‌شده است [۱۴]. این نوع شرایط مرزی در برنامه Plaxis2D با عنوان Standard Fixity معرفی‌شده است که در اغلب مدل‌سازی دیوار میخکوبی شده با برنامه Plaxis2D از همین نوع شرایط مرزی استفاده می‌گردد.

نرم‌افزار Plaxis2D شامل مجموعه مناسبی از مدل‌های رفتاری است که به کاربر امکان می‌دهد تا مناسب‌ترین مدل رفتاری را برای شرایط مختلف و برحسب سازه موردنظر جهت تحلیل و آنالیز شبیه‌سازی خود انتخاب نماید. مدل‌های رفتاری موجود در این برنامه عبارت است از:

- مدل الاستیک خطی (Linear Elastic Model)
- مدل موهر – کولمب (Mohr-Coulomb Model)
- مدل خاک سخت شونده (Hardening Soil Model)
- مدل خاک سخت شونده با کرنش کوچک (HS Small Model)
- مدل خاک نرم (Soft Soil Model)
- مدل خزش خاک نرم (Soft Soil Creep Model)
- مدل Cam-Clay اصلاح شده (Modified Cam-Clay Model)
- مدل سنگ درزه‌دار (Jointed Rock Model)

در بسیاری از مدل‌سازی‌های موجود در ادبیات فنی، به علت سادگی و در دسترس بودن پارمترهای موردنیاز و همچنین سرعت تحلیل، از مدل رفتاری موهرکولمب استفاده‌شده است. ولی مطابق نشریه شماره ۲۵ نرم‌افزار Plaxis، توصیه شده در صورت در دسترس بودن پارامترهای مورد نیاز، به جای مدل موهرکولمب از مدل‌های پیشرفته‌تر همچون مدل خاک سخت شونده استفاده شود [۲۲]. در ادامه به بررسی مختصر این دو مدل رفتاری و پارمترهای ورودی نرم‌افزار جهت تعریف این دو مدل رفتاری پرداخته‌شده است.

۳-۳- مدل موهر – کولمب

یک مدل رفتاری مجموعه‌ای از معادلات ریاضی است که رابطه بین تنش و کرنش را بیان می‌دارد. تمامی مدل‌های مصالح در برنامه Plaxis بر اساس نرخ تنش مؤثر $\dot{\sigma}'$ و نرخ کرنش $\dot{\varepsilon}$ اند [۳۸]. تنش را می‌توان به‌صورت تانسور تنش زیر بیان نمود:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad , \quad \sigma = \sigma' + \sigma_w \qquad (۴-۳)$$

آب هیچگونه تنش برشی را تحمل نمی‌کند، لذا تنش برشی مؤثر با تنش برشی کل برابر خواهد بود. تنش‌های اصلی $(\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3')$ درواقع تنش در مختصات‌هایی است که تنش برشی در آن‌ها صفر است و درواقع همان مقادیر ویژه تانسور تنش بالااند.

در برنامه Plaxis ترتیب تنش‌ها به‌صورت $(\sigma_3' \leq \sigma_2' \leq \sigma_1')$ است. تنش نرمال مثبت بیان‌کننده کشش و تنش نرمال منفی بیان‌کننده فشار است. در کنار تنش‌های اصلی، معرفی برخی از متغیرها که مستقل از مختصات و جهت هستند، مفید به نظر می‌رسد. دو متغیر عبارت است از:

- تنش مؤثر متوسط[۱]:

$$P' = -\frac{1}{3}\left(\sigma_{xx}' + \sigma_{yy}' + \sigma_{zz}'\right) = -\frac{1}{3}\left(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3'\right) \qquad (۵-۳)$$

- تنش برشی انحرافی[۲]:

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\sigma_{xx}' - \sigma_{yy}'\right)^2 + \left(\sigma_{yy}' - \sigma_{zz}'\right)^2 + \left(\sigma_{zz}' - \sigma_{xx}'\right)^2 + 6\left(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2\right)\right]} \qquad (۶-۳)$$

مقادیر تنش‌های مؤثر اصلی را می‌توان بر اساس P' و q نوشت. کرنش‌ها را نیز می‌توان به صورت تانسور و بر اساس مختصات کارتزین به شکل زیر بیان داشت:

---

[۱] Mean Effective Stress

[۲] Deviator Shear Stress

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \qquad (۷-۳)$$

کرنش نرمال منفی بیان‌کننده فشردگی و کرنش نرمال مثبت بیان‌کننده انبساط است. متغیری که معمولاً برای کرنش‌ها تعریف می شود، کرنش حجمی ε_v است که بر اساس رابطه (۳-۸) به دست می‌آید :

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \qquad (۸-۳)$$

۳-۳-۲- رفتار الاستیک کاملاً پلاستیک

اصول پایه الاستو پلاستیسیته بدین‌صورت است که کرنش‌ها و نرخ کرنش‌ها به بخش‌هایی الاستیک و پلاستیک تقسیم‌بندی می‌شوند:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^e + \underline{\varepsilon}^p \qquad \underline{\dot{\varepsilon}} = \underline{\dot{\varepsilon}}^e + \underline{\dot{\varepsilon}}^p \qquad (۹-۳)$$

قانون هوک برای ارتباط دادن نرخ کرنش‌ها به نرخ تنش‌های الاستیک ارائه‌شده است. با جایگزینی رابطه بالا در قانون هوک داریم:

$$\underline{\dot{\sigma}}^e = \underline{\underline{D}}^e \, \underline{\dot{\varepsilon}}^e = \underline{\underline{D}}^e (\underline{\dot{\varepsilon}} - \underline{\dot{\varepsilon}}^p) \qquad (۱۰-۳)$$

پلاستیسیته با توسعه کرنش‌های برگشت‌ناپذیر مرتبط است. جهت ارزیابی رخداد حالت خمیری در محاسبات، تابع تسلیمی بانام f به‌صورت تابعی از تنش و کرنش معرفی می‌شود. تابع تسلیم را می‌توان به صورت سطحی در فضای تنش‌های اصلی نشان داد. یک مدل پلاستیک کامل، مدلی رفتاری است که سطح تسلیم آن ثابت است، به‌عبارت‌دیگر مدل کاملاً پلاستیک مدلی است که کاملاً با پارامترهای مدل تعریف شده و متأثر از تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر (پلاستیک) نیست. برای حالاتی از تنش که در داخل سطح گسیختگی قرار می‌گیرند رفتار کاملاً الاستیک بوده و تمامی کرنش‌ها برگشت‌پذیر است.

بر طبق تئوری کلاسیک پلاستیسیته، نرخ کرنش‌های پلاستیک متناسب با مشتق تابع تسلیم نسبت به تنش‌ها است. این بدان معناست که نرخ کرنش‌های پلاستیک را می‌توان به‌صورت برداری عمود بر سطوح تسلیم نشان داد. این حالت کلاسیک تئوری پلاستیسیته باعث بیش برآورد اتساع می شود. بنابراین علاوه بر تابع تسلیم، یک تابع پتانسیل پلاستیک g نیز معرفی می شود. حالت $g \neq f$ را حالت پلاستیسیته غیرهمراه[1] می‌گویند. عموماً، نرخ کرنش‌های پلاستیک به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\underline{\dot{\varepsilon}}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \qquad (۱۱-۳)$$

λ ضریب پلاستیک است و برای رفتار صرفاً الاستیک مقدار λ برابر صفر است. درحالی‌که برای رفتار پلاستیک λ مثبت است:

$$\lambda = 0 \quad for \qquad f < 0 \quad or \quad \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{\underline{D}}^e \underline{\dot{\varepsilon}} \leq 0 \qquad (۱۲-۳)$$

$$\lambda > 0 \quad for \qquad f = 0 \quad and \quad \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{\underline{D}}^e \underline{\dot{\varepsilon}} > 0 \qquad (۱۳-۳)$$

رابطه‌ی بین نرخ‌های تنش مؤثر و نرخ کرنش‌ها بر اساس تئوری الاستوپلاستیسیته به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\underline{\dot{\sigma}}' = (\underline{\underline{D}}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{\underline{D}}^e) \underline{\dot{\varepsilon}} \qquad (۱۴-۳)$$

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \qquad (۱۵-۳)$$

در این رابطه پارامتر α به صورت یک جمله‌ی شرطی عمل می‌کند. اگر رفتار ماده الاستیک باشد، مقدار α صفر است، درحالی‌که برای رفتار پلاستیسیته، مقدار α یک است.

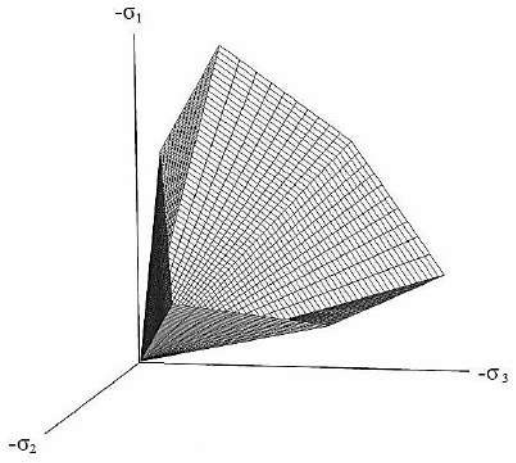
تئوری پلاستیسیته‌ی بیان‌شده در بالا به سطوح گسیختگی نرمی محدودشده و کانتورهای گسیختگی چند سطحی را که در مدل موهرکولمب تعریف می‌شود و در شکل (۳-۹) نشان

[1] Non- associated

داده‌شده است را پوشش نمی‌دهد. برای چنین سطحی تئوری پلاستیسیته توسط کویتر[1] (۱۹۶۰) و دیگران بسط یافته که در آن‌ها توابع پتانسیل پلاستیک بیشتری بکار گرفته می‌شود:

$$\underline{\dot{\varepsilon}} = \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\sigma'}} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\sigma'}} + \cdots \qquad (۱۶-۳)$$

به‌طور مشابهی چند تابع تسلیم شبه مستقل (f_1 , f_2 , ...) جهت تعیین بزرگی ضرایب (λ_1 , λ_2 , ...) استفاده می‌شوند.



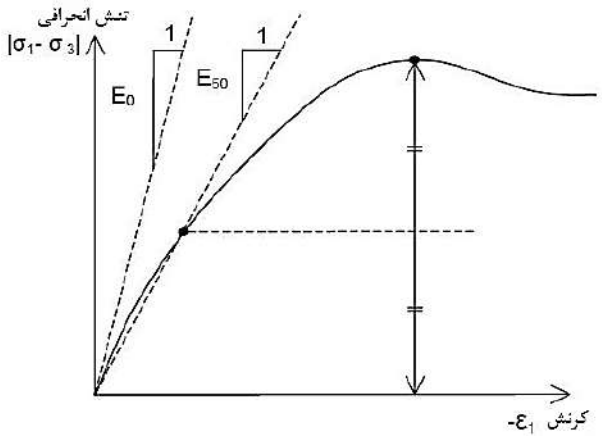
شکل (۳-۹) سطوح تسلیم موهرکولمب در فضای تنش‌های اصلی (c=0) [۳۶]

پارامترهای اساسی جهت تعریف مدل رفتاری موهرکولمب در جدول (۳-۱) آورده شده است. برای انتخاب مقادیر مدول الا ستیک با توجه به شرایط عملیات ژئوتکنیکی و نوع خاک می‌توان از مدول الا ستیک ابتدایی E_0 و یا مدول الا ستیک مما سی E_{50} مطابق شکل (۳-۱۰) ا ستفاده نمود. مقادیر چ سبندگی و زاویه ا صطکاک و زاویه ات ساع را نیز می‌توان با ا ستناد به نتایج آزمایش‌ها ا ستخراج نمود.

جدول (۳-۱) پارامترهای اساسی برای تعریف مدل رفتاری موهرکولمب

پارامتر	مدول الاستیک (E)	ضریب پواسون (ν)	چسبندگی (C)	زاویه اصطکاک (φ)	زاویه اتساع (ψ)
واحد	FL^{-2}	-	FL^{-2}	درجه	درجه

[1] Koiter



شکل (۳-۱۰) E_{50} و E_0 حاصل از نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده [۳۶]

۳-۳-۳- فرمول‌بندی مدل موهر – کولمب

شرط تسلیم موهر کولمب، تعمیم قانون اصطکاک کولمب به حالات عمومی تنش است. در حقیقت، این شـرط تضـمین می‌نماید که از قانون اصـطکاک کولمب در هر صـفحه‌ای در داخل المان ماده پیروی شده است.

شرط کامل تسلیم موهر کولمب متشکل از شش تابع تسلیم برحسب تنش‌های اصلی است که در رابطه (۳-۱۷) است. دو پارامتر پلاستیک مدل که در توابع تسلیم دیده می‌شوند زاویه اصطکاک φ و چسبندگی c می‌باشند. این توابع تسلیم، به همراه یکدیگر مخروط شش‌گوشه‌ای را در فضای تنش‌های اصلی نشان می‌دهند. سطح گسیختگی موهر – کولمب در فضای تنش اصلی $(c = 0)$ در شکل (۳-۹) نشان داده‌شده‌اند.

$$
\begin{aligned}
f_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma_2' - \sigma_3') + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_3')\sin\varphi - c\cos\varphi \le 0 \\
f_{1b} &= \frac{1}{2}(\sigma_3' - \sigma_2') + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_2')\sin\varphi - c\cos\varphi \le 0 \\
f_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma_3' - \sigma_1') + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_1')\sin\varphi - c\cos\varphi \le 0 \\
f_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3') + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')\sin\varphi - c\cos\varphi \le 0 \\
f_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_2') + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_2')\sin\varphi - c\cos\varphi \le 0 \\
f_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma_2' - \sigma_1') + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_1')\sin\varphi - c\cos\varphi \le 0
\end{aligned}
\qquad (۳-۱۷)
$$

علاوه بر توابع تسلیم، شش تابع پتانسیل پلاستیک برای مدل موهر کولمب در رابطه (۳-۱۸) نشان داده‌شده است:

$$
\begin{aligned}
g_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma_2' - \sigma_3') + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_3')\sin\Psi \\
g_{1b} &= \frac{1}{2}(\sigma_3' - \sigma_2') + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_2')\sin\Psi \\
g_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma_3' - \sigma_1') + \frac{1}{2}(\sigma_3' + \sigma_1')\sin\Psi \\
g_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3') + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')\sin\Psi \\
g_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_2') + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_2')\sin\Psi \\
g_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma_2' - \sigma_1') + \frac{1}{2}(\sigma_2' + \sigma_1')\sin\Psi
\end{aligned}
\qquad (۱۸-۳)
$$

توابع پتانسیل پلاستیک، پارامتر پلاستیسیته سومی را در خود گنجانده‌اند که به آن زاویه اتساع، Ψ، می‌گویند. این پارامتر جهت مدل سازی نرخ رشد کرنش‌های حجمی پلاستیک مثبت (اتساع) که در خاک‌های متراکم دیده‌شده است موردنیاز است.

۳-٤- مدل رفتاری خاک سخت شونده[۱]

برخلاف مدل رفتاری موهرکولمب، سطوح تسلیم در مدل HS در فضای تنش‌های اصلی ثابت نیستند، بلکه برحسب کرنش‌های پلاستیک می‌توانند گسترش یابند [۳۸].

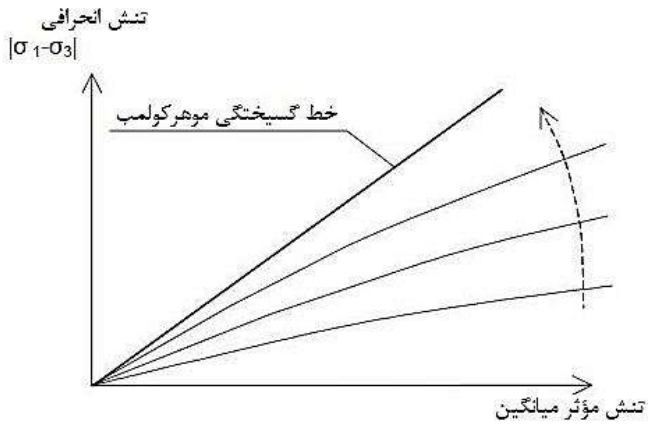
تابع تسلیم کرنش برشی را می‌توان به‌صورت رابطه (۳-۱۹) نوشت:

$$f = \bar{f} - \gamma^p \qquad (۱۹-۳)$$

$\bar{f}$ تابع تنش و γ^p تابع کرنش پلاستیک است و به‌صورت رابطه (۳-۲۰) بیان می‌شود:

$$\gamma^p = -\left(2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p\right) \cong -2\varepsilon_1^p \qquad (۲۰-۳)$$

[۱] Hardening Soil



شکل (۳-۱۱) مکان هندسی سطوح گسیختگی مقادیر مختلف پارامتر سخت‌شوندگی γ^p در مدل رفتاری HS

دو حالت سخت‌شوندگی را می‌توان در نظر گرفت، سخت‌شوندگی برشی و سخت‌شوندگی فشاری. سخت شوندگی بر شی جهت مدل کردن کرنش برگ‌شت‌ناپذیر تحت بارگزاری انحرافی اولیه به کار می‌رود و سخت‌شوندگی فشاری برای مدل کردن کرنش پلاستیک برگشت‌ناپذیر ناشی از فشردگی در بارگزاری اودومتری و بارگزاری ایزوتروپیک است. هر دو حالت سخت‌شوندگی در مدل HS حضور خواهد داشت.

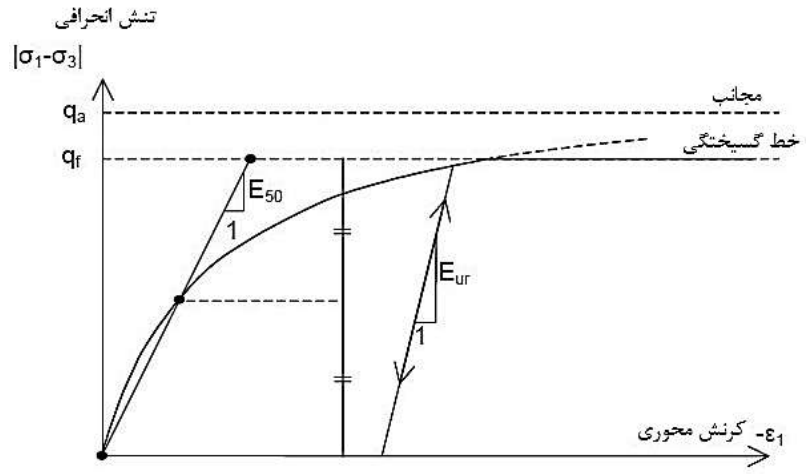
مدل HS با استفاده از تئوری پلاستیسیته و همچنین در نظر گرفتن اتساع خاک و معرفی سطح تسلیم Cap به‌صورت مدل‌هایپربولیک است. یکی از ویژگی‌های اساسی مدل HS ارتباط بین سختی‌خاک و تنش است. فرض اصلی جهت فرمول‌بندی مدل سخت شونده بر اساس رابطه هایپربولیک بین کرنش قائم و تنش انحرافی (q) در بارگزاری سه محوری است. بر اساس نتایج آزمایش سه محوری زهکشی شده رابطه شماره (۳-۲۱) به دست می‌آید:

$$-\varepsilon_1 = -\varepsilon_1^e - \varepsilon_1^p = \frac{1}{E_i}\frac{q}{1-\frac{q}{q_a}} \qquad for \quad q < q_f \ , \ \varepsilon_v^p = 0 \qquad (۲۱-۳)$$

در معادله فوق تنش و کرنش فشاری منفی در نظر گرفته شده است. E_i سختی اولیه است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2-R_f} \qquad (۲۲-۳)$$

q_f تنش انحرافی نهایی است. q_a نیز مجانب مقاومت برشی است که در شکل (۳-۱۲) نشان داده‌شده است.



شکل (۳-۱۲) رابطه هایپربولیک تنش-کرنش در بارگزاری اولیه آزمایش سه محوری زهکشی شده [۳۵]

E_{50} نیز مدول سختی وابسته تنش محصورکننده در بارگزاری اولیه است:

$$E_{50} = E_{50}^{ref}\left(\frac{c\cos\varphi - \sigma_s'\sin\varphi}{c\cos\varphi + p^{ref}\sin\varphi}\right)^m \qquad (۲۳-۳)$$

E_{50}^{ref} مدول سختی مرجع است که وابسته فشار محصورکننده مرجع p^{ref} است. به‌صورت پیش‌فرض $P^{ref} = 100$ بر اساس واحد تنش، در نظر گرفته می شود. سختی واقعی وابسته تنش اصلی σ_3' هست که همان فشار محصورکننده در آزمایش سه محوری است. m نیز توانی است که میزان وابستگی به تنش را بیان می‌دارد و مقادیر بین ۰,۵ تا ۱ دارد ($0.5 \le m \le 1$).

مقادیر q_a و q_f به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$q_f = (c\cot\varphi - \sigma_3')\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \qquad (۲۴-۳)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \qquad (۲۵-۳)$$

همانطور که مشاهده می‌شود q_f بر اساس پارامترهای موهرکولمب تعریف می‌شود و چنانچه $q = q_f$ باشد، پارامترهای گسیختگی فراهم شده است و تسلیم پلاستیک کامل رخداده است که می‌تواند با مدل موهرکولمب توصیف شود.

R_f نسبت تنش است که باید کوچک‌تر از ۱ باشد و در برنامه Plaxis به‌صورت پیش‌فرض برابر

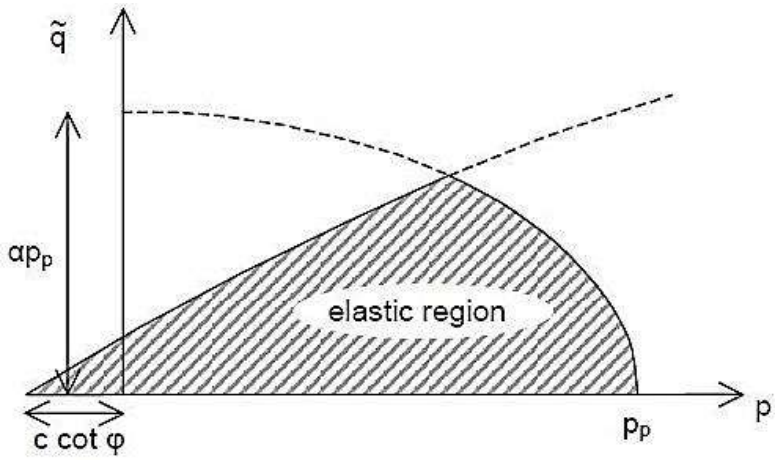
۰,۹ در نظر گرفته‌شده است.

جهت تعریف مسیر باربرداری و بارگزاری مجدد مدول سختی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma_3' \sin\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \qquad (۲۶-۳)$$

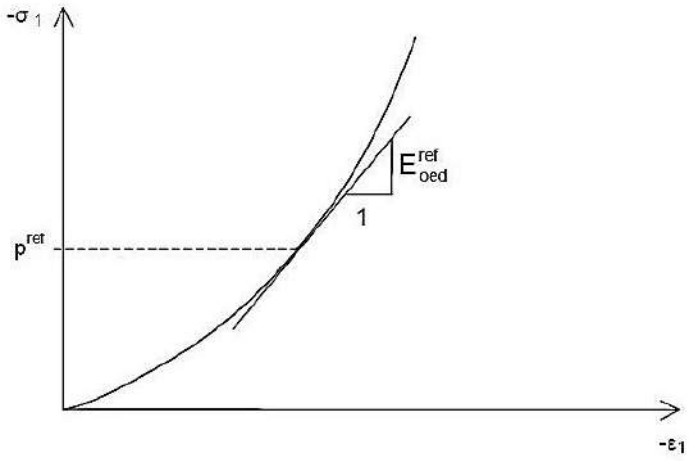
E_{ur}^{ref} مدول یانگ مربوط به بارگزاری و باربرداری مرتبط با فشار مرجع P^{ref} است. در بسیاری از موارد عملی $E_{ur}^{ref} = 3\, E_{50}^{ref}$ است [۳۶].

رابطه (۳-۲۱) و تابع تسلیم معرفی‌شده قادر به اعمال کرنش حجمی پلاستیک، ε_v^p، تحت شرایط فشار ایزوتروپیک نخواهند بود. لذا سطح گسیختگی *Cap* نیز در مدل رفتاری *HS* تعریف‌شده است تا ε_v^p نیز در نظر گرفته شود.



شکل (۳-۱۳) سطح گسیختگی مدل رفتاری HS در صفحه $\boldsymbol{p} - \bar{\boldsymbol{q}}$ [۳۶]

مدول الاستیک اودومتری E_{oed}^{ref} در تعریف پارامترهای سطح گسیختگی *Cap* به‌کاربرده می‌شود که با توجه به آزمایش اودومتری مطابق شکل (۳-۱۴) محاسبه می‌شود.



شکل (۳-۱۴) تعیین E_{oed}^{ref} از نتایج آزمایش اودومتری [۳۶]

پارامترهای اساسی مدل رفتاری HS در برنامه Plaxis به شرح زیر است:

- E_{50}^{ref}، مدول سختی سکانت در آزمایش زهکشی شده سه محوری
- E_{oed}^{ref}، مدول سختی تانژانت برای بارگذاری اودومتری اولیه
- E_{ur}^{ref}، سختی باربرداری / بارگذاری
- m، توان نشان‌دهنده وابستگی سختی به تنش
- C، چسبندگی
- φ، زاویه اصطکاک
- ψ، زاویه اتساع
- ν_{ur}، ضریب پواسون برای باربرداری / بارگذاری
- p_{ref}، تنش مرجع برای سختی
- K_0^{NC}، مقدار K_0 برای تحکیم عادی
- R_{ref}، نسبت گسیختگی $\frac{q_f}{q_a}$

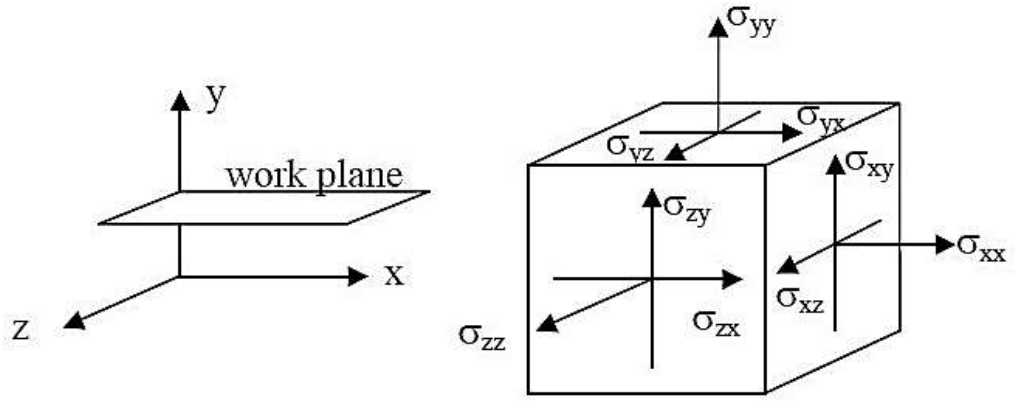
۳-۵- محاسبه تنش برجا در نرم‌افزار Plaxis

در برنامه Plaxis2D جهت معرفی تنش‌های برجا می‌توان از روش معرفی K_0 بهره برد. K_0 همان ضریب فشار جانبی حالت ساکن خاک است. نرم‌افزار با توجه به وزن مخصوص و زاویه اصطکاک لایه‌های مختلف خاک، تنش‌های قائم و افقی خاک را محاسبه می‌کند. نقص این روش در مدل‌هایی که دارای سطح غیر افقی اند (مانند شیروانی‌ها) بروز می‌نماید و در این شرایط، توزیع تنش مناسبی ایجاد نخواهد شد. لذا روشی دیگر برای محاسبه تنش‌های برجا استفاده می‌شود. در این روش در اولین مرحله تحلیل با اعمال نیروی گرانش (Gravity) به کل سازه و با توجه به وزن مخصوص، تنش‌های قائم و افقی محاسبه خواهد شد [۴۱].

۳-٦- نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار Plaxis

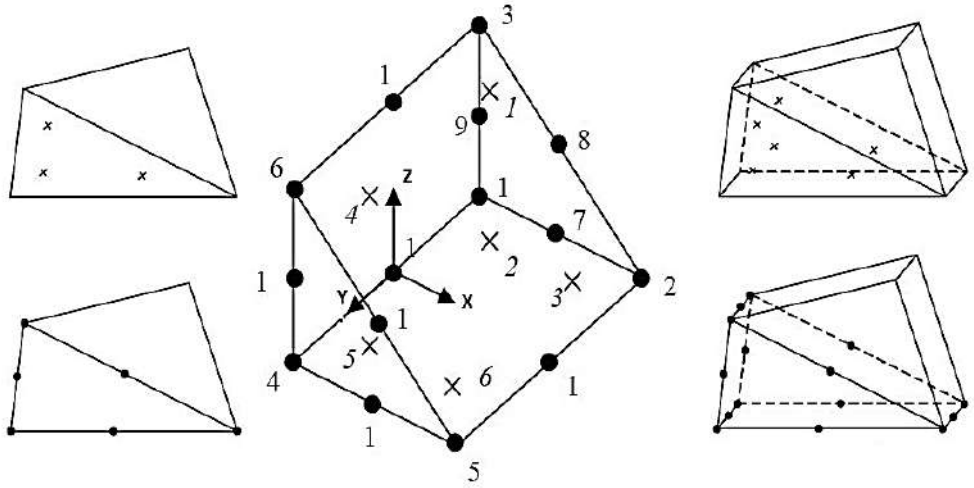
مدل‌سازی سه‌بعدی به‌صورت کلی شامل تعریف هندسه پلان، لایه‌های مختلف خاک در عمق، المان‌های سازه‌ای، مراحل ساخت و خاک‌برداری و همچنین بارگزاری است [۳۸]. در برنامه Plaxis 3D Foundation جهت تعریف هندسه مدل از نمای پلان استفاده می‌شود و پس از تعریف نمای پلان کلی در ترازهای مختلف در عمق خاک به مدل‌سازی سازه‌های موجود ازجمله پوشش شاتکریت و میخ‌خاک پرداخته می‌شود. در این نرم‌افزار می‌توان با ایجاد یک گمانه مطالعاتی خاک لایه‌بندی خاک و عمق آب زیرزمینی را نیز اعمال کرد.

در این نرم‌افزار می‌توان با تعریف مقادیر مختلف عمق سطوح مختلف را ایجاد نمود. از این سطوح می‌توان جهت اعمال بارها، ایجاد سازه‌ها و گام‌های خاک‌برداری استفاده کرد. شکل ۳-۱۵ نمایی از یک سطح تعریف به همراه جهت‌های مختصاتی و تنش‌ها را در برنامه Plaxis 3D Foundation نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۵) سیستم مختصات و مثالی از سطوح تعریف و جهت مثبت تنش‌ها [۴۱]

در این نرم‌افزار به‌صورت خودکار المان بندی مثلثی شش گره بر روی توده خاک و سازه اعمال می‌شود که در حال سه‌بعدی به‌صورت منشور قائم ۱۵ گره‌ای است.

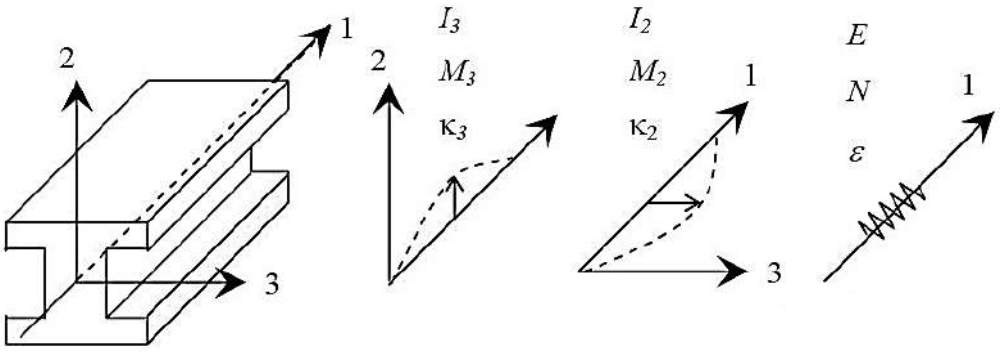


شکل (۳-۱۶) محل گره ها و نقاط تنش در المان ۱۵ گره گوشه [۴۱]

۳-۶-۱- المان سازه ای تیر

در نرم افزار Plaxis3D جهت مدل‌سازی میخ‌خاک می‌توان از المان تیر استفاده نمود. المان تیر یک عنصر سازه‌ای باریک (یک بعدی) است که دارای مقاومت خمشی و محوری است. المان مش بندی تیر شبیه حالت دوبعدی است و شامل سه گره است، ولی در مدل سازی سه‌بعدی هر گره

برخلاف مدل دوبعدی دارای شش درجه آزادی است، سه درجه آزادی انتقالی (u_x, u_y, u_z) و سه درجه آزادی دورانی $(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$



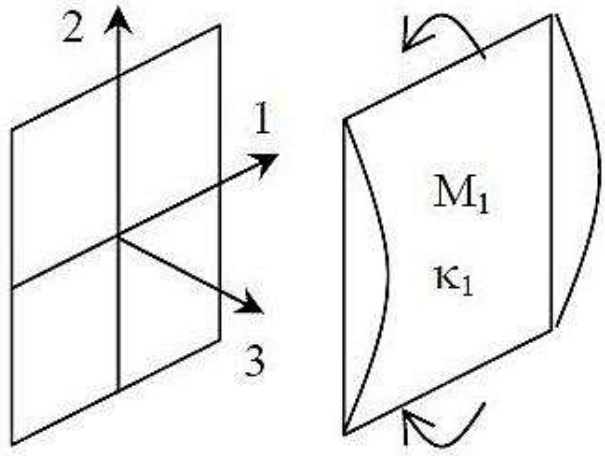
شکل (۳-۱۷) ممان اینرسی I، گشتاور خمشی مثبت M، انحنای مثبت k و سختی E در المان تیر در مختصات محلی [۴۱]

اطلاعات موردنیاز جهت تعریف المان سازه‌ای تیر عبارت‌اند از سطح مقطع A، وزن مخصوص تیر، γ، که در مدل‌سازی‌های صورت گرفته در مطالعه حاضر برابر وزن مخصوص معادل میلگرد فولادی و دوغاب اطراف در نظر گرفته شده است و مدول الاستیک E، که در مدل‌سازی‌های مطالعه حاضر از مدول الاستیک معادل استفاده شده است. جهت تعریف سختی خمشی نیز نیاز به تعریف ممان اینرسی در دو راستای افقی و قائم است که به علت مقطع دایره‌ای میخ‌خاک مقادیر این دو با یکدیگر برابر خواهد بود.

۳-۶-۲- المان سازه ای دیوار

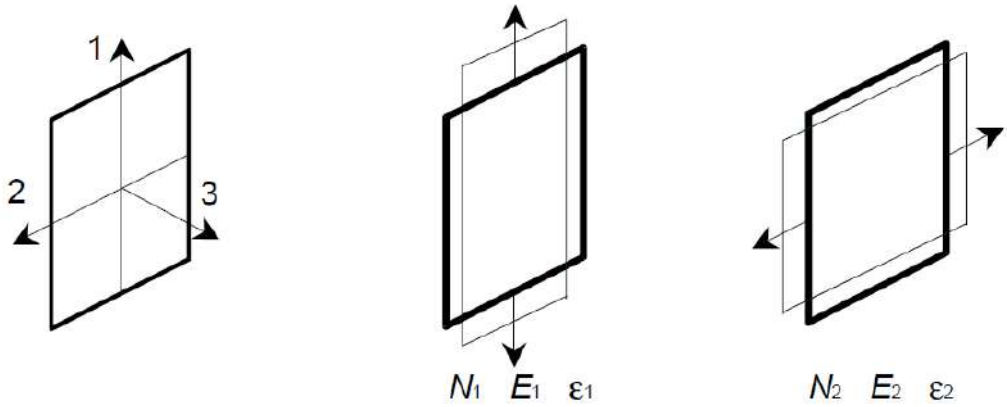
جهت مدل‌سازی اجزاء سازه‌ای باریک عمودی از المان سازه‌ای دیوار[۱] استفاده می‌شود. المان سازه‌ای دیوار در حقیقت به‌صورت صفحه‌ای و دوبعدی است که دارای مقاومت خمشی است. مش بندی المان سازه‌ای دیوار به‌صورت المان صفحه‌ای ۸ گره است و هر گره دارای شش درجه آزادی است، سه درجه آزادی انتقالی (u_x, u_y, u_z) و سه درجه آزادی دورانی $(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$.

[۱] Wall



شکل (۳-۱۸) محورهای محلی و جهت گشتاور خمشی در المان دیوار [۴۱]

در شکل (۳-۱۹) نیروهای محلی محوری مثبت ایجادشده در المان دیوار نشان داده‌شده است. در نرم‌افزار Plaxis سه‌بعدی قرارداد شده است که نیروهای کششی به‌صورت مثبت بیان می‌شوند.



شکل (۳-۱۹) محورهای محلی و جهت نیروی محوری در المان دیوار [۴۱]

جهت تعریف المان سازه‌ای دیوار نیاز به ضخامت دیوار، وزن مخصوص دیوار است. در این مطالعه وزن مخصوص دیوار برخلاف تحقیق کشاورز (۱۳۹۳) که وزن مخصوص دیوار را برابر صفر قرارداده است [۳۸]، وزن مخصوص معادل شاتکریت جهت اعمال در مدل لحاظ شده است. مدول الاستیک و ضریب پواسون نیز از دیگر پارامترهای موردنیاز اند که به‌عنوان ورودی استفاده می‌شوند.

۳-۶-۳- شرایط مرزی

شـــرایط مرزی در مدل‌ســـازی ســـه‌بعدی و در برنامه Plaxis 3D Foundation به مرزهای بیرونی هند سه مدل اعمال خواهد شد و به صورت خودکار و پیش‌فرض نرم‌افزار است، که البته می‌توان به کمک ابزار Line Fixity محدودیت‌های انتقالی موردنظر در هر یک از راســـتاهای x و y و z را به مدل اعمال نمود. شرایط مرزی در حالت پیش‌فرض به‌صورت زیر است:

- مرزهای قائم که بر راســـتای x عمود هســـتند و موازی صـــفحه yz می‌باشـــند، در جهت x محدودیت انتقالی خواهند داشت ($u_x = 0$) ولی در راستای z و y آزادانه جابجا می‌شوند.
- مرزهای قائم که بر راســـتای z عمود هســـتند و موازی صـــفحه xy می‌باشـــند، در جهت z محدودیت انتقالی خواهند داشت ($u_z = 0$) ولی در راستای x و y آزادانه جابجا می‌شوند.
- کف مدل نیز در تمامی جهت‌ها دارای محدودیت انتقالی است ($u_x = u_y = u_z = 0$).
- سطح مدل در تمامی جهت‌ها آزادی انتقالی دارد.

به بیان دیگر تکیه‌گاه جداره جانبی مدل به‌صـــورت غلتکی اســـت و تنها در جهت عمود بر جداره محدودیت حرکتی دارد.

۳-۶-۴- المان تماسی (Interface)

المان تماسی در برنامه Plaxis 3D Foundation با توجه به محل مورداستفاده و چگونگی تماس با وجه المان به‌صـــورت ۸ گره و ۶ گره تعریف می‌شـــود. مانند حالت دوبعدی المان تماســـی در حالت سه‌بعدی نیز دارای ضخامت مجازی است. در مدل‌سازی سیستم میخکوبی به‌صورت سه‌بعدی نیز تماس بین خاک و اجزاء سازه‌ای شامل میخ‌خاک و پوشش شاتکریت به‌صورت کاملاً زبر و ضریب تماســـی R_{inter} برابر یک فرض شـــده اســـت. لازم به یادآوری اســـت که به‌صـــورت پیش‌فرض نرم‌افزار محل تماس بین میخ‌خاک و پوشش شاتکریت در مدل سازی سه‌بعدی را به صورت اتصال صلب لحاظ می‌کند.

۳-۶-۵- مدل رفتاری و انواع تحلیل

برخلاف برنامه Plaxis2D که از مدل‌های رفتاری متنوعی پ شتیبانی می‌کند در برنامه Plaxis 3D Foundation تنها سه مدل رفتاری جهت تعریف مشخصات خاک در دسترس است که عبارت‌اند از مدل رفتاری الاستیک، مدل رفتاری پلاستیک موهرکولمب و مدل رفتاری خاک سخت شونده. تمامی پارامترهای ورودی و اصول و تعاریف مدل رفتاری در برنامه Plaxis 3D Foundation همانند برنامه Plaxis2D است.

۳-۷- اعتبار سنجی نسخه دوبعدی و سه‌بعدی نرم افزار Plaxis

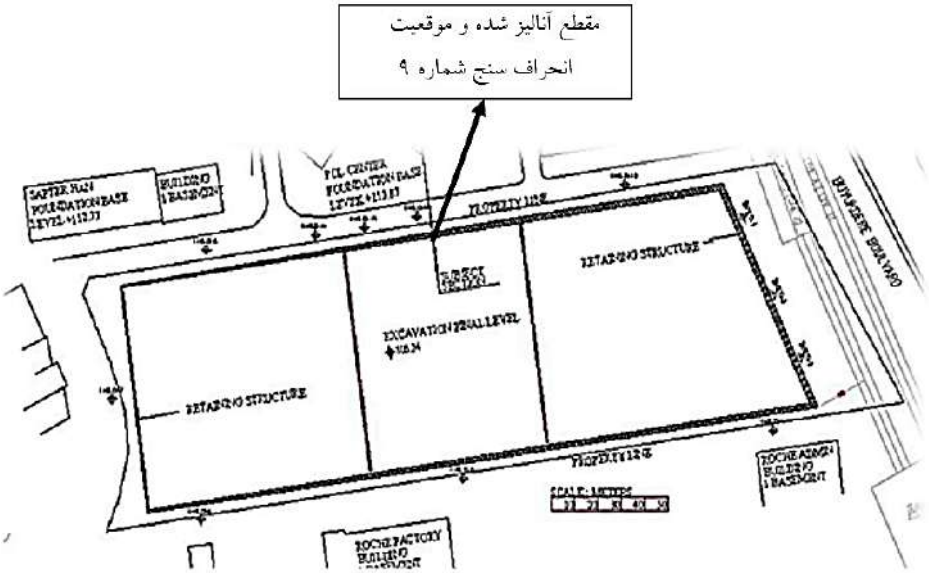
۳-۷-۱- اعتبار سنجی نسخه دوبعدی نرم‌افزار

در این مطالعه نیاز به صحت سنجی نسخه‌های دوبعدی و سه‌بعدی نرم‌افزار Plaxis است. جهت صحت سنجی نتایج تحلیل دیوار میخکوبی شده در نرم‌افزار Plaxis2D، از مطالعه انجام‌شده توسط دورگونوقلو و همکاران (۲۰۰۳)، که به مدل‌سازی دیوار میخکوبی شده پروژه گودبرداری مرکز تجاری استانبول ترکیه پرداخته‌شده است استفاده نمود [۴۲]. در این قسمت جهت صحت سنجی نسخه دوبعدی نرم‌افزار مقایسه، نتایج حاصل از مدل سازی دوبعدی در برنامه Plaxis2D با نتایج ثبت‌شده پایش رفتار تغییرشکلی گود و همچنین نتایج حاصل از مطالعه دورگونوقلو و همکاران مقایسه شده است.

۳-۷-۲- پروژه گودبرداری مرکز تجاری استانبول ترکیه

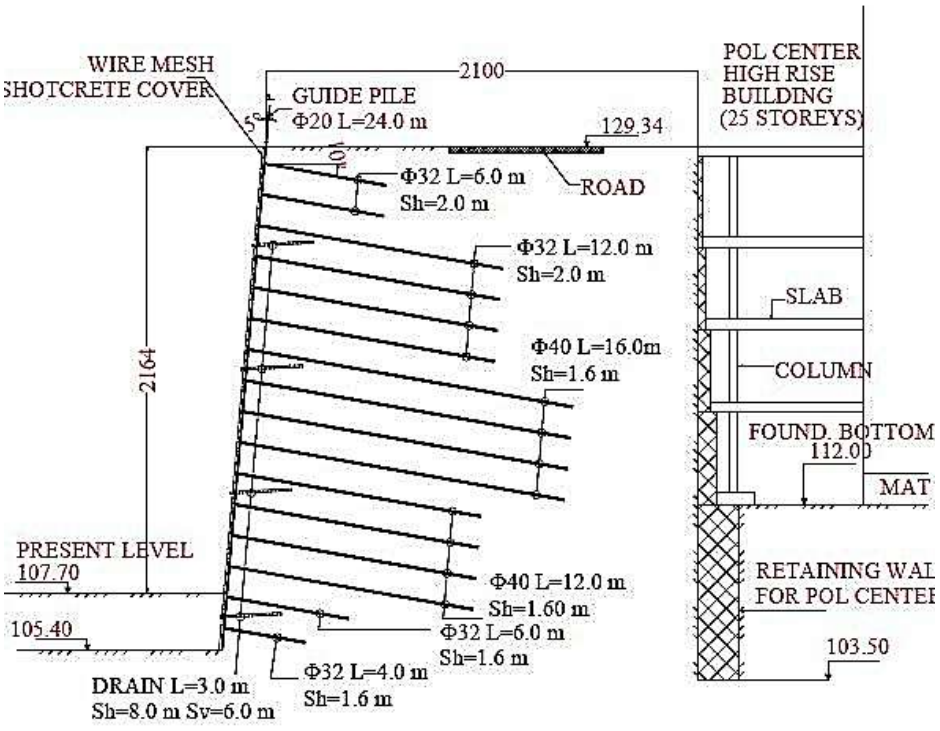
سیستم پایدارسازی دیواره گود پروژه مرکز تجاری استانبول ترکیه که در زمینی به مساحت ۲۳۰۰۰ مترمربع بنا شده، سیستم میخکوبی خاک بوده و عمق گودبرداری در بیشترین مقطع در این پروژه برابر ۲۷ متر است. دورگونوقلو و همکاران در مطالعه خود بر روی رفتار دیوار میخکوبی

شده، با استفاده از نرم‌افزار Flac2D به تحلیل و بررسی مقطع دیوار میخکوبی شده به عمق ۲۱ متر در محل قرارگیری انحراف سنج شماره ۹ در این پروژه پرداخته و نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری را با نتایج مانیتورینگ مقایسه نموده‌اند [۴۳]. رفتار تغییرشکلی گود توسط ابزارگذاری و با استفاده از ۱۴ انحراف سنج موجود در مدت احداث گود ثبت گردیده است. در شکل (۳-۲۰) پلان گودبرداری موردنظر به همراه موقعیت انحراف سنج شماره ۹ نشان داده‌شده است.



شکل (۳-۲۰) پلان گودبرداری و محل استقرار انحراف سنج شماره ۹ [۴۳]

در این پروژه زاویه اجرای میخ‌خاک‌ها نسبت به افق برابر با ۱۰ درجه و فواصل افقی آن‌ها ۲ و ۱/۶ متر و فواصل قائم ۱/۵ متر می باشد. زاویه اجرا شده دیوار شاتکریت نسبت به قائم ۵ درجه است. قطر میلگردهای مورداستفاده در پایدارسازی ۳۲ و ۴۰ میلی‌متر می باشد. طول میخ‌خاک‌ها متغیر و برابر ۶، ۱۲ و ۱۶ متر است. در شکل (۳-۲۷) جزئیات مسلح کننده‌ها در مقطع آنالیز شده نشان داده‌شده است.



شکل (۳-۲۱) نمای شماتیک مقطع دیوار میخکوبی شده در محل استقرار انحراف سنج شماره ۹ [۴۲]

در جدول (۳-۲) خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک ذکرشده است. جنس لایه های خاک عمدتا ماسه سنگ‌های هوازده می باشد.

جدول (۳-۲) مشخصات خاک مطالعه دورگونوقلو و همکاران [۴۲]

υ	E (MPa)	C $(\frac{KN}{m^2})$	$\phi(°)$	γ $(\frac{KN}{m^3})$	$Depth\ (m)$	پارامتر
0.3	75	0	28	19	$0-9$	**CLAY (totally weathered greywacke)**
0.4	180	5	28	20	$9-30$	**GREYWACKE (weak-very weak)**
0.4	250	5	30	20	$30-40$	**GREYWACKE (weak-medium strong)**

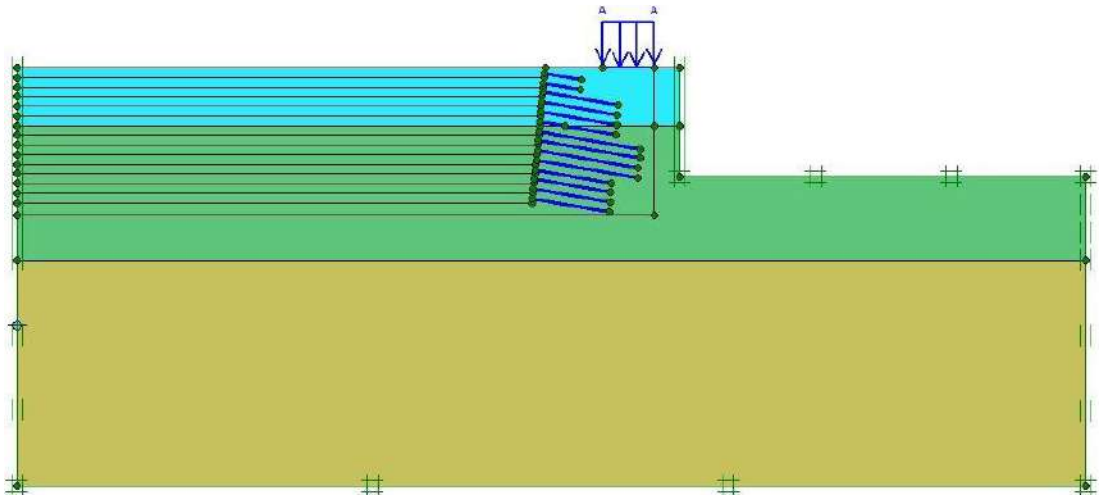
بر اساس خصوصیات ژئوتکنیکی خاک آورده شده در جدول (۳-۲) و مشخصات میخ‌خاک و پوشش شاتکریت آورده شده در جداول جدول (۳-۳) جدول (۳-۴) ، هندسه دیوار میخکوبی شده در مقطع انحراف سنج شماره ۹ که در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده است، در نرم‌افزار اجزاء محدود Plaxis2D مطابق شکل (۳-۲۲) و با در نظرگیری مدل رفتاری خاک سخت شونده، مدل شده است.

جدول (۳-۳) مشخصات میخ‌خاک

قطر میلگرد d(mm)	$S_h\ (m)$	قطر چال D_{DH}(mm)	مدول الاستیک میلگرد E_n(Mpa)	مدول الاستیک دوغاب تزریقی E_g(Mpa)	مدول الاستیک معادل E_{eq}(Mpa)	ضریب پواسون υ
32	**2**	**105**	**200**	**20**	**36.72**	**0.2**
40	**1.6**	**105**	**200**	**20**	**46.12**	**0.2**

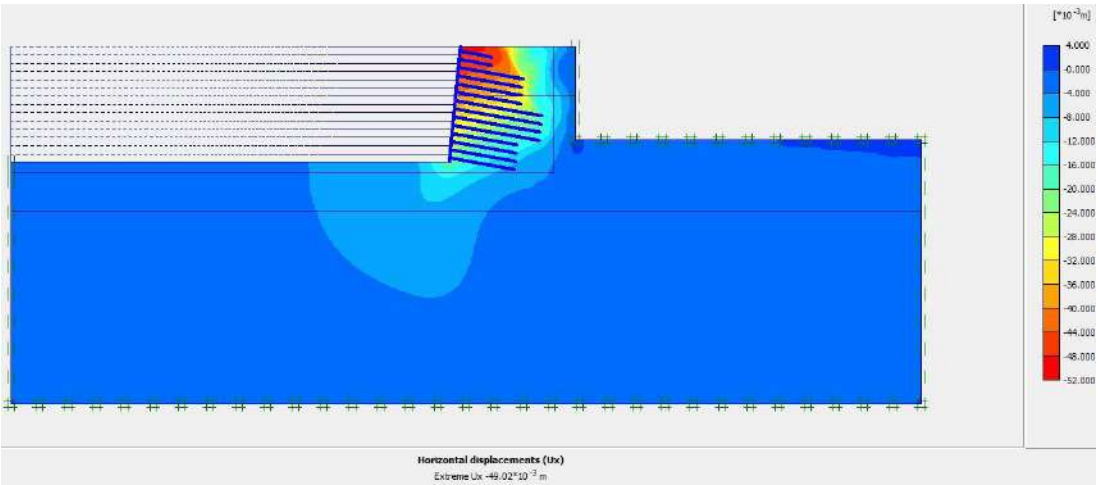
جدول (۳-۴) مشخصات پوشش شاتکریت

ضخامت پوشش t (mm)	مدول الاستیک E_s (Mpa)	ضریب پواسون υ	مقاومت خمشی EI(N.m)	سختی محوری EA(N/m)
100	**50**	**0.3**	$4.17 * 10^6$	$5 * 10^9$



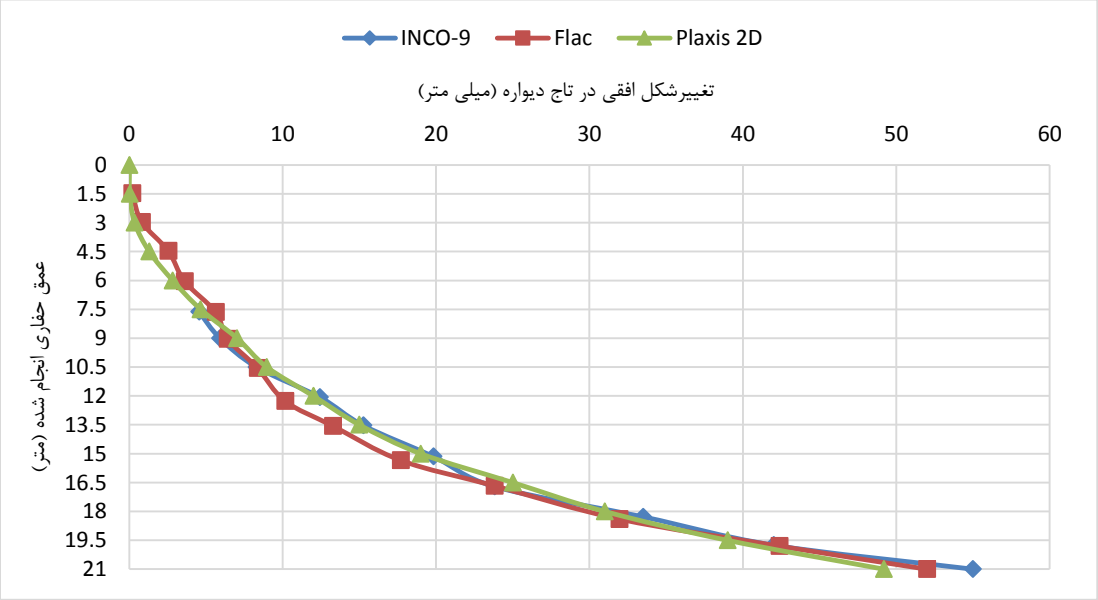
شکل (۳-۲۲) هندسه مدل دیوار میخکوبی شده در برنامه Plaxis 2D

کانتور تغییر شکل افقی دیواره در پایان آخرین مرحله گودبرداری در شکل (۳-۲۳) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشخص است بیشینه جابجایی افقی دیواره در تاج رخداده که مقدار آن برابر با مقدار ۴۹ میلی متر است.



شکل (۳-۲۳) کانتور تغییرشکل افقی در پایان تحلیل

جابجایی افقی ایجادشده در تاج دیوار میخکوبی شده در طی مراحل گودبرداری بر اساس مدل‌سازی با نرم‌افزار Plaxis 2D به همراه داده‌های ثبت‌شده واقعی و همچنین نتایج حاصل از مطالعه صورت پذیرفته توسط دورگونوقلو در شکل (۳-۲۴) قابل‌مشاهده است.

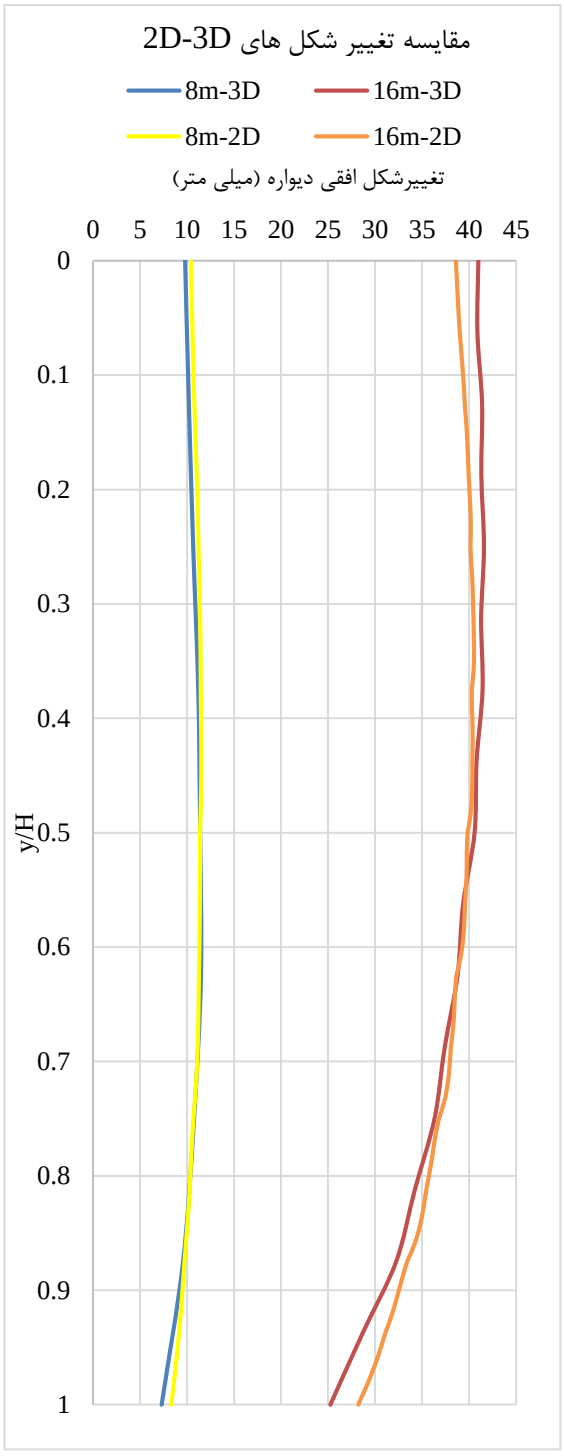


شکل (۳-۲۴) مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی در Plaxis 2D و نتایج مانیتورینگ

همان‌طور که در شکل (۳-۲۴) نشان داده‌شده است نتایج حاصل از آنالیز اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 2D و مدل رفتاری خاک سخت شونده انطباق مناسبی با میزان تغییر شکل‌های واقعی ثبت‌شده دیوار میخکوبی شده دارد.

۳-۷-۳- اعتبار سنجی نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار Plaxis بوسیله نسخه دو بعدی

جهت صحت سنجی نتایج نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار Plaxis می‌توان از نتایج صحت سنجی نسخه دوبعدی آن استفاده نمود. در تحلیل یک دیوار میخکوبی شده تفاوت اصلی که بین این دو نسخه برقرار است در نظر گیری حالت تحلیل کرنش مسطح در نسخه دوبعدی این نرم‌افزار است. جهت صحت سنجی نسخه سه‌بعدی باید مدلی شبیه به مدل ایجاد شده در نسخه دوبعدی ایجاد شود. اجرای تحلیل کرنش مسطح در نرم‌افزار Plasix2D همراه با یک فرض اساسی است آن‌هم اینکه طول دیواره نسبت به دو بعد آن بسیار زیاد است، با شبیه سازی این فرض در نرم‌افزار Plaxis3D می‌توان صحت نتایج تحلیل سه‌بعدی را با نتایج نسخه دوبعدی سنجید. کشاورز ترک (۱۳۹۳) در تحقیق خود با ایجاد یک دیوار طولانی در نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار Plaxis و مقایسه رفتار تغییرشکلی آن با دیوار مدل شده در نسخه دوبعدی نرم‌افزار دریافت که نتایج تحلیل سه‌بعدی یک دیوار با طول زیاد نزدیکی بسیار خوبی با نتایج حاصل از تحلیل کرنش مسطح نرم‌افزار نسخه دوبعدی دارد [۳۸]. شکل (۳-۲۵) نشان‌دهنده مقایسه تغییرشکل‌های دیوار طویل سه‌بعدی با دیوار دوبعدی (با تحلیل کرنش مسطح) در دو دیوار میخکوبی شده با ارتفاع های ۸ و ۱۶ متر است.

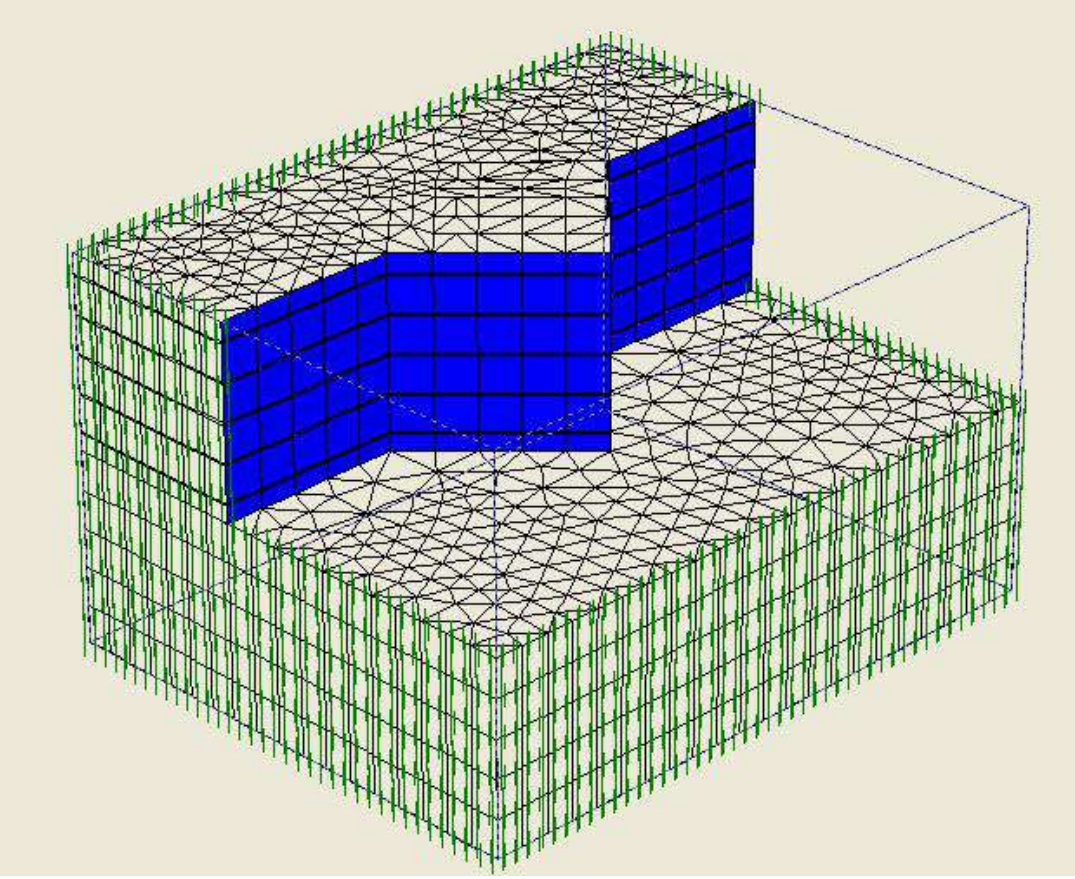


شکل (۳-۲۵) مقایسه تغییرشکل دیوار سه‌بعدی طویل و دوبعدی با ارتفاع های ۸ و ۱۶ متر [۳۸]

همان‌گونه که م شخص ا ست نزدیکی قابل قبولی بین نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی و دوبعدی برقرار است لذا می‌توان به صحت نتایج تحلیل‌های نرم‌افزار Plaxis3D اعتماد نمود.

۳-۸- برنامه و روش تحقیق مدل‌سازی

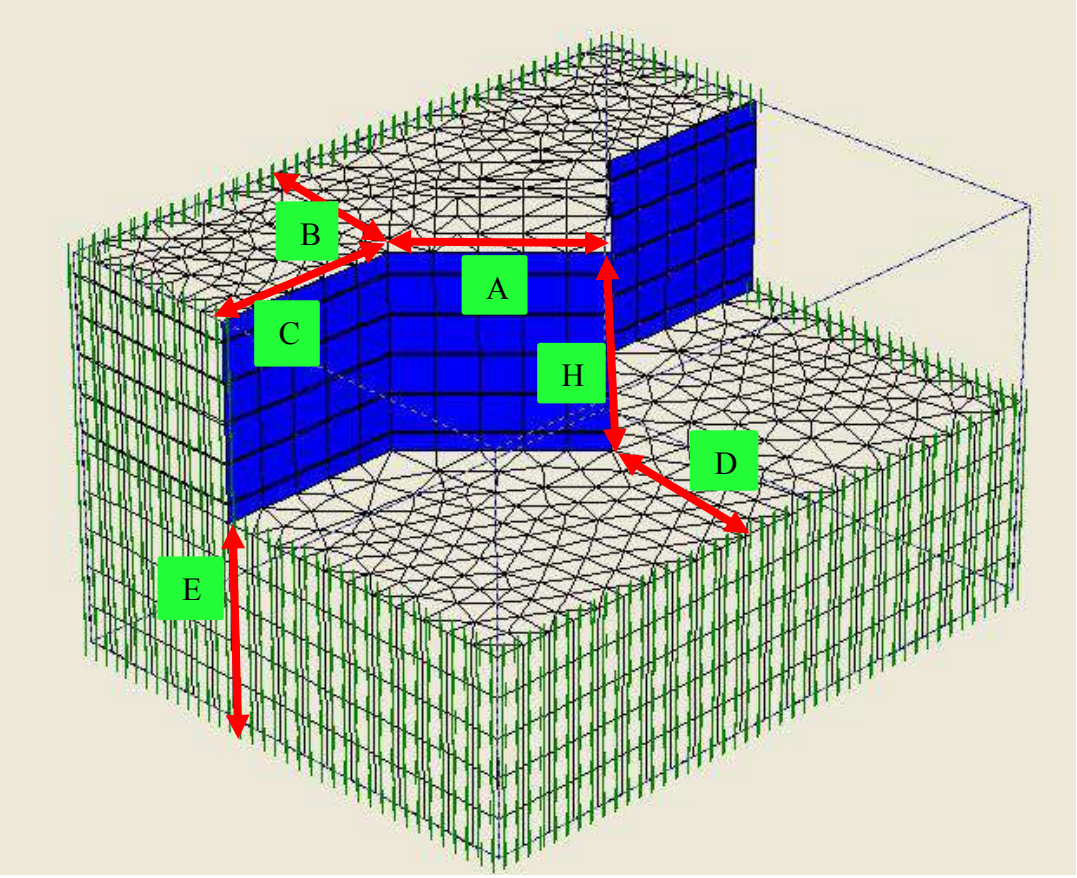
در بخش‌های پیشین ا شاره‌ای به تحقیقات صورت گرفته در موردبرر سی رفتار سه‌بعدی دیوارهای میخ‌کوبی شـــد. این بررســـی نشـــان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای جدی در رابطه با ارزیابی رفتار سه‌بعدی کنج‌های بیرون زده و تأثیر چیدمان میخ‌خاک‌ها بر رفتار آن‌ها صورت نگرفته است. مطالعه حاضر با ایجاد بستر مطالعاتی جدید برای محققان سعی دارد که پیشگام سایر محققین درزمینه‌ی رفتار کنج‌های بیرون زده در گودبرداری‌های پایدار شده توسط سیستم میخ‌کوبی باشد. این مطالعه سعی کرده ا ست در کنار ر سیدن به هدف نهایی خود به سؤالاتی بنیادی که سایر محققان جهت ادامه در این مســـیر به آن نیاز دارند را پاســـخ دهد. بدین منظور طبق ایده‌ای خلاقانه و اولیه کنج بیرون زده‌ای با ارتفاع ۱۰ متر و طول یال های متغییر از ۲ تا ۲۰ متر (2H تا 0.2H) ج هت مدل‌سازی ایجاد شد که شکل (۳-۲۶) نشان‌دهنده‌ی شمایی از کنج مدل شده است. در گام بعدی به تحقیق در رابطه با تاثیر پارامترهای مقاومتی پوشـــش شـــاتکریت و میخ‌خاک و ایجاد طرح بهینه میخ‌خاک‌ها پرداخته‌شده است. یکی از اساسی‌ترین سؤالاتی که برای محققین درزمینه‌ی مدل‌سازی سه‌بعدی پیش می‌آید این ا ست که مرزهای مدل چه فا صله‌ای از مرکزیت مدل دا شته با شند تا اثرات مرزها حذف شود. پاسخ به این سؤال با مدل‌سازی‌های مقایسه‌ای ارائه شده است.



شکل (۳-۲۶) شمای کلی ایده اولیه مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار Plaxis3D

جهت پاسخگویی به سؤال بالا رأس کنج بیرون زده به‌عنوان مرکزیت مدل انتخاب شد چراکه هدف تحقیق بررسی رفتار دیوار میخ کوبی شده در اطراف آن است. بدین منظور سایر ابعاد مدل نشانه‌گذاری شده‌اند. در این نشانه‌گذاری‌ها که هرکدام از نشانه‌ها به‌منزله یک پارامتر متغییر می‌باشند در شکل (۳-۲۷) نشان داده شده‌اند. قرارداد نام‌گذاری هرکدام از ابعاد نشان داده شده به شرح زیر است :

- A : طول یال دیوار یا کنج بیرون زده
- B : فاصله مرز عقب از انتهای یال کنج بیرون زده
- C : طول دیوار هم‌جوار کنج بیرون زده
- D : فاصله مرز جلو از رأس کنج بیرون زده
- E : عمق مدل از کف کنج بیرون زده
- H : ارتفاع کنج بیرون زده



شکل (۳-۲۷) نشانه‌گذاری ابعاد تأثیرگذار بر ایجاد اثرات مرزی بر مدل سه‌بعدی

در اولین گام از تحقیق به برر سی ابعاد B، C، D و E پرداخته شد. مقادیر به‌د ست‌آمده برای این ابعاد فارغ از پارامترهای مقاومتی خاک و المان‌های م سلح کننده می‌تواند در سایر مدل سازی‌های م شابه نیز ا ستفاده شود. م شابه این نوع نتیجه گیری ها در راهنمای طراحی دیوارهای میخ‌کوبی شده اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا نیز ارائه شده است [۳].

۳-۹- جمع‌بندی

در فصل جاری سعی شد که بررسی امکانات نرم‌افزار Plaxis به‌صورت جزئی انجام شود و مختصری از برنامه مدل‌سازی نیز بیان شود. در فصل آتی به شرح دقیق مدل‌سازی‌های صورت گرفته و ارائه نتایج مدل‌سازی‌ها پرداخته خواهد شد.

فصل ۴:

مدل‌سازی عددی، ارائه و تحلیل نتایج

٤-١- مقدمه

در این تحقیق سعی شده است به مدل سازی سه‌بعدی کنج‌های بیرون زده و مطالعه پارامتریک آن‌ها پرداخته شود همان‌گونه که در قسمت‌های پیشین بیان شد در این تحقیق سعی شده است به سؤالات مختلفی در رابطه با رفتار کنج‌های بیرون زده پاسخ داده شود. شرح دقیق سؤال‌ها در ذیل آورده شده است :

١. فواصل مرزهای مدل از مرکز مدل چه مقدار باشد تا اثرات مرزها در مقادیر تغییر شکل های محاسبه شده توسط مدل سه بعدی دیواره کمترین اثر را داشته باشد؟
٢. با افزایش طول یال کنج بیرون زده رفتار این دیوارها دستخوش چه نوع تغییراتی می‌شود؟
٣. چیدمان میخ خاک ها (دو الگوی چینش متقاطع و موازی نیمساز کنج، که در رابطه چگونگی ایجاد آن‌ها در قسمت های آینده پرداخته خواهد شد.) چه تأثیری بر رفتار کنج بیرون زده خواهد گذاشت؟
٤. آیا نسبتی مشخص بین الگوی رفتاری سه‌بعدی کنج بیرون زده و الگوی دیوارهای طویل مشابه مدل شده در حالت کرنش مسطح وجود دارد؟ تغییر شکل های کنج بیرون شده بیشتر از دیوار معادل کرنش مسطح مدل شده ی آن است یا خیر؟؟
٥. کدام یک از الگوهای چینش پیشنهادی می‌تواند جهت کنترل تغییرشکل‌های عملکرد بهتری داشته باشد؟
٦. و به‌عنوان آخرین سؤال آیا مدل‌سازی مصالح در حالت سه‌بعدی با خصوصیاتی مانند خصوصیات مکانیکی اعمال‌شده در حالت دوبعدی صحیحی است ؟

جهت شروع مطالعات ابتدا دیواری با ارتفاع ١٠ متر در نرم‌افزار GeoSlope جهت آنالیز پایداری و ایجاد طرح بهینه میخ‌کوبی مدل شد. سپس در گام بعدی اقدام به تحلیل فواصل همسایگی و بعد از آن به مطالعه پارامتریک رفتاری دیوار میخکوبی شده پرداخته شد.

٤-٢- معرفی مدل و پارامترهای مقاومتی خاک و سایر مصالح

۴-۲-۱- پارامترهای مقاومتی خاک

در ق سمت تحلیل آنالیز پایداری دیواره میخکوبی شده تو سط نرم‌افزار GeoSlope از مدل موهر - کولمب و در مرحله تحلیل آنالیز تغییر شکل در محیط دوبعدی و سه‌بعدی نرم‌افزار Plaxis از مدل رفتاری خاک سخت شونده در کرنش های کوچک استفاده‌شده است.

خاک شماره S-01 با خصوصیات ذکرشده در جدول (۴-۱) به‌عنوان خاک مرجع برای تمامی مدل‌ها انتخاب شد و خاک‌های S-02 و S-03 نیز که متعاقباً خصوصیات مقاومتی آن‌ها نیز ذکرشده به‌عنوان بررسی پارامتریک موردمطالعه قرارگرفته‌اند در ادامه دلیل ایجاد و تعریف پارامترهای خاک S-04 (خاکی با مدول باربرداری بالا) شرح داده خواهد شد.

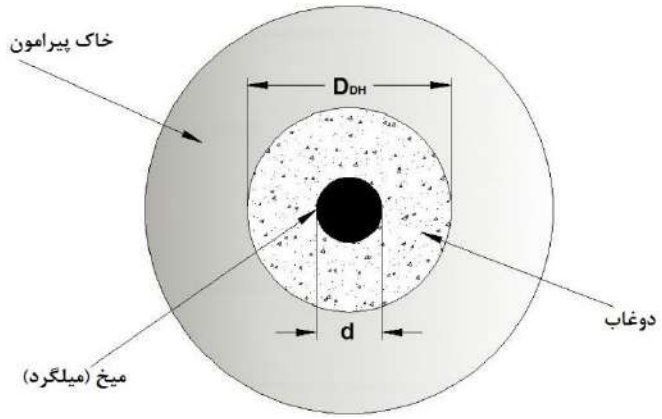
جدول (۴-۱) مشخصات خاک جهت تعریف مدل رفتاری موهر – کولمب و خاک سخت شونده (HS)

S-04	S-03	S-02	S-01	
19	19	19	19	$\gamma\left(\frac{kN}{m^3}\right)$
30	90	60	30	$E_{50}^{ref}(MPa)$
30	90	60	30	$E_{oed}^{ref}(MPa)$
600	270	180	90	$E_{ur}^{ref}(MPa)$
0.5	0.5	0.5	0.5	m
0.9	0.9	0.9	0.9	R_{ref}
37	37	37	37	$\phi(°)$
5	5	5	5	$C\left(\frac{kN}{m^2}\right)$
2	2	2	2	$\psi(°)$
100	100	100	100	$P_{ref}\left(\frac{kN}{m^2}\right)$
0.384	0.384	0.384	0.384	K_0^{NC}
0.35	0.35	0.35	0.35	v_{ur}

در این مطالعه از حضـور آب و متغیر بودن لایه‌های خاک صـرف نظر شـده اسـت چراکه هدف این تحقیق بررسی پارامتریک خصوصیات هندسی مدل است و بررسی شرایط در محل (از قبیل حضور آب زیرزمینی و لایه‌ای بودن جنس خاک) موردتوجه قرار نگرفته است.

۴-۲-۲- خصوصیات مقاومتی مسلح کننده‌ها و پوشش شاتکریت

در این تحقیق سعی شده است که مقادیر مقاومتی میخ‌خاک و شاتکریت تا بیشترین حد امکان به مقادیر واقعی نزدیک باشـد. بنابراین از تکنیک معادل‌سـازی پارامترهای مقاومتی بهره‌گیری شـده است. جهت مدل سازی پارامترهای مقاومتی میخ‌خاک ابتدا یک مقطع میخ‌خاک به صورت ایده آل که در شکل (۴-۱) نشان داده‌شده است،در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۴-۱) مقطع ایده آل میخ‌خاک [۳۸]

در این مقطع قطر میلگرد فولادی برابر ۳۲ میلی‌متر و قطر حفاری برابر ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته‌شده است. کشاورز (۱۳۹۳) در تحقیق خود بیان نمود که می‌توان از وزن المان‌های پوشش و میخ‌خاک صرف‌نظر نموده است [۳۸] اما توصیه می شود که وزن المان شاتکریت و میخ‌خاک در محاسـبات در نظر گرفته شـوند چراکه در مواردی از خرابی های دیوارهای میخ کوبی شـده مشاهده‌شده است که عدم در نظر گرفتن وزن دیوار موجب جداشدگی پوشش از دیواره خاکی شده و به دنبال آن وزن شاتکریت بر میخ‌ها اعمال می شود که این اعمال وزن موجب خرابی دیوار شده است. درروش اجرای میخ‌ها توصیه شده است که حفاری با زاویه‌ای بین ۵ تا ۱۵ درجه انجام شود. دلیل این توصیه بازده بالاتر عملیات تزریق به علت حرکت ثقلی دوغاب در گمانه است. با این وجود

نرم‌افزار Plaxis3D Foundation با این محدودیت روبرو ا ست که به دلیل ایجاد صفحات کاری در اعماق مشخص اجازه ایجاد المان‌ها مسلح کننده شیب‌دار را نمی‌دهد و ازاین‌رو در این تحقیق این توصیه اجرائی نادیده گرفته می شود. مشخصات مقاومتی میخ‌خاک و شاتکریت در جدول (۴-۲) و جدول (۴-۳) آورده شده است.

جدول (۴-۲) مشخصات مقاومتی میخ‌خاک (به‌صورت معادل بین میخ و دوغاب تزریقی محاسبه‌شده است)

مشخصه مقاومتی	علامت (واحد)	مقدار
قطر میلگرد	$d\ (m)$	$32 * 10^{-3}$
قطر گمانه	$D_{DH}\ (m)$	$1 * 10^{-1}$
مساحت میخ‌خاک	$A_g(m^2)$	$7.854 * 10^{-3}$
مدول الاستیسیته میلگرد	$E_s(GPa)$	200
مدول الاستیسیته دوغاب	$E_g(GPa)$	20
مدول الاستیسیته معادل	$E_{eq}(GPa)$	49.994
ضریب پواسون	υ	0.2
وزن مخصوص میخ‌خاک	$\gamma\left(\frac{kN}{m^3}\right)$	32.72
ممان اینرسی مقطع میخ‌خاک	$I(m^4)$	$4.909 * 10^{-6}$

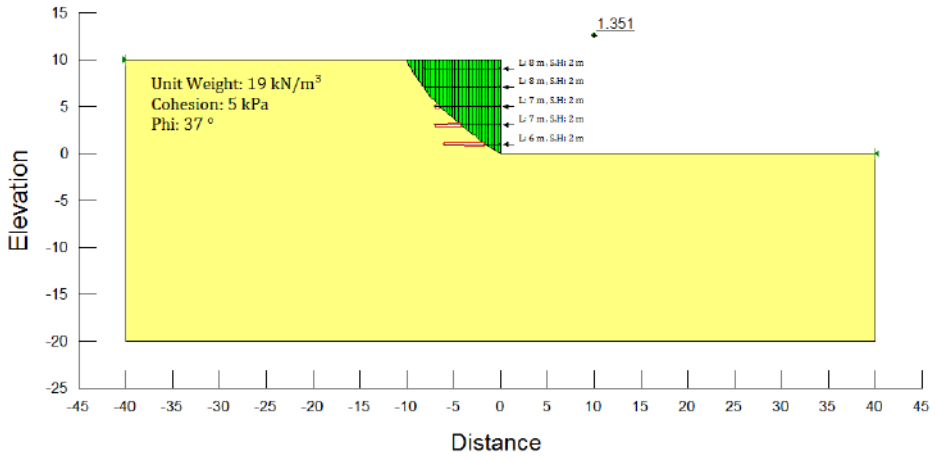
جدول (۴-۳) مشخصات مقاومتی پوشش شاتکریت (به‌صورت معادل بین مش فولادی و بتن پاششی محاسبه‌شده است)

مشخصه مقاومتی	علامت (واحد)	مقدار
ضخامت پوشش	$d\ (m)$	$1 * 10^{-1}$
وزن مخصوص پوشش	$\gamma\left(\frac{kN}{m^3}\right)$	24
مدول الاستیسیته مش فولادی	$E_s(GPa)$	200
مدول الاستیسیته بتن	$E_g(GPa)$	20
مدول الاستیسیته معادل	$E_{eq}(GPa)$	21.35
ضریب پواسون	υ	0.2
مقاومت خمشی	$EI(kN.m^2)$	$1.832 * 10^3$
سختی محوری	$EA\left(\frac{kN}{m}\right)$	$2.198 * 10^6$

٤-٣- گام اول: تعیین آرایش بهینه میخ‌خاک‌ها و محاسبه ضریب اطمینان پایداری توسط نرم‌افزار GeoSlope

بر اساس راهنمای طراحی دیوارهای میخکوبی شده در هر طرح پایدارسازی می‌بایست ضریب اطمینان‌های حداقلی جهت تأمین پایداری‌ها (کوتاه‌مدت و یا بلندمدت) تأمین شوند. لذا هر طرحی که معیار فوق را برآورده کند ازلحاظ فنی قابلیت اجرا را خواهد داشت. با توجه به محدودیت‌های اجرائی و تعدد عوامل تأثیرگذار بر مقادیر ضریب اطمینان می‌توان بی‌نهایت طرح پایدارسازی جهت تأمین ضرایب اطمینان پیشنهادشده ارائه نمود. در این زمینه قلعه‌نوی در سال ۱۳۹۳ با بهره‌گیری از الگوریتم‌های محاسباتی شبکه‌ی عصبی مصنوعی[1] ارائه دهد [۴۴].

مطابق با روش ارائه‌شده این محقق طرح بهینه میخکوبی در نرم‌افزار GeoSlope مورد آنالیز پایداری قرار گرفت و ضریب اطمینان پایداری موقت برای این دیوار تأمین شد. در این طرح فواصل افقی و عمودی میخ‌خاک‌ها برابر ۲ متر در نظر گرفته‌شده است. خصوصیات مقاومتی خاک و میخ‌خاک نیز مطابق آنچه در قبل آورده شد برای مدل سازی استفاده شده است. در شکل (۴-۲) طرح بهینه ایجادشده به همراه ضریب اطمینان پایداری محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار نشان داده‌شده است.



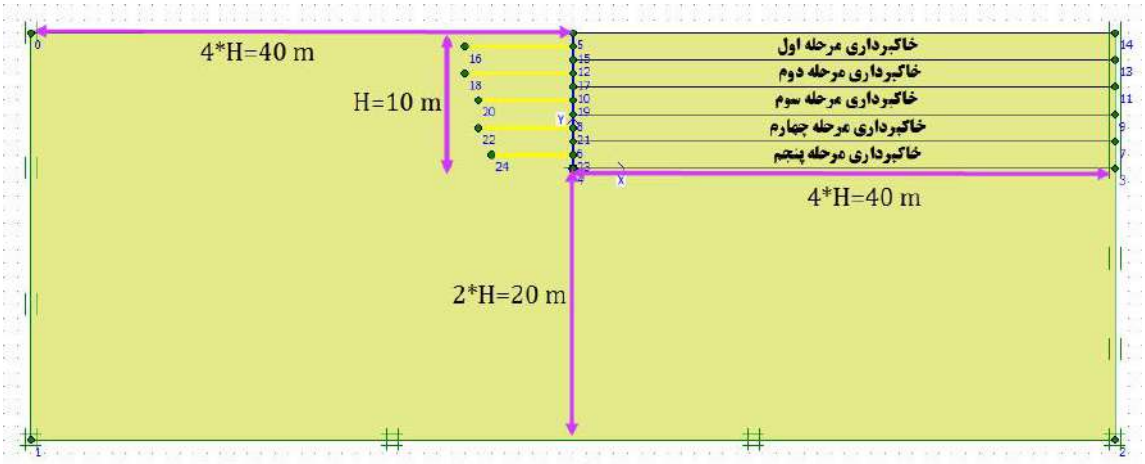
[1] Artificial Neural Network

شکل (۴-۲) سطح لغزش بحرانی در دیوار به ارتفاع ۱۰ متری محاسبه‌شده در نرم‌افزار GeoSlope

طرح میخکوبی بهینه در پنج ردیف با طول‌های دو ردیف اول برابر هشت متر و دو ردیف بعدی برابر هفت متر و ردیف سوم با طول میخ شش متر به‌عنوان طرح مبنا جهت انجام تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی انتخاب شد. در مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار GepSlope و Plaxis2D فواصل مرز عقب و جلو چهار برابر ارتفاع دیوار (4H) و عمق مدل دو برابر ارتفاع دیوار (2H) انتخاب‌شده است.

٤-٤- گام دوم: تحلیل کرنش صفحه‌ای دیوار در نرم‌افزار Plaxis2D

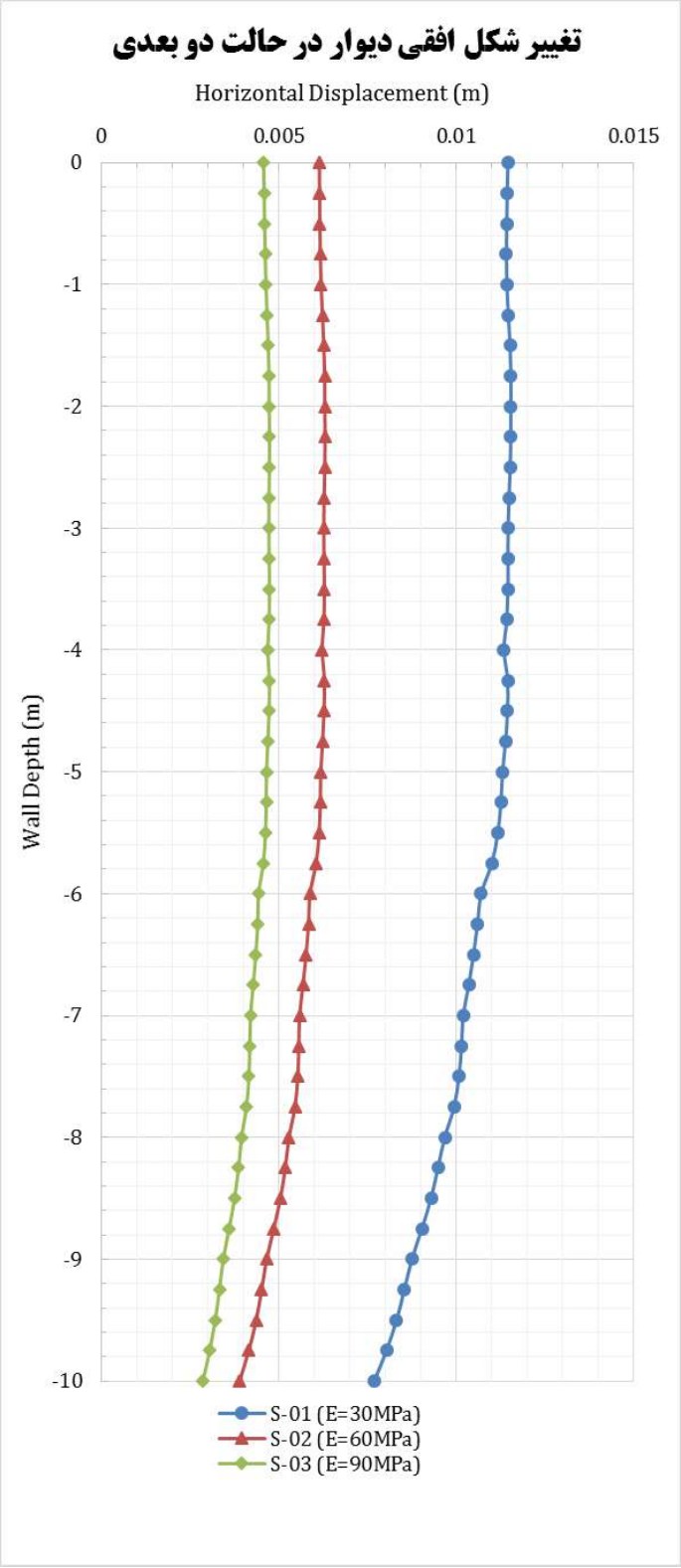
باوجوداینکه هدف این تحقیق بررسی رفتاری کنج‌های بیرون زده در حالت سه‌بعدی است اما در این گام از تحقیق جهت مقایسه نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی با نتایج تحلیل کرنش مسطح نیاز به محاسبه تغییرشکل‌های دیوار در فضای دوبعدی است. جهت اجرای تحلیل دوبعدی ابتدا با استفاده از خصوصیات مقاومتی خاک، میخ‌خاک و پوشش شاتکریت مدلی در نرم‌افزار Plaxis2D ایجاد می شود. در این مدل‌سازی می‌بایست گام‌های خاک‌برداری و ایجاد دیواره نیز به نرم‌افزار معرفی شوند که شکل (۴-۳) نشان‌دهنده هرکدام از مراحل خاک‌برداری است.



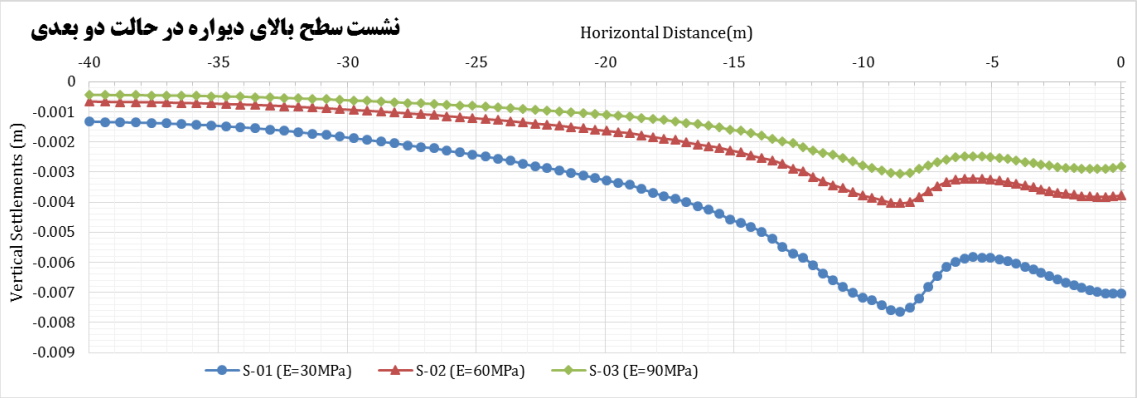
شکل (۴-۳) گام‌های خاک‌برداری در مدل دوبعدی ساخته‌شده در نرم‌افزار

پیش‌تر بیان شد که اساس این مطالعه پارامتریک بر یک نوع خاک (خاک S-01 که در جدول (۴-۱) مشخصات آن ارائه شده است.) پایه گذاری شده است. ازاین‌رو در این قسمت نتایج تحلیل

دوبعدی بر اساس هر سه نوع خاک ارائه‌شده است.



شکل (۴-۴) نمودار تغییرات مقادیر تغییرشکل افقی دوبعدی دیوار میخکوبی شده نسبت به تغییرات خصوصیات مقاومتی خاک



شکل (۴-۵) نمودار تغییرات مقادیر نشست دوبعدی سطح بالای دیواره میخکوبی شده نسبت به تغییرات خصوصیات مقاومتی خاک

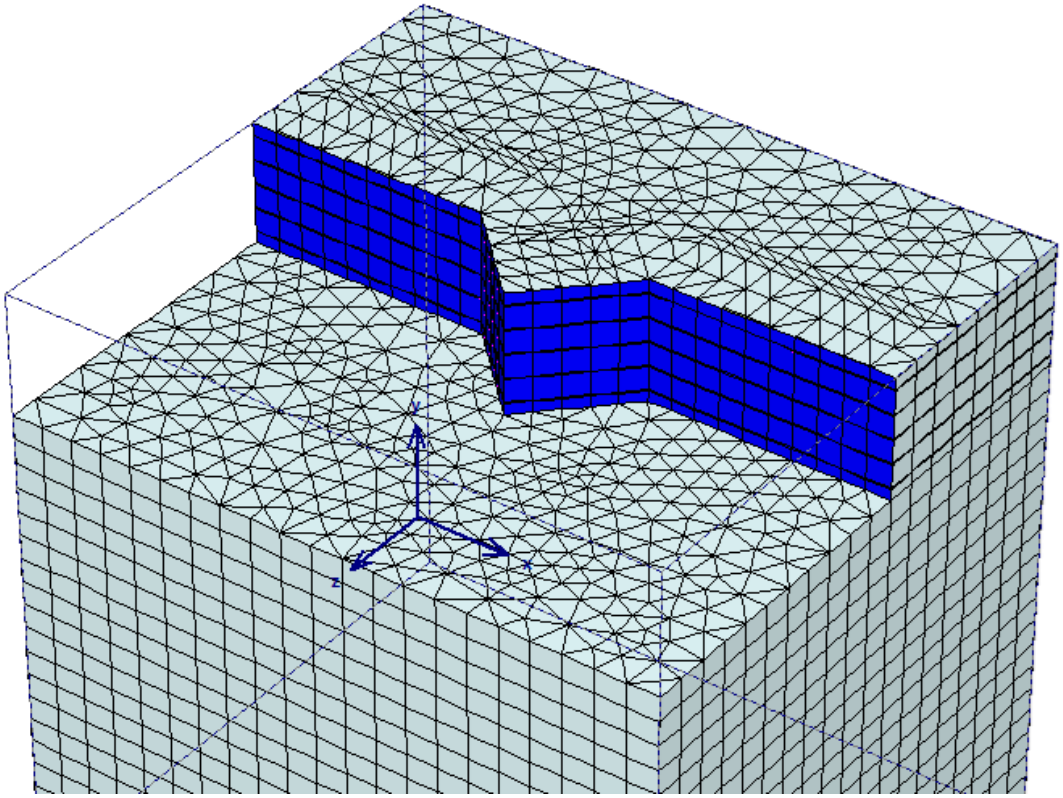
همان‌گونه که ذکر شد تحلیل دوبعدی با فرض حاکم بودن شرایط کرنش مسطح در دیواره و صرفاً جهت ارزیابی میزان تغییرشکل‌های سه‌بعدی (آنچه در واقعیت رخ می‌دهد) انجام‌گرفته‌اند. لذا در گام بعدی شاهد بررسی پارامتریکی که هدف این تحقیق است خواهیم بود. آنچه در شکل (۴-۵) مشاهده می شود با افزایش مدول الاستیسیته خاک میزان تغییر شکل‌های افقی و نشست خاک کاهش می‌یابد. اما باید در نظر داشت که تحت یک باربرداری ثابت، با افزایش مدول باربرداری خاک میزان تورم کف گود کاهش می‌یابد. این نکته کلیدی در ادامه تحلیل‌ها بسیار کارآمد ظاهر خواهد شد.

٤-٥- گام سوم: تحلیل سه‌بعدی رفتار دیوار و مطالعه پارامتریک هندسی در نرم‌افزار Plaxis3D Foundation

در این قسمت که اصلی‌ترین قسمت فصل جاری است به تشریح مدل‌سازی نهایی و ارائه نتایج آن پرداخته خواهد شد.

۴-۵-۱- شرایط اولیه و توضیح شرایط مدل

همان‌گونه که در قسمت‌های گذشته اشاره شد نام‌گذاری ابعاد مختلف مدل به تفضیل در شکل (۳-۲۷) نشان داده شده است. از طرفی در شکل (۴-۶) محورهای سه‌گانه مختصاتی استفاده شده در روند مدل‌سازی نشان داده‌شده است.

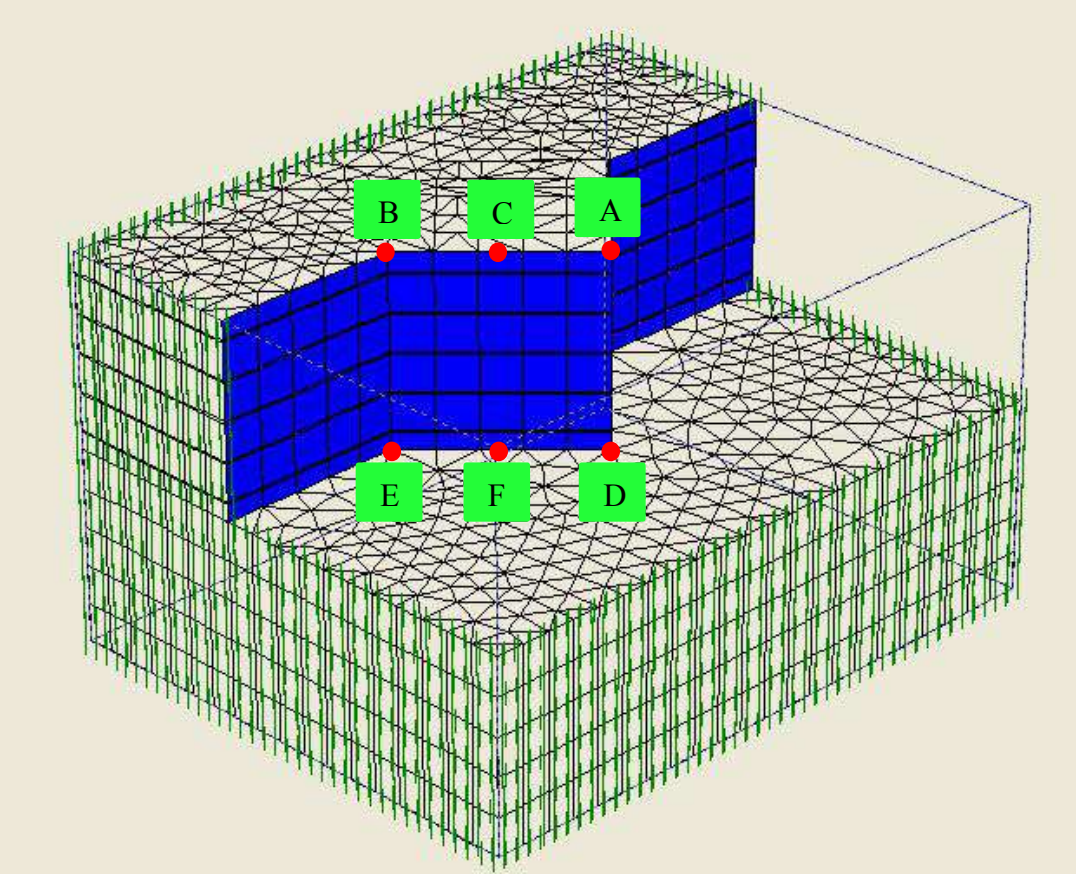


شکل (۴-۶) محورهای مختصاتی x، y و z در مدل ساخته‌شده

در این تحقیق نقاطی از مدل که به رفتار آن‌ها اشاره زیادی خواهد شد بانام‌های قراردادی بیان‌شده در زیر و نشان داده‌شده در شکل (۴-۷) شناسایی می‌شوند :

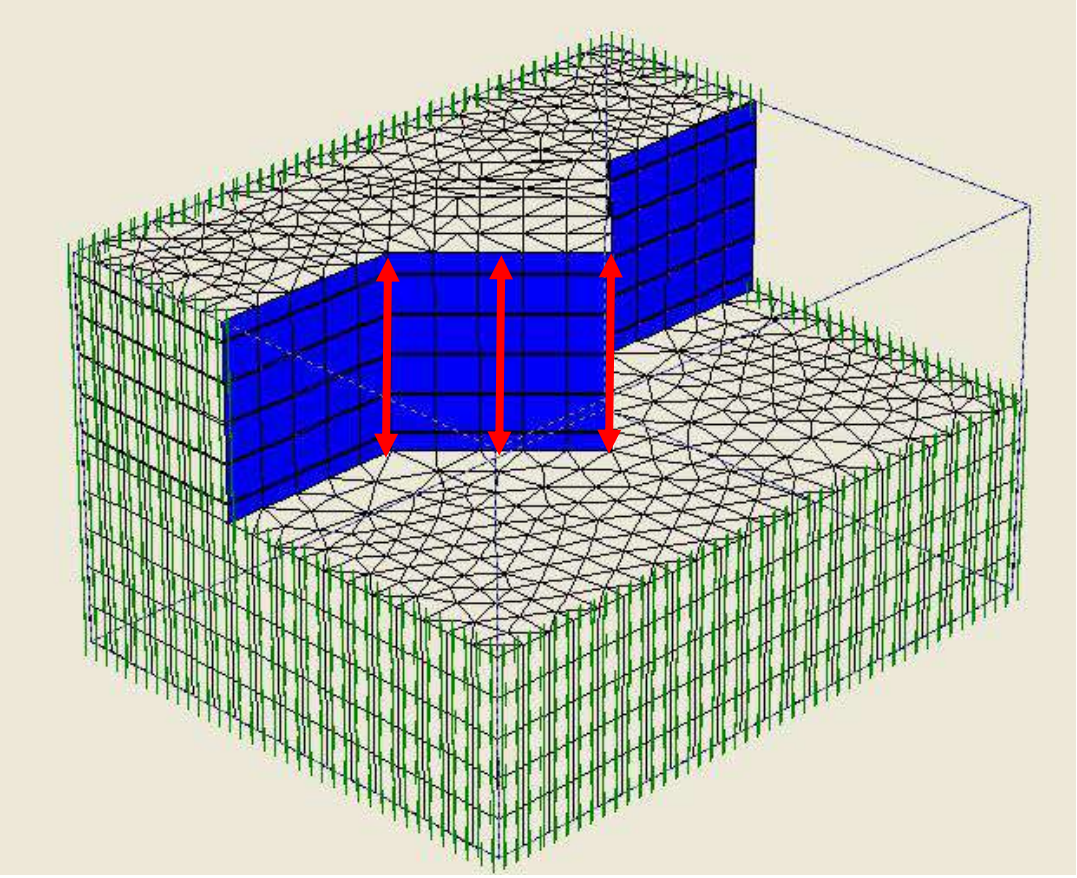
- نقطه A : رأس بالایی کنج بیرون زده
- نقطه B : انتهای بالایی کنج بیرون زده
- نقطه C : میانه بالایی یال کنج بیرون زده
- نقطه D : رأس پایین کنج بیرون زده
- نقطه E : انتهای پایین کنج بیرون زده

- نقطه F : میانه پایین یال کنج بیرون زده



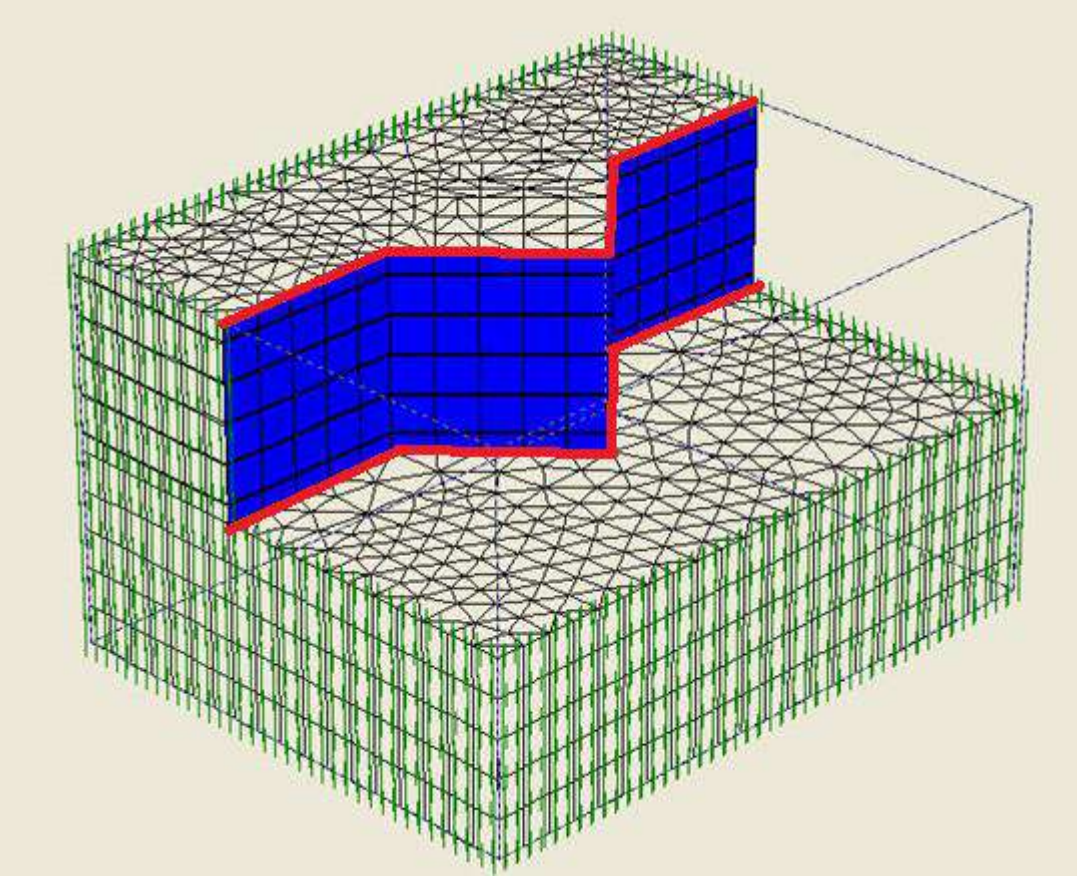
شکل (۴-۷) نقاط مهم پرتکرار در طول ارائه نتایج تحقیق

در این تحقیق برر سی تغییر شکل‌های افقی یا به‌عبارت‌دیگر برر سی پروفیل‌های افقی تغییر شکلی دیوار در ۳ محور انجام خواهد شـــد. محورهای AD (معرفی‌شـــده بانام محور رأس کنج)، BE (معرفی‌شده بانام محور انتهای کنج) و CF (معرفی‌شده بانام محور میانه یال) در شکل (۴-۸) نشان داده‌شده‌اند.



شکل (۴-۸) محورهای موردمطالعه در بررسی تغییرشکل‌های افقی

جهت برر سی تغییر شکل‌های قائم و تحلیل میزان ن ش ست نیز دو محور موردمطالعه قرارگرفته‌اند. محور لبه‌ی بالایی دیواره و محور پایین پوشش دیواره که در شکل (۴-۹) نشان داده‌شده‌اند. در این دو محور نقاط رأس کنج و انتهای کنج از اهمیت بالایی برخوردارند.



شکل (۴-۹) محورهای نشان داده‌شده بالا و پایین‌دیواره موردمطالعه جهت بررسی تغییرشکل‌های قائم

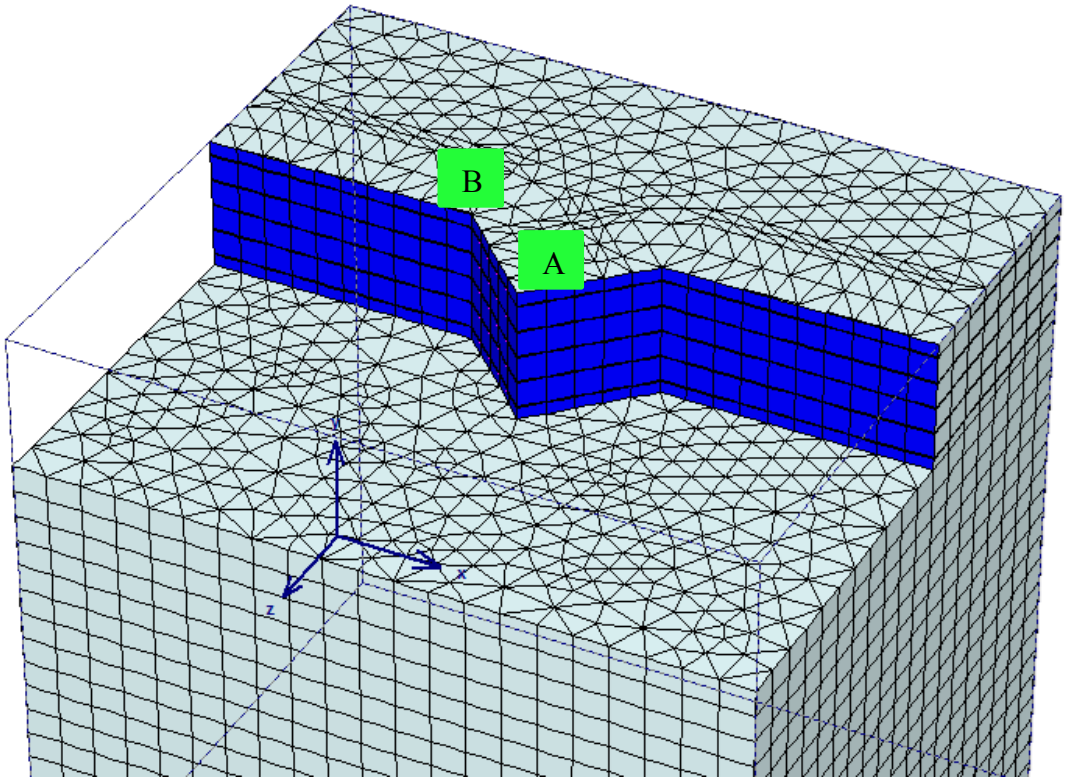
۴-۵-۱- گام اول مدل‌سازی‌های سه‌بعدی : تعیین فواصل همسایگی‌ها در مدل سه‌بعدی

یکی از اساسی‌ترین سؤال‌هایی که این تحقیق قصد پاسخگویی به آن را دارد میزان فاصله هرکدام از مرزها از مرکزیت مدل است به‌گونه‌ای که میزان تأثیر مرزها در کمترین حالت ممکن قرار بگیرد. در مبانی مدل‌سازی عددی اجرای مدل‌های حجیم بسیار زمانبر است. لذا باید با بررسی پارامتریک میزان این ابعاد همسایگی را به‌گونه‌ای تعیین کرد که همزمان با جلوگیری از افزایش حجم مدل و زمان‌بر شدن محاسبات به کاهش حجم آن تا جایی که در میزان تغییرشکل‌ها تأثیری ایجاد نشود، توجه کافی نمود. محاسبه ابعاد همسایگی آن‌هم به صورت ضریبی از ارتفاع دیواره می‌تواند مسیر سایر تحلیل ها را هموار کند. در این قسمت از مطالعه با اجرای ۳۸ مدل نرم‌افزاری و تغییر پارامترهای A تا E که در شکل (۳-۲۷) نشان داده شده است میزان تاثیر هرکدام از این پارامترها

در تغییر شکل های مدل بررسی می شود. جهت یادآوری، قرارداد نام‌گذاری هرکدام از عوامل فوق مجدداً در زیر آورده شده‌اند.

- A : طول یال دیوار یا کنج بیرون زده
- B : فاصله مرز عقب از انتهای یال کنج بیرون زده
- C : طول دیوار هم‌جوار کنج بیرون زده
- D : فاصله مرز جلو از رأس کنج بیرون زده
- E : عمق مدل از کف کنج بیرون زده
- H : ارتفاع کنج بیرون زده

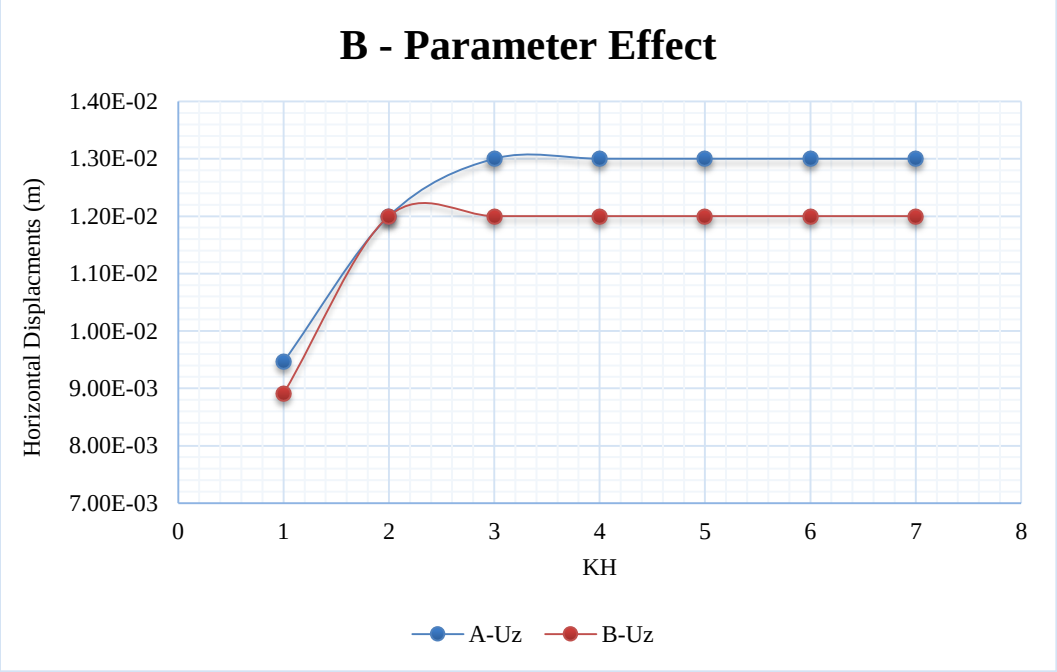
در ادامه به ارائه نمودارها و تفسیر نتایج آن‌ها پرداخته شده است. در نمودارهای ارائه شده میزان تغییرشکل‌های افقی دونقطه مهم رأس بالایی کنج و نقطه کناری انتهای بالایی کنج موردبررسی قرارگرفته است.



شکل (۴-۱۰) نقاط مشخص‌شده جهت بررسی اثر ابعاد همسایگی بر تغییرشکل‌های مدل

ارائه نمودارهای تحلیل اندازه‌های همسایگی

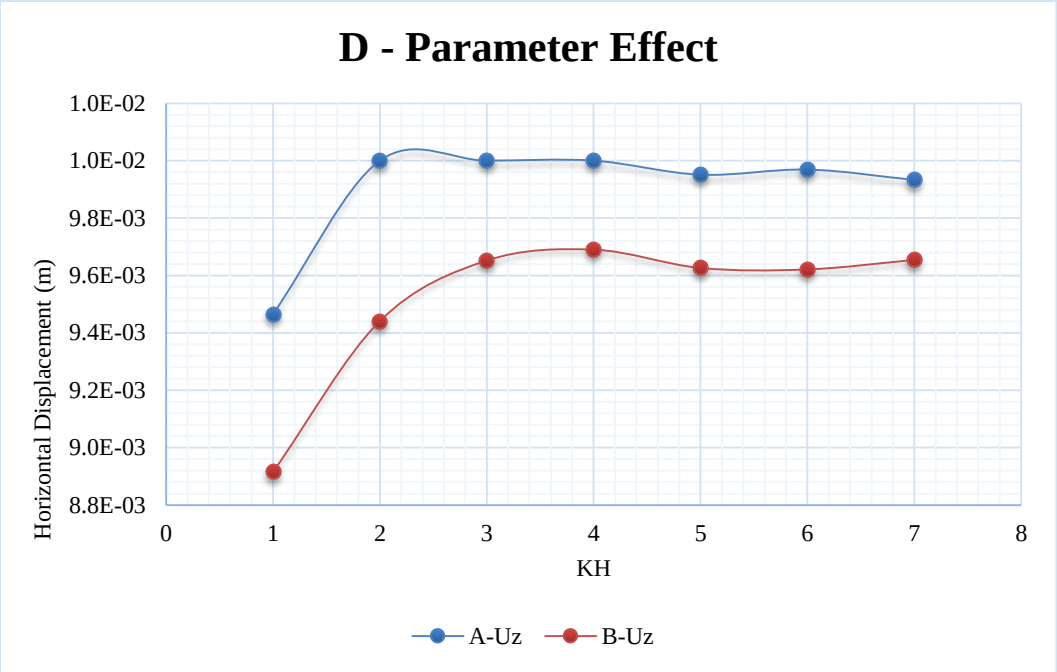
در این قسمت از مطالعه به ارائه نتایج و نمودارهای تحلیل فواصل همسایه‌ها پرداخته شده است. پارامتر B بیان‌کننده فاصله مرز عقب از انتهای یال کنج بیرون زده است. با ایجاد مدل‌ها و تحلیل این بعد از مقادیر یک تا هفت برابر ارتفاع به تحقیق در رابطه با تأثیر این بعد بر رفتار کنج بیرون زده پرداخته شد. شکل (۴-۱۱) نشان‌دهنده این تأثیر است که در آن پارامتر K از ۱ تا ۷ تغییر می‌کند.



شکل (۴-۱۱) تأثیر افزایش طول بعد B بر تغییرشکل‌های افقی نقاط مشخص‌شده در کنج بیرون زده

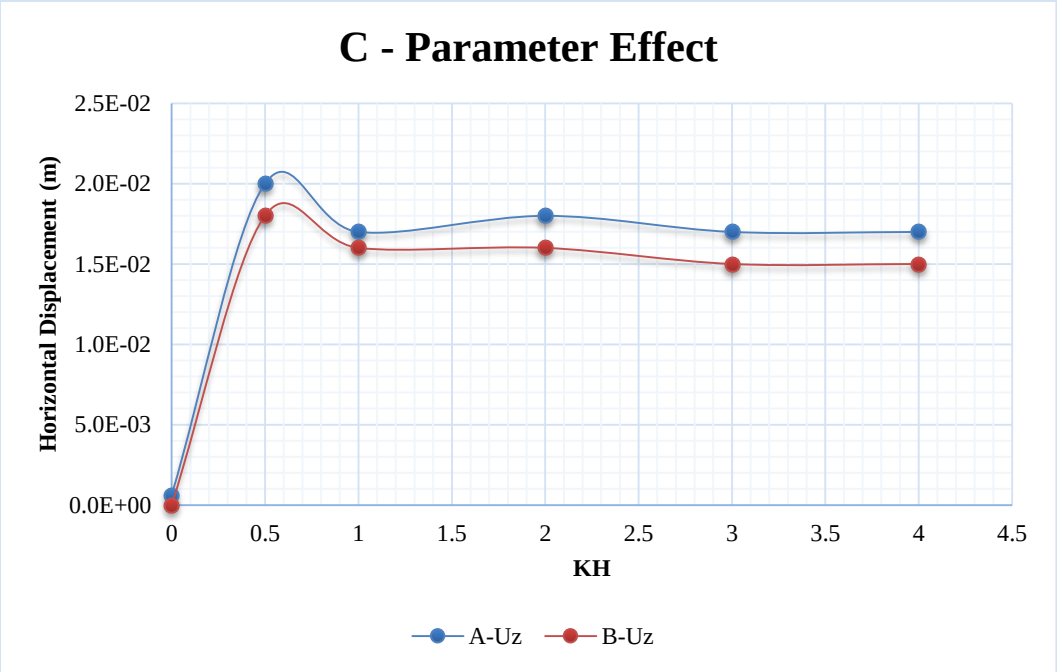
همان‌گونه که در نمودار فوق نشان داده‌شده است تأثیر تغییر پارامتر B این‌گونه است که با افزایش آن به مقادیر بیشتر از ۲ برابر ارتفاع گود بر نتایج تحلیل سه‌بعدی کنج بیرون زده کاهش می‌یابد.

پارامتر D بیان‌کننده فاصله مرز جلو از رأس کنج بیرون زده است. با ایجاد مدل‌ها و تحلیل این بعد از مقادیر یک تا هفت برابر ارتفاع به تحقیق در رابطه با تأثیر این بعد بر رفتار کنج بیرون زده پرداخته شد. شکل (۴-۱۲) نشان‌دهنده این تأثیر است که در آن پارامتر K از ۱ تا ۷ تغییر می‌کند.



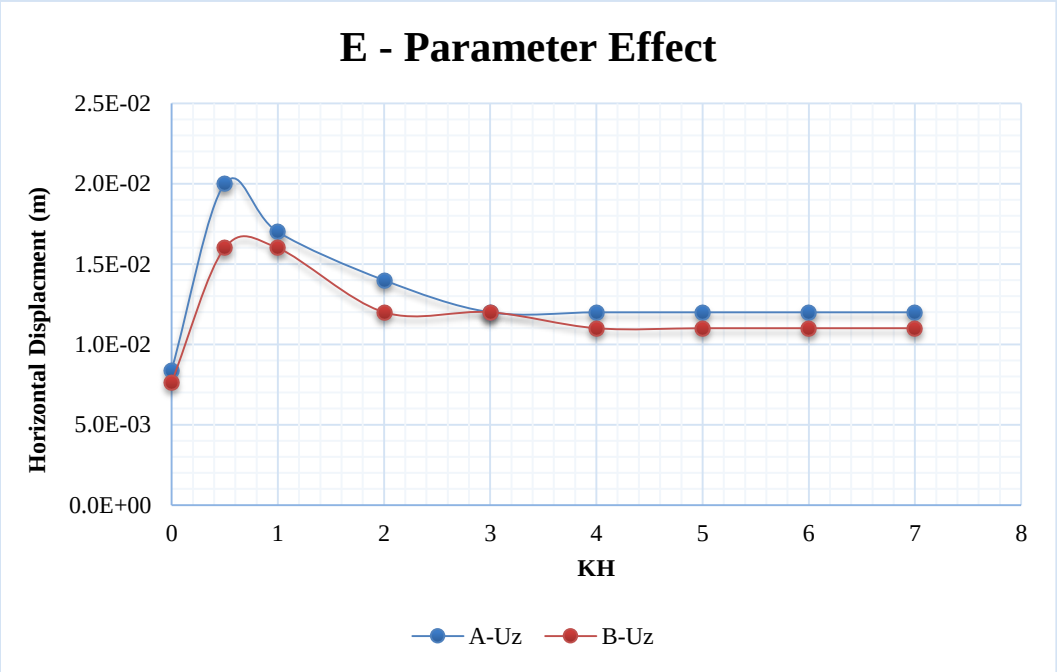
شکل (۴-۱۲) تأثیر افزایش طول بعد D بر تغییرشکل‌های افقی نقاط مشخص‌شده در کنج بیرون زده

همان‌گونه که در نمودار فوق نشان داده‌شده است تأثیر تغییر پارامتر D این‌گونه است که با افزایش آن به مقادیر بیشتر از ۲ برابر ارتفاع گود بر نتایج تحلیل سه‌بعدی کنج بیرون زده کاهش می‌یابد. پارامتر C بیان‌کننده طول دیوار هم‌جوار کنج بیرون زده اســـت. با ایجاد مدل‌ها و تحلیل این بعد از یک تا چهار برابر ارتفاع به تحقیق در رابطه با تأثیر این بعد بر رفتار کنج بیرون زده پرداخته شـــد. شکل (۴-۱۳) نشان‌دهنده این تأثیر است که در آن پارامتر K از ۱ تا ۴ تغییر می‌کند.



شکل (۴-۱۳) تأثیر افزایش طول بعد C بر تغییرشکل‌های افقی نقاط مشخص‌شده در کنج بیرون زده

همان‌گونه که در نمودار فوق نشان داده‌شده است تأثیر تغییر پارامتر C این‌گونه است که با افزایش آن به مقادیر بیشتر از ۲ برابر ارتفاع گود بر نتایج تحلیل سه‌بعدی کنج بیرون زده کاهش می‌یابد. در قسمت پایانی ارائه نتایج گام اول به بررسی پارامتر E پرداخته شده است. پارامتر E بیان‌کننده عمق از کف کنج بیرون زده است. با ایجاد مدل‌ها و تحلیل این بعد از یک تا هفت برابر ارتفاع به تحقیق در رابطه با تأثیر این بعد بر رفتار کنج بیرون زده پرداخته شد. شکل (۴-۱۴) نشان‌دهنده این تأثیر است که در آن پارامتر K از ۱ تا ۷ تغییر می‌کند.



شکل (۴-۱۴) تأثیر افزایش طول بعد E بر تغییرشکل‌های افقی نقاط مشخص‌شده در کنج بیرون زده

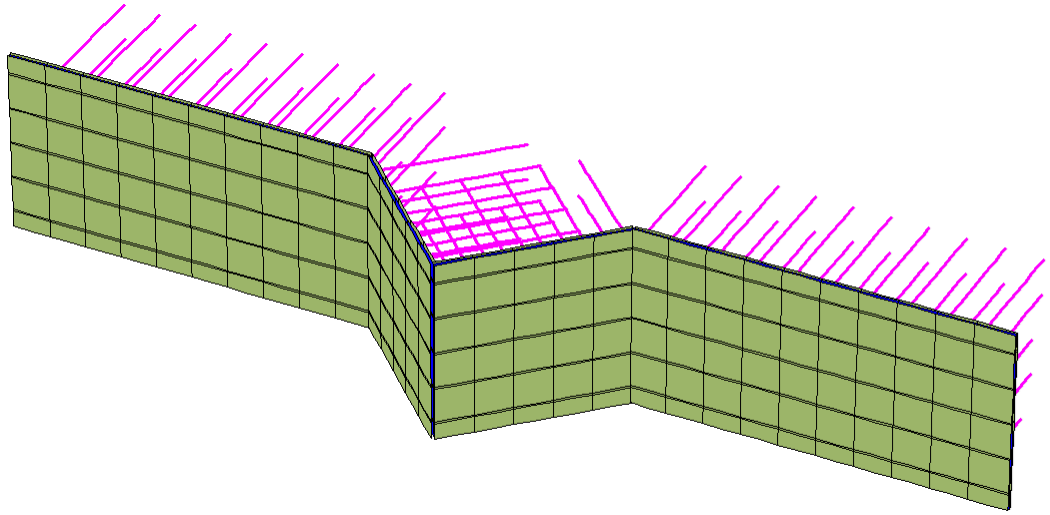
همان‌گونه که در نمودار فوق نشان داده‌شده است تأثیر تغییر پارامتر E این‌گونه است که با افزایش آن به مقادیر بیشتر از ۴ برابر ارتفاع گود بر نتایج تحلیل سه‌بعدی کنج بیرون زده کاهش می‌یابد. اما باید توجه نمود افزایش عمق کف گود باعث افزایش میزان تورم کف گود می شود که در قسمت آتی به راه‌حل آن توجه شده است. آنچه در نمودارهای فوق ارائه شد یکی از اصلی‌ترین گام‌ها این تحقیق بود. در این گام محاسبه‌ی ابعاد همسایگی به‌گونه‌ای موردبررسی قرارگرفته است که نه‌تنها موجب ایجاد کم‌حجم‌ترین مدل (صرف زمان کمتر برای تحلیل) شده بلکه ابعاد انتخاب‌شده بگونه‌ای عمل می‌کنند که کمترین تأثیر را بر نتایج تحلیل کنج دارند. این نتایج در فصل بعدی به‌گونه‌ای خلاصه ارائه خواهند شد.

۴-۵-۲- گام دوم مدل‌سازی‌های سه‌بعدی : ایجاد مدل‌های اولیه دوبعدی و کنج بیرون زده سه‌بعدی و مطالعه ماهیت تحلیل سه‌بعدی

توجیه رفتار سه‌بعدی گودها طبق تصوراتی که از مدل‌سازی‌های دوبعدی در ذهن محققان ایجادشده است، امری غیرممکن است. در تحلیل دوبعدی طول دیوار نامحدود فرض می‌شود و هیچ محدودیتی برای حرکت جانبی دیوار (موازی با طول دیوار) در نظر گرفته نمی‌شود. اما برعکس در تحلیل سه‌بعدی مرزهای مدل در مقابل حرکت‌های جانبی موازی با سطح دیوار مقید شده‌اند. در تحلیل دیوارهای پوشش شاتکریت در حالت دوبعدی اصلی‌ترین پارامتر مقاومتی دیوار که در محاسبات درنظر گرفته می‌شود، مقاومت خمشی آن است. اما در تحلیل سه‌بعدی، مقاومت فشاری، کششی و برشی پوشش شاتکریت به کمک مقاومت خمشی در مقابل تغییرشکل‌های دیوار مقاومت می آیند و مدل‌سازی الاستیک پوشش شاتکریت موجب ایجاد نتایج گمراه‌کننده می‌شود.تفاوت اصلی دیگر بین تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی میزان اختلاف بین مقادیر برآمدگی کف[۱] مدل است. به علت اثر محدودکنندگی جدار همسایه‌ها و توسعه کف مدل در تحلیل‌های سه‌بعدی میزان برآمدگی کف تأثیر بسیار زیادی بر نتایج مدل‌سازی‌ها می‌گذارد.

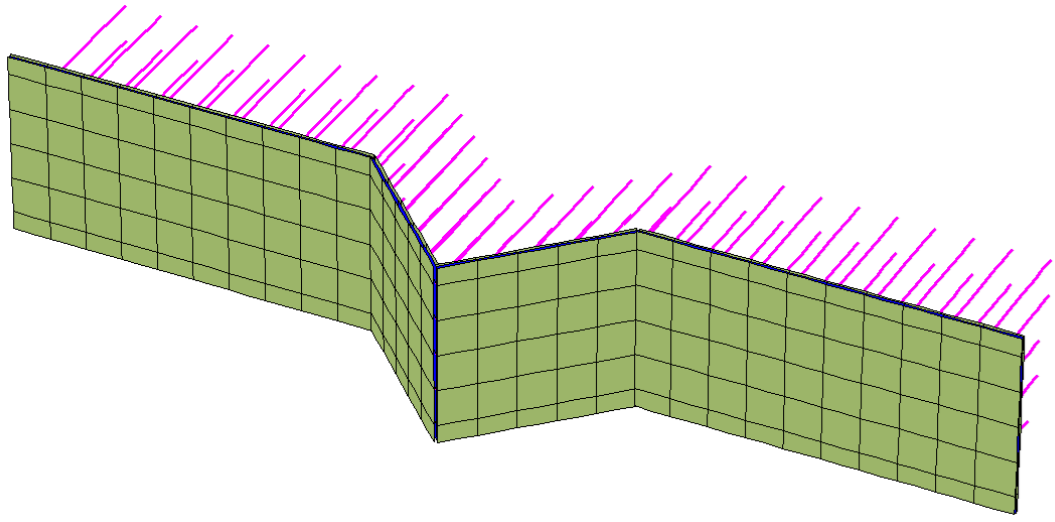
در ابتدای تحقیق لازم است که حالت چینش متقاطع و چینش موازی میخ‌خاک‌ها معرفی شوند. در ایده اولیه این تحقیق دو طرح کلی برای چینش میخ‌خاک‌ها پیشنهادشده است. چینش متقاطع میخ‌خاک‌ها که در این تحقیق ارائه‌شده است عمود بر دیوار در کنج بیرون زده قرار داده‌شده‌اند. در شکل (۴-۱۵) شمای قرارگیری حالت متقاطع میخ‌خاک‌ها در کنج بیرون زده نشان داده‌شده است. این چینش در این تحقیق بانام اختصاری PDD شناسایی خواهد شد.

[۱] Heave



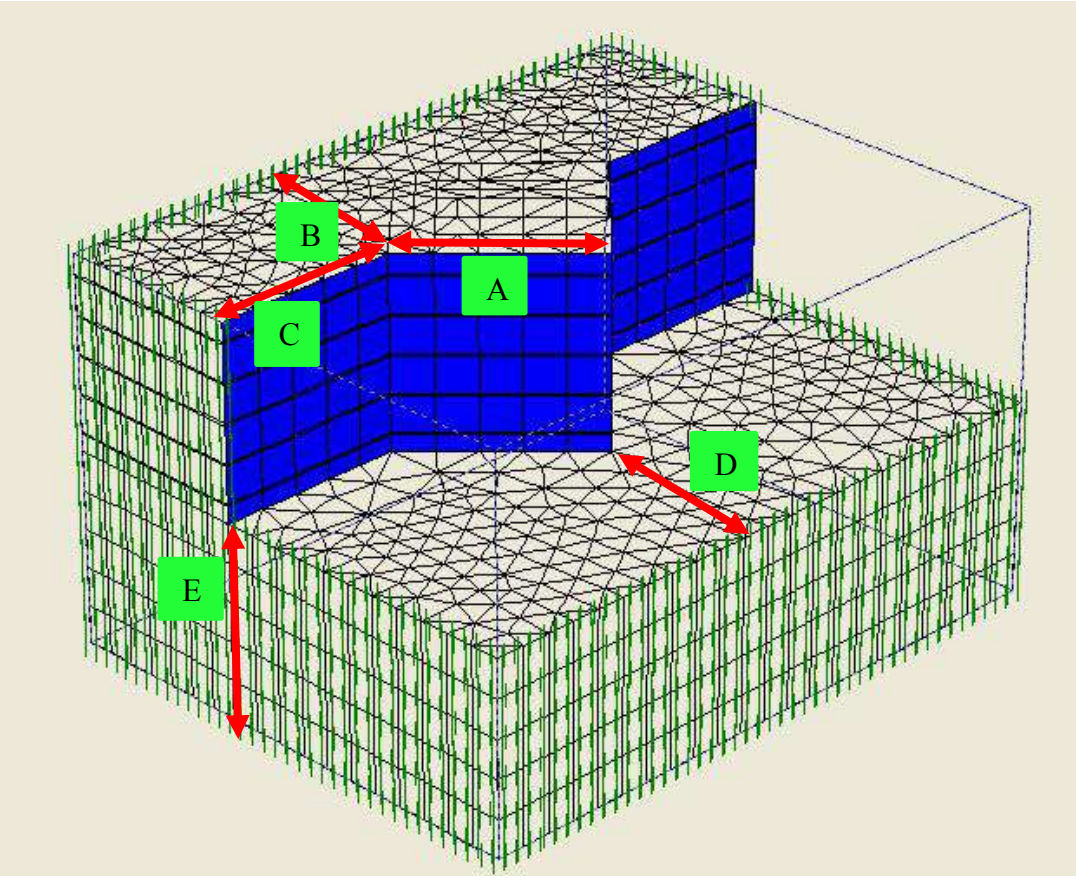
شکل (۴-۱۵) چینش متقاطع میخ‌خاک‌ها

در مقابل چیدمان موازی با نیمساز میخ‌خاک‌ها موردتوجه است. در این چیدمان میخ‌خاک‌ها با زاویه‌ای برابر با ۴۵ درجه با یال کنج بیرون زده برخورد دارند. باید توجه داشت که آرایش میخ‌خاک‌ها در این دو چیدمان یکسان در نظر گرفته‌شده است. شکل (۴-۱۶) نشان‌دهنده شمای آرایش موازی با نیم ساز در کنج بیرون زده است. این چینش در این تحقیق بانام اختصاری PRR شناسایی خواهد شد.



شکل (۴-۱۶) چینش موازی با نیم ساز میخ‌خاک‌ها

در این مطالعه اثر افزایش طول یال کنج بیرون زده بر تغییرشکل‌های دیوار بررسی‌شده است. جهت مطالعه پارامتریک میزان بیرون‌زدگی دیوار، پارامتر A که در تصویر نشان داده‌شده است از مقادیر 0.2H تا 2H تغییر می‌کند و با این دامنه تغییرات رفتار کنج بیرون زده بررسی می‌شود. برای مثال مدلی که در آن A برابر با 1.0H است در شکل (۴-۱۷) نشان داده‌شده است.



شکل (۴-۱۷) بعد A در مدل‌سازی کنج بیرون زده

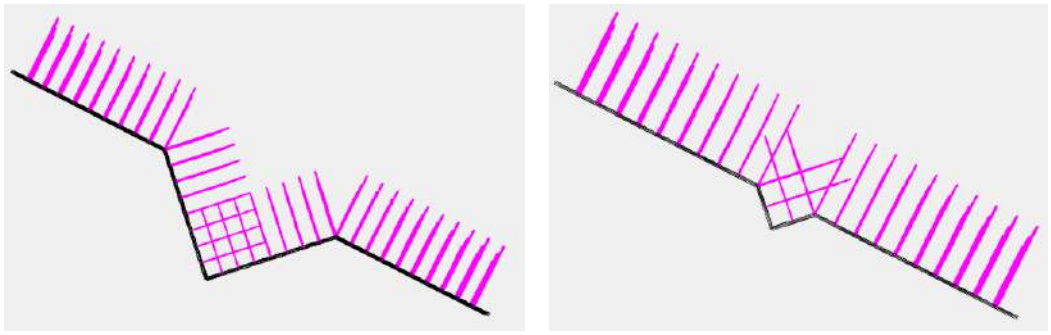
در هرکدام از حالت‌های چینش با افزایش یال کنج بیرون زده حالت‌هایی متفاوت از تسلیح دیواره به وجود می‌آید. در این حالت می‌توان برای آرایش متقاطع دو حالت کلی متصور شد :

- طول یال کنج بیرون زده کمتر از بیشترین طول میخ‌خاک
- طول یال کنج بیرون زده بیشتر از بیشترین طول میخ‌خاک

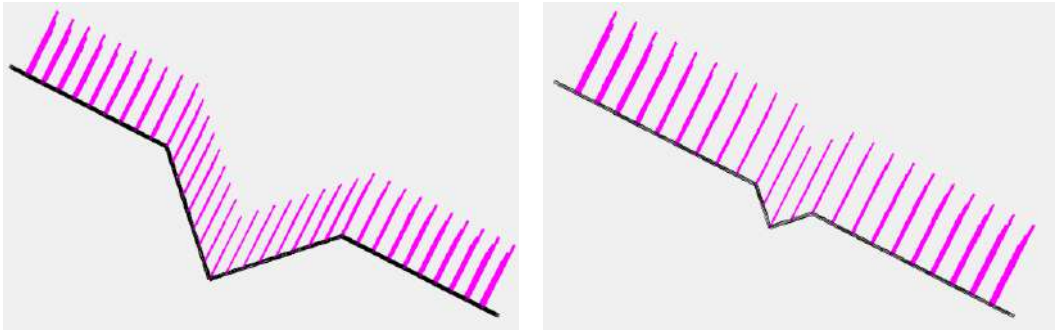
در طرف مقابل برای آرایش متقاطع نیز دو حالت کلی می‌توان متصور شد :

- طول یال کنج بیرون زده کمتر از مقداری باشد که طولانی‌ترین میخ‌خاک در بدنه اصلی توده خاک قرار گیرد.
- طول یال کنج بیرون زده بیشتر از مقداری باشد که طولانی‌ترین میخ‌خاک در بدنه اصلی توده کنج بیرون زده قرار گیرد.

در اشکال شکل (۴-۱۸) شکل (۴-۱۹) حالت‌های فوق نشان داده‌شده است.

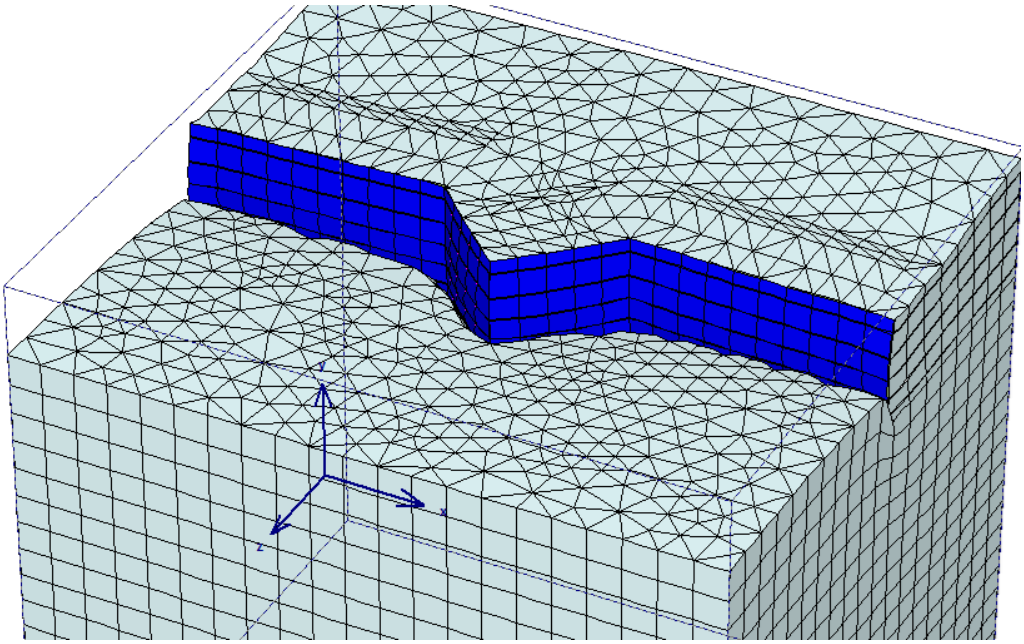


شکل (۴-۱۸) حالات ایجادشده در آرایش متقاطع میخ‌خاک‌ها

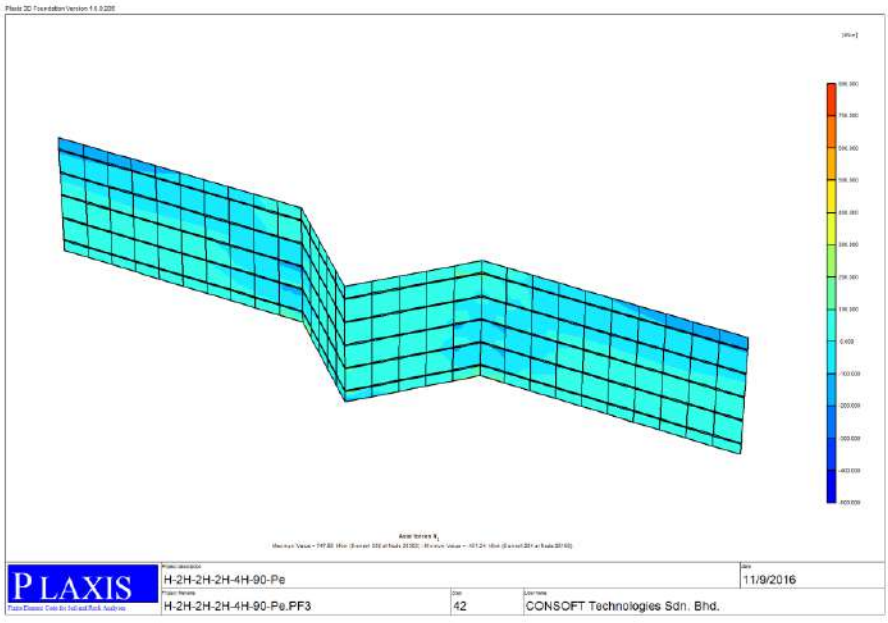


شکل (۴-۱۹) حالات ایجادشده در آرایش موازی نیم ساز میخ‌خاک‌ها

پس از اجرا تحلیل‌های نرم‌افزاری و بررسی نتایج، مواردی غیرعادی در نتایج ایجاد شد. شکل (۴-۲۰) نمونه‌ای از فرم تغییرشکل یافته دیوار مدل‌سازی شده به همراه کنج بیرون زده است.



شکل (۴-۲۰) فرم تغییرشکل یافته دیوار باحالت چینش متقاطع



شکل (۴-۲۱) میزان برش ایجادشده در پوشش شاتکریت

همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان بالازدگی کف گود آنقدر زیاد است که بر روی میزان نشست‌های کنج بیرون زده تأثیر گذاشته و موجب کاهش تغییرشکل‌های افقی دیواره (براثر دوران به سمت دیواره گود) نیز می‌شود. تغییرشکل‌های ایجادشده در این مرحله غیرعادی‌اند چراکه تحت تأثیر عوامل بالا زدگی زیاد و مقاومت بالای پوشش شاتکریت قرار دارند. مجدداً یادآوری می‌شود که عامل مقاومت پوشش شاتکریت در تحلیل سه‌بعدی تنها مقاومت خمشی آن نیست. بلکه مقاومت فشاری، کششی و برشی آن نیز به علت ایجاد اندرکنش‌ها در جهات مختلف می‌تواند تأثیر بسیار مهمی در چگونگی رخداد الگوهای تغییرشکلی کنج بیرون زده داشته باشد. ازاین‌رو با ایجاد دو تغییر مهم در نحوه مدل‌سازی می‌توان اثر این دو عامل جانبی را حذف و به مطالعه رفتار کنج بیرون زده پرداخت. تغییر اول حذف اثر برآمدگی کف گود است. در مدل رفتاری خاک سخت شونده مدول باربرداری خاک وابسته به تنش همه جانبه و تقریباً برابر با سه برابر مدول الاستیک خاک است و در شرایط باربرداری، قسمتی از خاک که دارای بیشترین میزان باربرداری است میزان مدول باربرداری آن به مقدار زیادی کاهش می یابد. لذا با افزایش میزان مدول باربرداری خاک می‌توان میزان برآمدگی کف را کاهش داد. در نسخه‌های جدید نرم‌افزار Plaxis سه‌بعدی جهت کنترل میزان برآمدگی‌ها از مدل عمومی خاک سخت شونده[1] استفاده می‌شود که حالت خاصی از آن‌همان مدل خاک سخت شونده در کرنش‌های کوچک[2] است [۴۱]. در این مدل رفتاری میزان مدول الاستیسیته باربرداری وابسته به میزان پیش تحکیم یافتگی خاک است و در مستندات این مدل میزان مدول الاستیسیته باربرداری اغلب بین ۷ تا ۱۲ برابر میزان الاستیسیته است. لذا جهت حل کردن این مشکل و جلوگیری از رخ دادن میزان برآمدگی‌های زیاد در کف گود پیشنهاد می‌شود که مدول باربرداری خاک کف گود بیشتر شود که تحت باربرداری ثابت میزان برآمدگی کف کاهش یابد.

جهت ایجاد تغییر دوم در این قسمت پس از بررسی نیروهای کششی ایجادشده در پوشش شاتکریت این نکته دریافت می‌شود که میزان بالای مقاومت شاتکریت باعث جلوگیری از حرکت آزادانه توده خاک می‌شود و این موضوع در کانتور مقاومت پوشش شاتکریت خود را بر اساس آنچه در شکل (۴-۲۱) نشان داده‌شده است نمودار می‌شود. پس از بررسی در حوزه مطالعات آزمایشگاهی مقاومت پوشش‌های شاتکریتی این نکته مشخص می‌شود که مدل‌سازی دیواره شاتکریت آن‌هم به‌صورت

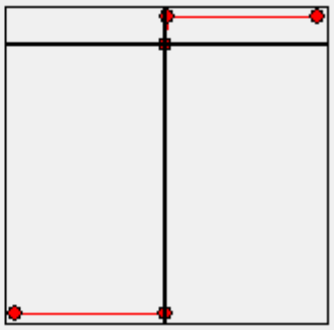
[1] Genral Hardening Soil Model

[2] Small Strain Hardening Soil Model

الاستیک موجب ایجاد مقاومت بالای برشی و کششی در شاتکریت می‌شود. درصورتی‌که در واقعیت این‌گونه نیست. چراکه ایجاد ترک در توده بتنی شاتکریت موجب کاهش مقاومت آن می‌شود. ازاین‌رو به نظر می‌رسد مدل‌سازی خواص مقاومتی شاتکریت با استفاده از مدل رفتاری الاستو - پلاستیک می‌تواند راه‌حلی مناسب جهت جلوگیری از رخداد مشکل ذکرشده در بالا باشد.

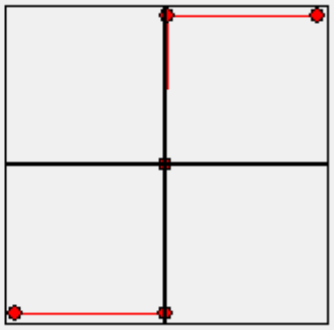
طبق مطالعه ساو[1] و همکاران که در سال ۲۰۰۹ جهت بررسی خواص مقاومتی غیرخطی و الاستو پلاستیک در دانشکده معدن دانشگاه کورتین استرالیا انجام‌شده است به بررسی خواص مقاومتی الاستو - پلاستیک شاتکریت مسلح شده با فولاد پرداخته‌شده است. در این مطالعه با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی منحنی‌های رفتاری شاتکریت مسلح رسم شده است. از طرفی با استفاده از مبانی رفتار پلاستیک بتن می‌توان ظرفیت پلاستیک یک مقطع خاص بتنی در حالت کشش، برش و خمش را محاسبه نمود. لذا با استفاده از محاسبات می‌توان دیاگرام‌های رفتار الاستو - پلاستیک بتن شاتکریت را به‌صورت زیر ارائه نمود.

	ε_1 [-]	N_1 [kN]
1	-1.000	-2000.000
2	-3.000E-03	-2000.000
3	0.000	0.000
4	2.000E-03	201.000
5	1.000	201.000



شکل (۴-۲۲) دیاگرام مقاومت فشاری و کششی الاستو پلاستیک پوشش شاتکریت

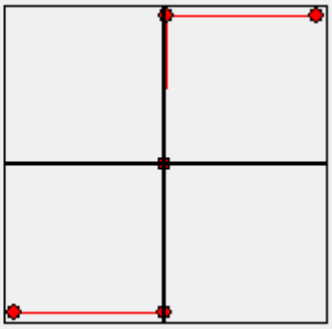
	γ_{12} [m]	Q_{12} [kN]
1	-1.000	-8910.000
2	-0.010	-8910.000
3	0.000	0.000
4	0.010	8910.000
5	1.000	8910.000



[1] Saw

شکل (۴-۲۳) دیاگرام مقاومت برشی الاستو پلاستیک پوشش شاتکریت

	κ_1 [m^{-1}]	M_1 [kNm]
1	-1.000	-17.550
2	-0.010	-17.550
3	0.000	0.000
4	0.010	17.550
5	1.000	17.550

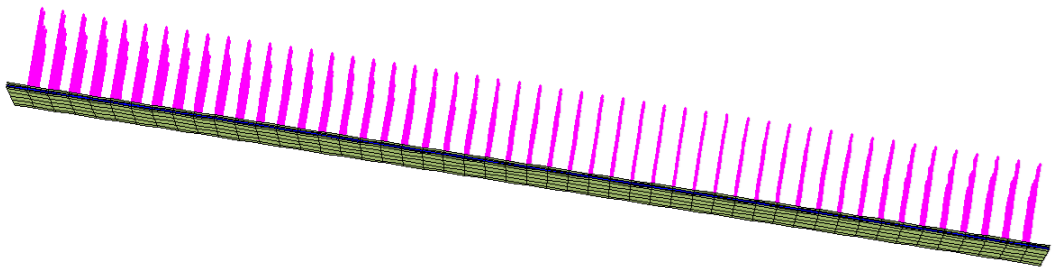


شکل (۴-۲۴) دیاگرام مقاومت خمشی الاستو پلاستیک پوشش شاتکریت

دلیل استفاده از خواص الاستو پلاستیک پوشش شاتکریت آن است که میزان نیروی ایجادشده در پوشش به مقدار واقعی محدود شود، نه این‌که با ایجاد هر کرنشی نیروهای متقابل با آن در پوشش ایجاد شوند. محدود کردن کرنش‌های ایجادشده در پوشش به کرنش‌های پلاستیک فولاد و بتن باعث ایجاد حالتی آزادانه‌تر جهت رخداد تغییرشکل‌های کنج بیرون زده است و باعث ایجاد نیروهای خارج از واقعیت در پوشش نمی‌شود.

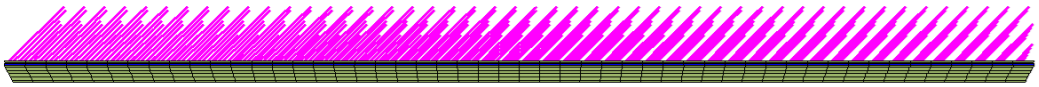
در قسمت آتی پس از ایجاد دو تغییر ذکرشده در بالا می‌توان مدل‌سازی نهایی را نیز با اصلاح خواص مقاومتی شاتکریت و خاک ارائه نمود.

در قسمت پایانی این گام به تشریح مدل‌های دوبعدی ایجادشده در نرم‌افزار نسخه سه‌بعدی پرداخته‌شده است. جهت مقایسه بهتر تغییرشکل‌های سه‌بعدی کنج بیرون زده با مقادیر تغییرشکل‌های دیوار طویل (کرنش صفحه‌ای و دوبعدی) دو چیدمان نیل متقاطع و موازی در حالت دوبعدی ایجادشده‌اند. شکل (۴-۲۵) نشان‌دهنده آرایش دوبعدی عمود بر دیواره است.



شکل (۴-۲۵) آرایش دوبعدی عمود بر دیواره(2D-PDD) (نماینده چینش متقاطع)

در طرف مقابل چینش موازی شکل (۴-۲۶) با نیمساز به دیواره‌ای طویل با میخ‌های اجراشده با زاویه ۴۵ درجه شبیه‌سازی‌شده است.

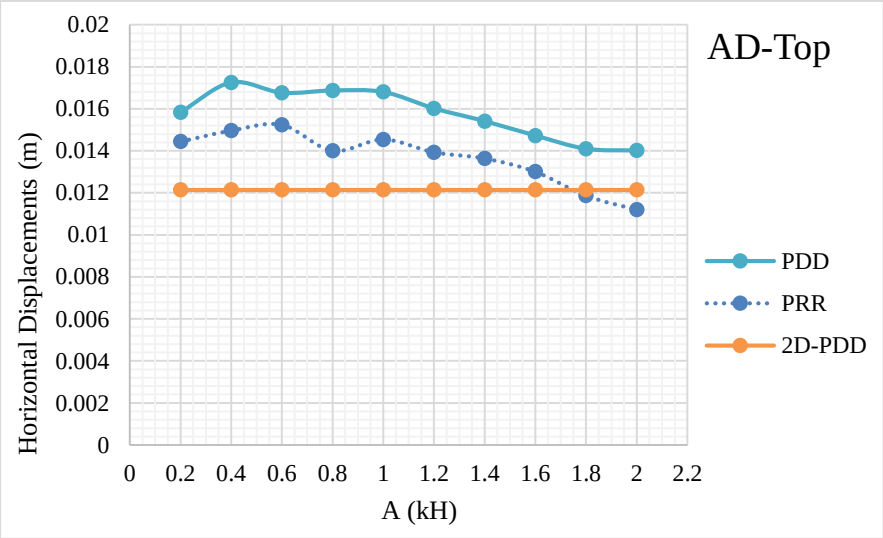


شکل (۴-۲۶) آرایش دوبعدی زاویه‌دار با دیواره(2D-PRR) (نماینده چینش موازی نیمساز)

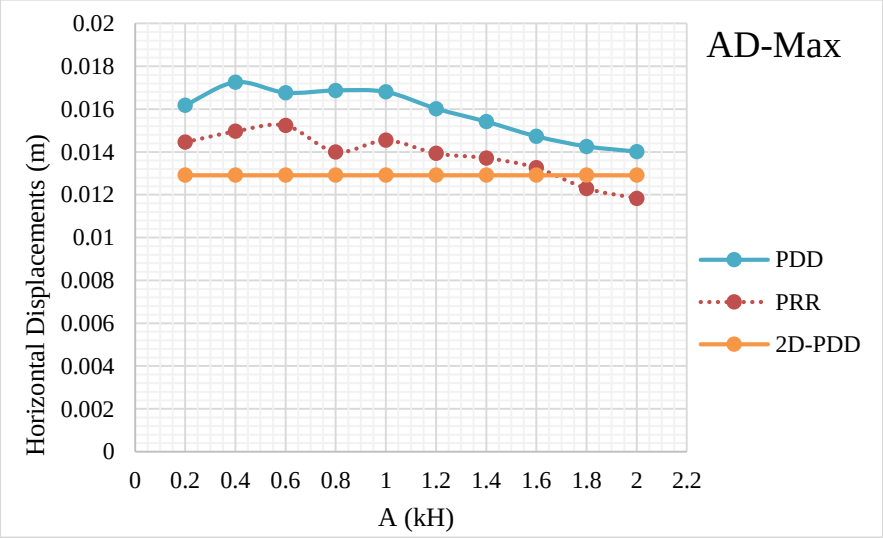
این دو دیوار طویل ایجادشده مانند دیوارهای دوبعدی عمل می‌کنند و با استفاده از تغییرشکل‌های ایجادشده در مقطع میانی آن‌ها می‌توان مقایسه‌ای بین تغییرشکل‌های ایجادشده در حالت دوبعدی و سه‌بعدی کنج بیرون زده داشت.

۴-۵-۳- گام سوم مدل‌سازی‌های سه‌بعدی : ایجاد مدل‌های اولیه کنج بیرون زده سه‌بعدی و مطالعه ماهیت تحلیل سه‌بعدی

در این قسمت از مطالعه ارائه نتایج مدل‌های بازسازی‌شده نهایی صورت می‌پذیرد و بررسی نتایج در فصل آتی انجام می‌شود. همان‌گونه که در نمودارهای شکل (۴-۲۷) و شکل (۴-۲۸) نشان داده‌شده است میزان تغییرشکل‌های افقی ایجادشده در محور رأس کنج بیرون زده در حالت چینش متقاطع بیشتر از حالت چینش موازی و در هر دو حالت بیشتر از حالت دوبعدی متقاطع (نیل عمود بر دیواره) است. دلیل این نتیجه را می‌توان در گیرداری کمتر کنج به توده‌ی خاک پشت مدل در حالت چینش متقاطع دانست و این در حالتی است که چینش موازی به علت مهارشدگی بهتر توده خاک به پشت می‌تواند در کنترل تغییرشکل‌های افقی بهتر عمل کند. برای مثال در دیوار با طول بعد بیرون زده 1.6H به شکل (۴-۲۹) توجه شود.

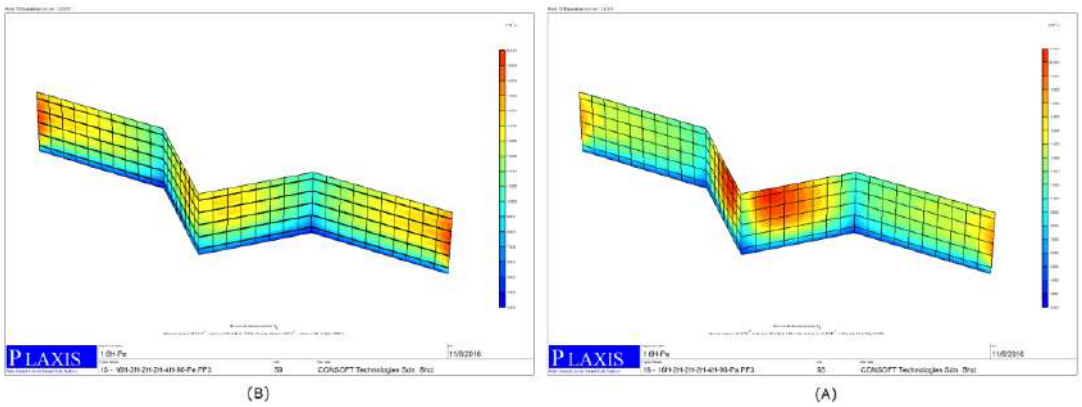


شکل (۴-۲۷) تغییرشکل افقی ایجادشده در نقطه بالایی محور رأس کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع



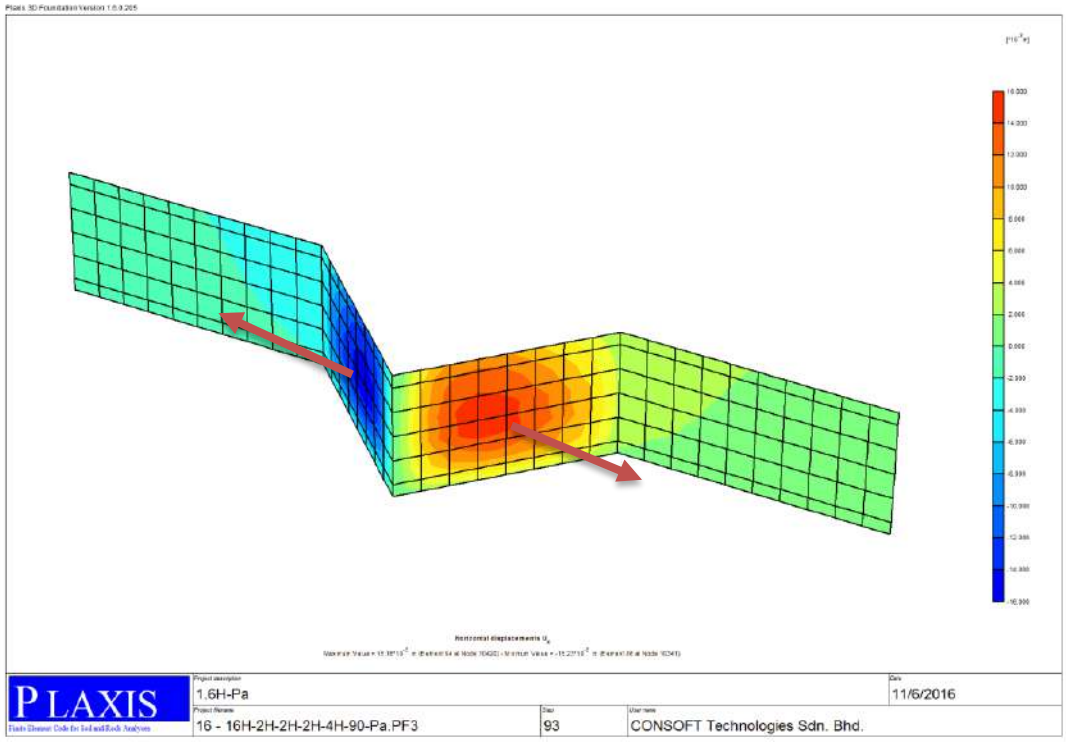
شکل (۴-۲۸) تغییرشکل افقی ایجادشده بیشینه محور رأس کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع

آنچه در شکل (۴-۲۹) واضح است بیشتر تغییر شکل‌های در حالت چینش متقاطع در رأس کنج ایجاد شده و بیشتر تغییر شکل‌ها در حالت چینش موازی در میانه یال کنج بیرون زده ایجاد شده است. نمودارهای بالا این‌گونه تفسیر می‌شود که در حالت متقاطع با تشکیل توده‌ای صلب (متشکل از شبکه‌ی میخ‌خاک‌ها درهم‌تنیده و متقاطع) میزان مهار تغییر شکل‌های افقی رأس کنج به سختی صورت می‌پذیرد.



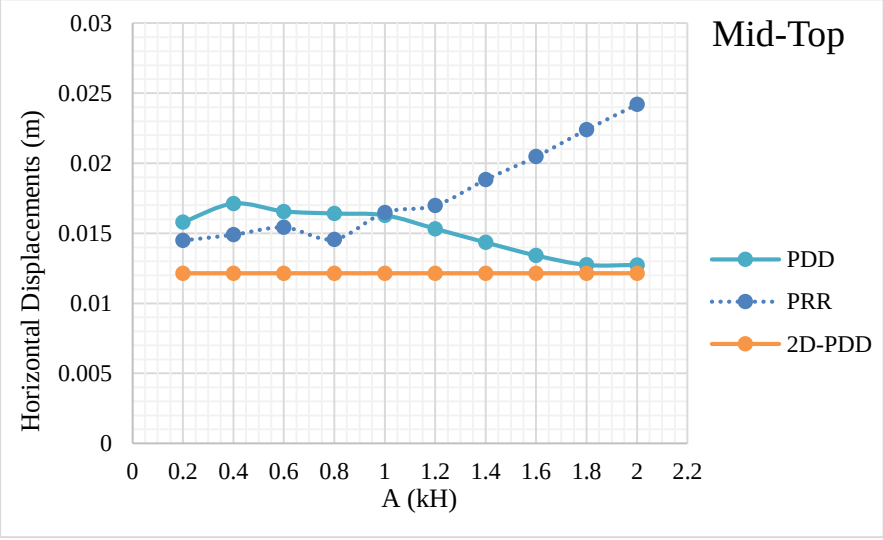
شکل (۴-۲۹) تغییرشکل‌های ایجادشده افقی در کنج بیرون زده در دو حالت چینش، (A) چینش موازی و (B) چینش متقاطع

اما در حالت چینش موازی علی‌رغم بیشتر بودن مقادیر تغییرشکل افقی در مقاطعی دیگر همچنان در رأس کنج به علت تمایل کنج به بازشدگی افقی (آنچه در شکل (۴-۳۰) نشان داده‌شده است) مقادیر کمتری را نسبت به حالت چینش متقاطع دارد.

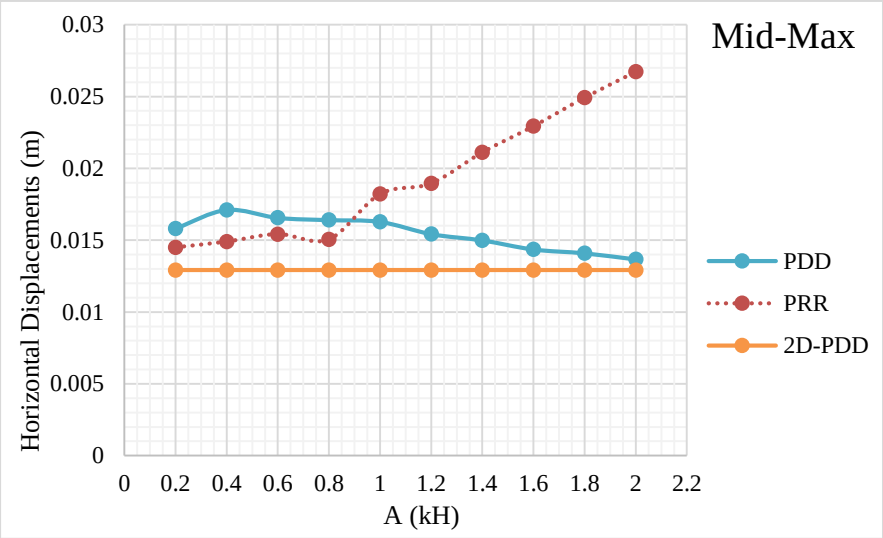


شکل (۴-۳۰) تمایل به بازشدگی مدل در حالت چینش موازی

در ادامه به بررسی تغییرشکل‌های ایجادشده در سایر مقاطع پرداخته خواهد شد. همان‌گونه که در اشکال شکل (۴-۳۱) شکل (۴-۳۲) مشاهده می‌شود با افزایش طول یال کنج بیرون زده میزان تغییرشکل‌های افقی ایجادشده در میانه یال کنج بیرون زده در حالت چینش موازی افزایش و در حالت چینش متقاطع کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع در تمایل به بازشدگی دیواره در حالت چینش موازی است چراکه دیوار در مقابل تغییرشکل‌های عمود بر یال از هیچ المان مقاومی نمی‌تواند استفاده نماید. در این حالت با افزایش طول یال کنج بیرون زده هرکدام از یال‌های دیواره به یک دیواره طویل با میخ‌خاک‌ها با زاویه ۴۵ درجه تبدیل می‌شوند و میزان تغییرشکل‌های عمود بر سطح دیواره به مقادیر تغییرشکل دیوار مدل‌سازی شده 2D-PRR میل می‌کند. برعکس در حالت چینش متقاطع با افزایش طول یال کنج بیرون زده میزان تغییرشکل‌های افقی میانه یال کاهش می‌یابد چراکه هرچه دیواره به سمت طویل شدن یال کنج می‌رود المان‌های میخ‌خاک عمود بر دیواره نقش مهمی در کاهش تغییرشکل‌های محور میانه یال ایفا خواهند کرد و از طرفی ضعف تغییرشکلی توده بلوکی صلب تشکیل‌شده ناشی از تسلیح مضاعف را جبران می‌کنند.

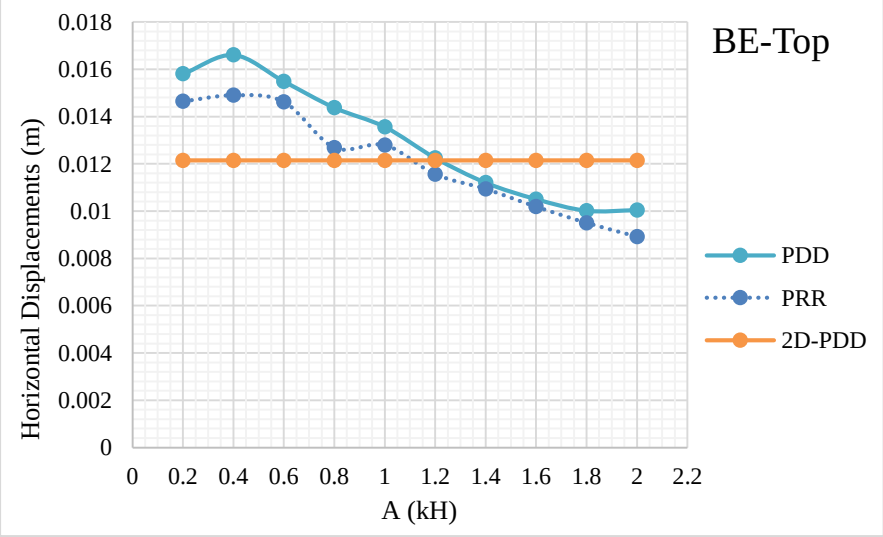


شکل (۴-۳۱) تغییرشکل افقی ایجادشده نقطه بالایی محور میانه یال کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع

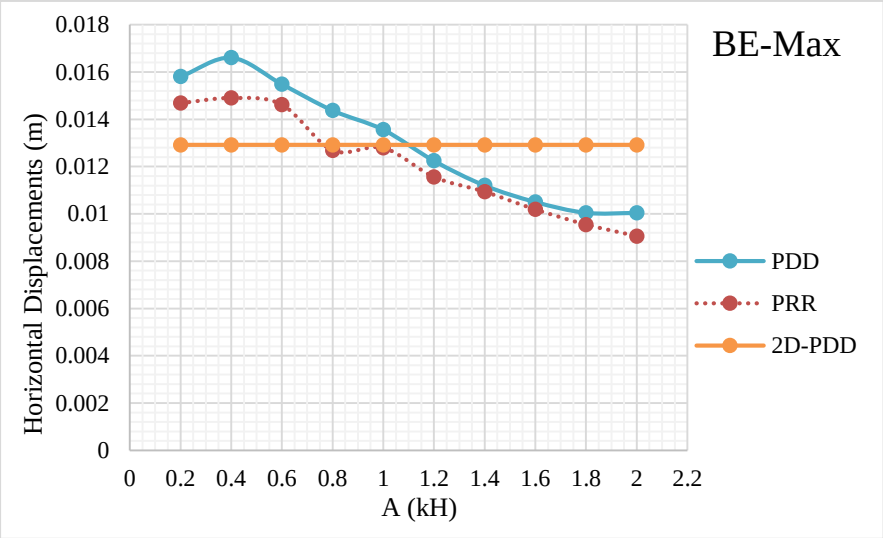


شکل (۴-۳۲) تغییرشکل افقی ایجادشده بیشینه محور میانه یال کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع

همان‌گونه که در شکل (۴-۳۳) و شکل (۴-۳۴) مشاهده می‌شود رفته‌رفته با افزایش طول بعد کنج بیرون زده میزان تغییرشکل‌های افقی محور انتهای یال کنج بیرون زده کاهش می‌یابد چراکه در هر دو الگوی چینش موازی و متقاطع با افزایش طول بعد کنج بیرون زده نقاط با تراکم تغییرشکل بالا از محدوده‌ی کناری انتهای کنج فاصله گرفته و محل تجمع این نقاط در چینش متقاطع در محل رأس کنج و در چینش موازی در محل میانه یال کنج بیرون زده قرار دارد.

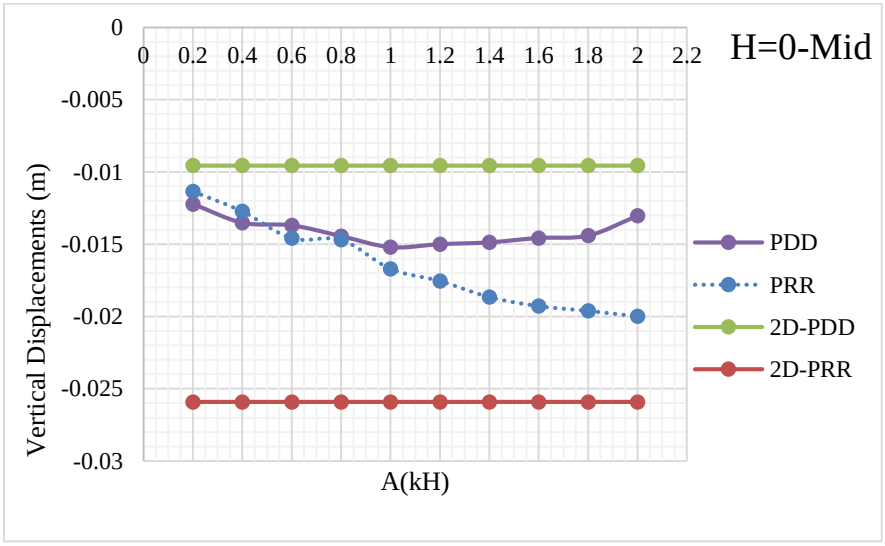


شکل (۴-۳۳) تغییرشکل افقی ایجادشده نقطه بالایی محور انتهای یال کنج بیرون زده در حالت چینش موازی و چینش متقاطع

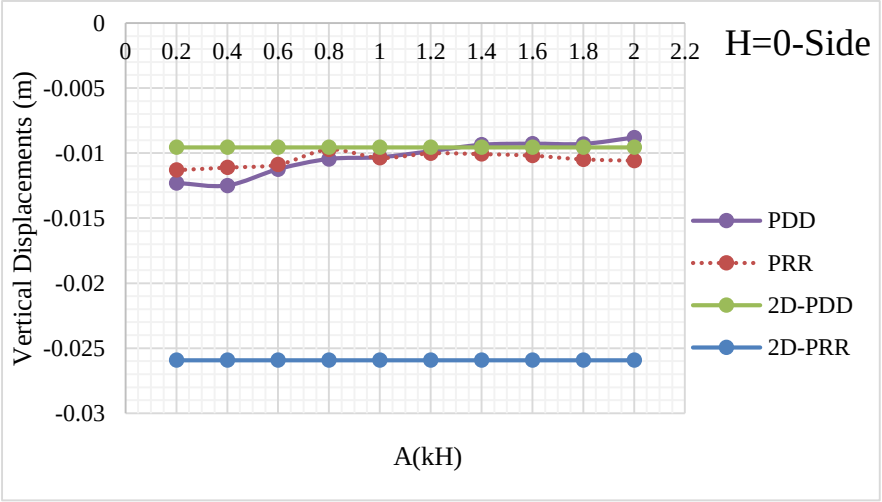


شکل (۴-۳۴) تغییرشکل افقی ایجادشده بیشینه محور انتهای یال کنج بیرون زده در حالت موازی و متقاطع

در رابطه با میزان نشست‌های بالای دیواره در دونقطه رأس بالایی و نقطه‌ی انتهای یال کنج بیرون زده نمودارهای ذیل باید موردتوجه قرار گیرند. آن‌گونه که در شکل (۴-۳۵) نشان داده‌شده است چینش متقاطع در کنترل میزان نشست نقطه رأس کنج بیرون شده عملکرد بهتری دارد و به نظر می‌رسد دلیل این عملکرد ایجاد توده‌ای صلب با قفل بست بین میخ‌خاک‌ها در حالت چینش متقاطع است. از طرفی در چینش موازی به علت تمایل به بازشدگی دیواره و افزایش میزان تغییرشکل‌های عمود بر دیواره در محور میانه یال، مقادیر نشست در بالای دیواره بیشتر است چراکه بازشدگی دیواره باعث ایجاد فضای خالی‌شده که لزوم پر شدن این فضا رخداد نشست‌های زیاد در بالای دیواره است.



شکل (۴-۳۵) میزان تغییرشکل قائم نقطه رأس بالایی با دو چینش موازی و متقاطع



شکل (۴-۳۶) میزان تغییرشکل قائم نقطه انتهای یال کنج بیرون زده با دو چینش موازی و متقاطع

در اینجا لازم است به تصور رایج در بین صاحب‌نظران در حوزه دیوارهای میخکوبی شده اشاره کرد. این تصور بیان می‌کند که در دیوارهای میخکوبی شده با افزایش میزان تغییرشکل‌های افقی میزان نشست در بالای دیواره نیز افزایش می‌یابد که نتایج مشاهدات تجربی و اصول تئوریک طراحی دیوارهای میخکوبی شده نیز صحت این ادعا را تضمین می‌کند، اما محدوده صحت این ادعا در حوزه تحلیل دوبعدی دیوارهای میخکوبی شده است. آنچه در این تحقیق به آن اشاره‌شده است در حالت چینش موازی بین مقادیر نشست ایجادشده در بالای دیواره و مقادیر تغییرشکل افقی دیواره رابطه‌ی مستقیمی وجود ندارد، چراکه در این چینش تمایل به بازشدگی و متعاقباً افزایش تغییرشکل‌های عمود بر دیواره در محور میانه و کاهش میزان تغییرشکل‌های افقی در محور رأس با افزایش میزان نشست در رأس دیواره جبران خواهد شد و آنچه مشخص است خاک موجود در رأس دیواره تمایل به پر کردن فضای خالی ایجادشده براثر تغییرشکل‌های عمود بر میانه یال را خواهد داشت.

لذا آنچه از تحلیل نتایج آورده شده در بالابر می‌آید این است که چینش موازی در کنترل میزان تغییرشکل‌های افقی کنج‌های بیرون زده می‌تواند عملکرد بهتری داشته باشد و درعین‌حال چینش متقاطع می‌تواند در کنترل میزان تغییرشکل‌های افقی در جهت X (تغییرشکل‌هایی که موجب بازشدگی پوشش شاتکریت در محور رأس می‌شوند) عملکرد بهتری داشته باشد. نکته‌ی حائز توجه این است که اولریچ و همکاران در دستنامه مهندسی ژئوتکنیک به این نکته در رابطه با اجرای مهاری‌ها اشاره نموده‌اند که چینش متقاطع باعث خودبه‌خود ازکارافتادن مهاری‌هایی می‌شود که در گوه گسیختگی قرارگرفته‌اند [۴۵].

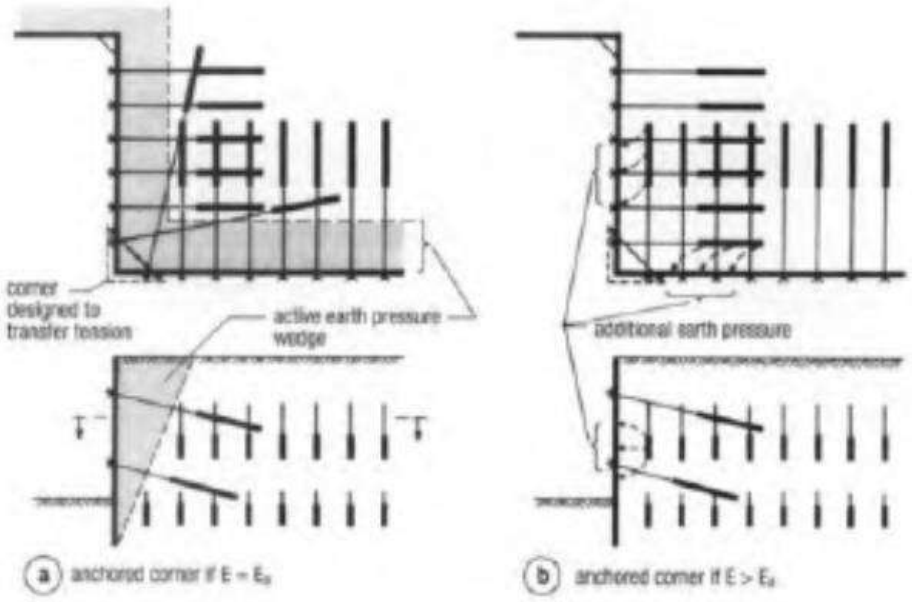


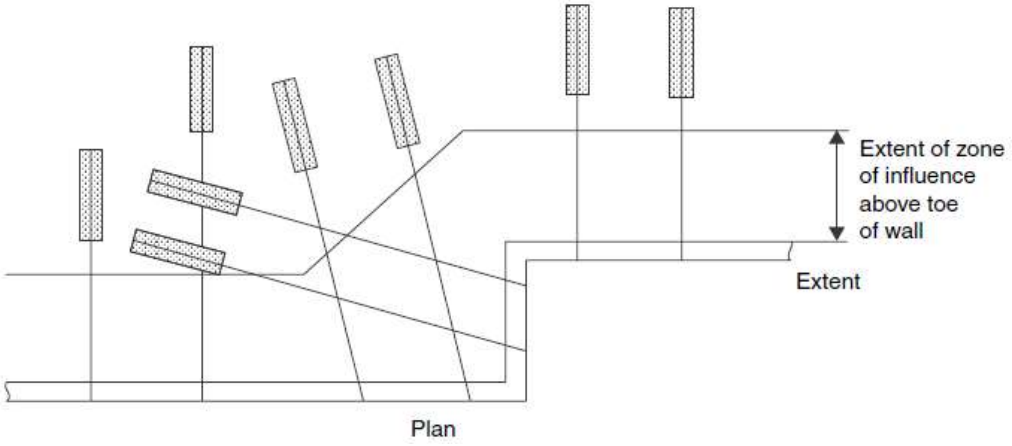
Fig. 25. Anchoring of a protruding wall corner

شکل (۴-۳۷) توصیه اولریچ و همکاران به عدم استفاده از چینش متقاطع در کنج‌های بیرون زده [۴۵].

در شکل (۴-۳۷) گوه لغزش احتمالی ایجادشده نشان داده‌شده است. بررسی هندسی این گوه نشان می‌دهد که تعداد قابل‌توجهی از میخ‌خاک‌ها ردیف‌های بالا و میانی به علت قرارگیری در ناحیه لغزش احتمالی امکان تحمل نیروهای اصطکاکی را در خود ندارند و دیواره در مقابل ایجاد تغییرشکل‌های افقی عملکرد خوبی نخواهد داشت.

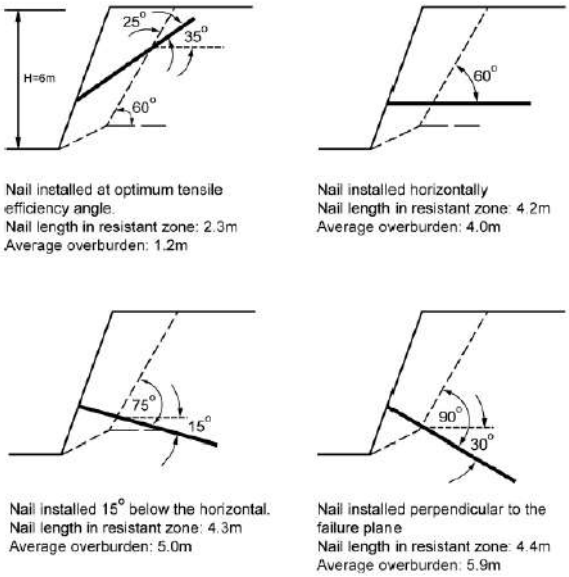
از طرفی بورلند و همکاران در راهنمای مهندسی ژئوتکنیک موسسه مهندسی عمران[۱] با اشاره به نقطه‌نظر استاندارد بریتانیا شماره ۸۰۸۱ این نکته را بیان می‌کنند که در طراحی سیستم‌های پایدارسازی با استفاده از مهاری‌ها در کنج‌های بیرون زده باید به این نکته توجه داشت که طول گیرداری مهاری‌ها در محدوده گوه لغزش قرار نگیرد، زیرا باعث ازکارافتادن خودبه‌خود این مهاری‌ها می‌شود [۴۶, ۴۷].

[۱] ICE – Institution of Civil Engineering



شکل (۴-۳۸) پیشنهاد بور لند و همکاران برای زاویه صحیح اجرای مهاری‌ها جهت افزایش پایداری بیشتر کنج‌های بیرون زده [۴۶]

جمعی از متخصصان حوزه پایدارسازی دیواره‌های با استفاده از روش میخکوبی در راهنمای عملی طراحی دیوارهای میخکوبی شده سیریا[۱] بیان می‌کنند زمانی که زاویه تمایل میخ (افقی یا عمودی) در طراحی اهمیت پیدا کند باید این زاویه به‌گونه‌ای محاسبه و برای اجرا در نظر گرفته شود که بیشترین طول گیرداری را برای میخ‌ها جهت کنترل گوه لغزشی فراهم آورند [۴۸].

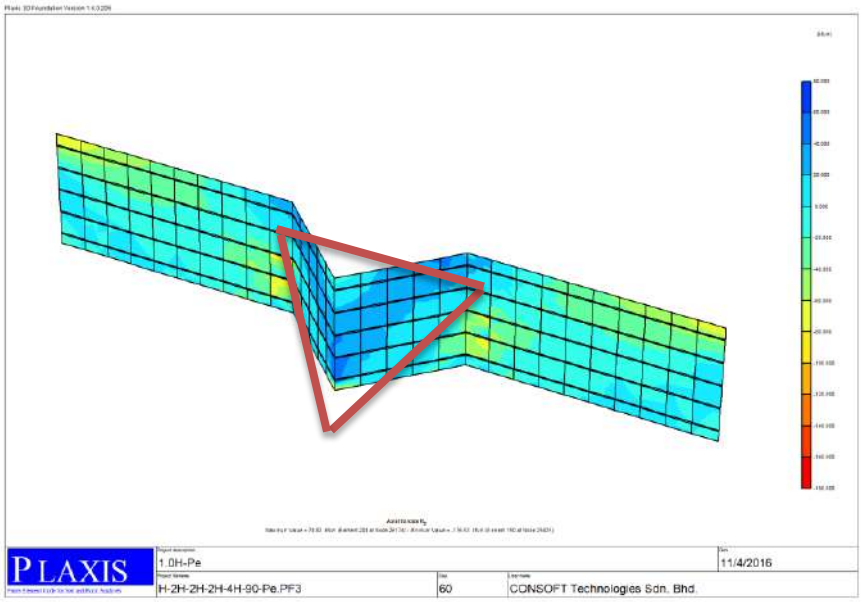


[۱] Ciria

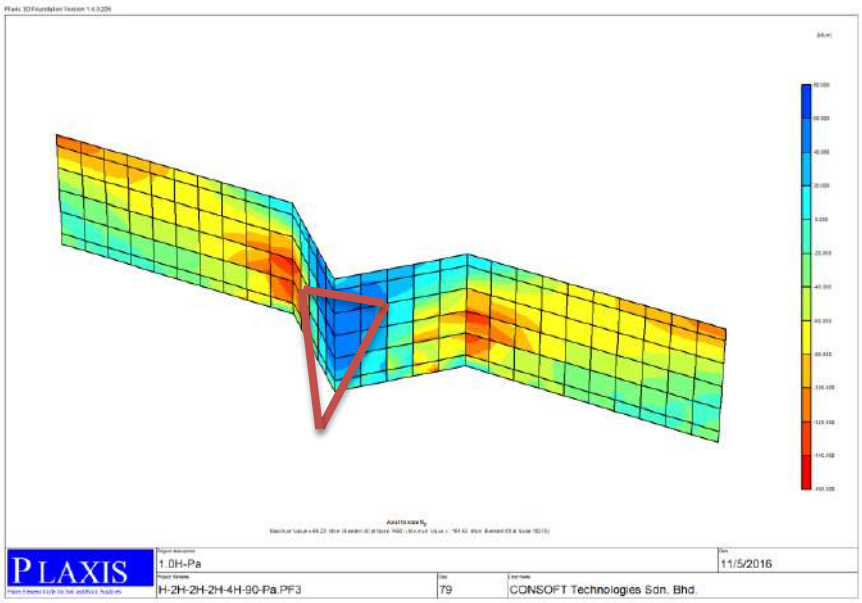
شکل (۴-۳۹) اشاره به زاویه تمایل میخ جهت بیشینه شدن طول گیرداری آن [۴۸].

از جمع‌بندی نقطه نظرات بیان‌شده در منابع ذکرشده در بالا نتیجه می‌شود که جهت پایداری بیشتر گوه گسیختگی در کنج بیرون زده زاویه قرارگیری میخ‌خاک‌ها باید به‌گونه‌ای باید که بیشترین گیرداری را ایجاد کند و عبارتی دیگر مجموع طول نیل‌هایی که در گوه گسیختگی قرار می‌گیرند (و متعاقباً توان ایجاد مقاومت اصطکاکی در مقابل لغزش گوه را ندارند) کمتر باشد که در این تحقیق میخ خاک‌هایی که در مقابل لغزش گوه توانایی ایجاد مقاومت اصطکاکی ندارند در حالت چینش متقاطع بیشتر از چینش موازی است.

در شکل (۴-۴۰) و شکل (۴-۴۱) نمودارهای نیروهای برشی ایجادشده در پوشش شاتکریت در حالت چینش متقاطع و موازی آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است می‌توان با تطبیق نمودارهای ذیل با نظریه‌های ذکرشده در بالا دریافت که ایجاد این گوه باعث عدم عملکرد اصطکاکی میخ‌خاک‌ها ردیف‌های فوقانی دیواره خواهد بود. دلیل پایداری بیشتر و تغییرشکل‌های کمتر محور رأس در چینش موازی نیز موارد ذکرشده در فوق است. برای روشن شدن این موضوع برای مثال دیواری با طول بعد کنج بیرون زده 1.0H طبق شکل (۴-۴۰) و شکل (۴-۴۱) در نظر گرفته می‌شود. طول کل میخ‌خاک‌ها در آرایش متقاطع در محدوده‌ی کنج بیرون زده ۳۹۶ متر و در آرایش موازی ۴۳۲ متر طول است. طبق محاسبات هندسی انجام‌شده تقریبی میزان ۲۸۸ متر طول از مجموع ۳۹۶ متر طول میخ‌خاک در چینش متقاطع در خارج از گوه لغزش تقریبی قرارگرفته‌اند که نشان‌دهنده کارکرد میزان ۷۲ درصد طول میخ‌خاک‌ها است. از طرفی دیگر در چینش موازی میزان ۳۸۴ متر طول از مجموع ۴۳۲ متر طول میخ‌خاک در چینش موازی خارج از گوه لغزش تقریبی قرارگرفته‌اند که نشان‌دهنده کارکرد میزان ۸۸ درصد طول میخ‌خاک‌ها است.



شکل (۴-۴۰) گوه‌ایجادشده در کنج در حالت چینش متقاطع که با بررسی نیروهای برشی موجود در پوشش شاتکریت تصویر شده است.



شکل (۴-۴۱) گوه‌ایجادشده در کنج در حالت چینش موازی که با بررسی نیروهای برشی موجود در پوشش شاتکریت تصویر شده است.

فصل ۵:

جمع‌بندی و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

آنچه در این تحقیق ارائه شد، تحلیل رفتاری سه‌بعدی کنج‌های بیرون زده و حتی به‌صورت جامع‌تر گودهای میخکوبی شده ا ست که همچنان مبحثی جذاب و نا شناخته برای مهند سین ژئوتکنیک است. آنچه تا بدین جا آورده شد مطالعاتی اولیه در بحث رفتار کنج‌های بیرون زده و اثر دو چینش متداول میخ‌خاک بر رفتار آن‌ها بود. باوجود نواقص احتمالی این تحقیق، نتایج بحث شده در ف صل حاضر به‌صورت اجمالی و خلاصه ارائه می‌گردند.

۵-۱-۱- جمع‌بندی

- در مدل‌سازی‌های اولیه این تحقیق آورده شده است که، جهت شروع مدل‌سازی باید فواصل همسایگی را به میزان مناسب انتخاب کرد تا از افزایش حجم مدل جلوگیری نمود. در این تحقیق پیشنهاد شده ا ست که فوا صل هم‌سایگی از جلو و عقب و کنار برابر با 2H یعنی دو برابر ارتفاع و عمق مدل از کف برابر 4H یعنی چهار برابر ارتفاع انتخاب شوند.
- در این تحقیق نشان داده شد که اثر برآمدگی کف گود می‌تواند تأثیر بسیار مهمی در صحت نتایج دا شته با شد. در این رابطه دو راه‌حل کلی وجود دارد : ا ستفاده از مدل‌های رفتاری توسعه‌یافته جدید که میزان برآمدگی کف فقط ناشی از ترکیب تنش نقاط رویی نباشد و دیگری استفاده از روش‌هایی جهت حذف اثر برآمدگی کف. دقت شود که استفاده ازاین‌روش‌ها همچون زیاد کردن مدول باربرداری کف زمانی مجاز است که هدف اصلی تحقیق بررسی کیفی رفتار تغییرشکلی کنج بیرون زده باشد.
- در این تحقیق نشان داده شد که مدل رفتاری پو شش بتنی شاتکریت می‌تواند اثر زیادی بر میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده در دیوار دا شته با شد. بنابراین می‌بایست در مدل‌های سه‌بعدی خواص مقاومتی پو شش شاتکریت را با مدل الا ستو پلا ستیک در نظر گرفت تا روند ایجاد نیروهای مقاوم در شاتکریت تا زمانی که کرنش‌ها اضافه می‌شوند ادامه‌دار نباشد.

- چینش موازی می‌تواند در کنترل تغییر شکل‌های افقی دیوار عملکرد بهتری داشته باشد و دلیل این عملکرد در اتصال بهتر توده ناپایدار کنج بیرون زده به توده عقب دیوار است و این‌گونه است که می‌توان بر ظرفیت اصطکاکی میخ خاک های بیشتری در کنترل تغییرشکل‌های افقی دیواره اتکا نمود.
- چینش متقاطع به علت تشکیل گوه‌ای صلب که متشکل از میخ‌خاک‌ها درهم‌تنیده شده است، در کنترل میزان تغییرشکل‌های افقی رأس گود نمی‌تواند عملکرد خوبی داشته باشد چراکه این توده صلب با وجود تسلیح مضاعف از لحاظ رفتاری می‌تواند مانند یک بلوک لغزنده بر روی توده‌ی خاک عقبی که به بدنه اصلی خاک مهارشده است حرکت کند.
- بررسی تغییرشکل‌های افقی در راستای محور X نشان می‌دهد که چینش موازی در کنترل تغییرشکل‌های که باعث بازشدگی پوشش شاتکریت می‌شود نمی‌تواند عملکرد مناسبی داشته باشد و با افزایش طول بعد کنج بیرون شده یال دیوار تبدیل به دیواری می شود که تمام میخ‌خاک‌ها آن با زاویه‌ای برابر ۴۵ درجه نسبت به دیوار قرار دارند اما از طرف دیگر با افزایش طول یال کنج بیرون زده در چینش متقاطع میخ خاک ها خارج از توده تسلیح مضاعف به‌خوبی می‌توانند در کنترل این تغییرشکل‌ها موفق عمل کنند.
- بعنوان آخرین و مهم‌ترین نتیجه این تحقیق می‌توان بیان نمود که در کنج‌های بیرون زده با طول یال کمتر از طول بزرگ‌ترین میخ خاک استفاده از آرایش میخکوبی موازی با نیمساز همراه با سیستم تای بک (دوخت دو طرف یال‌های کنج بیرون زده) می‌تواند به‌عنوان سیستمی‌آیده آل جهت کنترل تغییر شکل‌های کنج بیرون زده توصیه شود و در طول‌های یال بیشتر می‌توان از سیستم ترکیبی آرایش موازی و متقاطع جهت کنترل بهتر تغییرشکل‌ها استفاده نمود.

۵-۱-۲- پیشنهادها جهت مطالعات آتی

در این قسمت پیشنهادهایی جهت مطالعات آتی سایر محققین آورده شده است :

- بررسی اثر سربار بر تغییرشکل‌های کنج بیرون زده
- بررسی خواص آزمایشگاهی الاستو - پلاستیک شاتکریت و اعمال نتایج آزمایشات در مدل عددی
- بررسی ایده ترکیب آرایش موازی نیم ساز و متقاطع در کنج‌های بیرون زده با یال طویل
- بررسی ضرایب اطمینان دو آرایش و مقایسه آن‌ها با ضریب اطمینان در حالت کرنش مسطح
- بررسی ارتفاع‌های متخلف دیواره و اثر آن بر رفتار کنج بیرون زده
- بررسی خاک‌های مختلف با خواص مکانیکی متفاوت و اثر آن‌ها بر رفتار کنج بیرون زده
- بررسی رفتار کنج‌های بیرون زده در یک پلان کامل گودبرداری شده و بررسی اثرات متقابل کنج‌های محدب و مقعر بر یکدیگر

مراجع

مراجع

1. Bruce, D. and R. Jewell, *Soil nailing: application and practice-part 1*. Ground Engineering, 1986. **19**(8): p. 10-15.
2. Ortigão, J., E. Palmeira, and A. Zirlis, *EXPERIENCE WITH SOIL NAILING IN BRAZIL: 1970-1994.* Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering, 1995. **113**(2): p. 93-106.
3. Lazarte, C., et al., *Geotechnical Engineering Circular No. 7: Soil Nail Walls.* Federal Highway Administration, Washington, DC, 2003.
4. Peck, R.B. *Deep excavations and tunnelling in soft ground*. in *Proc. 7th int. conf. on SMFE*. 1969.
5. Goldberg, D.T., W.E. Jaworski, and M.D. Gordon, *Lateral Support Systems and Underpinning: Design and Construction*. 1976: Federal Highway Administration, Offices of Research & Development.
6. Ou, C.-Y., D.-C. Chiou, and T.-S. Wu, *Three-dimensional finite element analysis of deep excavations.* Journal of Geotechnical Engineering, 1996. **122**(5): p. 337-345.
7. Smith, I. and N. Su, *Three-dimensional FE analysis of a nailed soil wall curved in plan.* International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997. **21**(9): p. 583-597.
8. Zhang, M., E. Song, and Z. Chen, *Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM).* Computers and Geotechnics, 1999. **25**(4): p. 191-204.
9. 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.
10. Yang, M.Z. and E.C. Drumm, *Numerical analysis of the load transfer and deformation in a soil nailed slope.* Geotechnical special publication, 2000: p. 102-116.
11. Khosravi, M. and M. Khabbazian, *Presentation of critical failure surface of slopes based on the finite element technique*. GeoCongress ۲۰۱۲ ,۲۰۱۲: p. 536-545.
12. Xu, Q., et al., *A temperature-driven strength reduction method for slope stability analysis.* Mechanics research communications, 2009. **36**(2): p. 224-231.
13. Lima, A.P., A. Sayão, and D.M.S. Gerscovich. *Considerations on the Numerical Modeling of Nailed Soil Excavations*. in *Proc. of the 4rd Int. Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering*. 2003.
14. Lima, A., D. Gerscovich, and A. Sayão, *Considerations on the soil nailing technique for stabilizing excavated slopes.* stress, 2004. **10**: p. 0.69.
15. Ou, C.-Y., P.-G. Hsieh, and D.-C. Chiou, *Characteristics of ground surface settlement during excavation.* Canadian Geotechnical Journal, 1993. **30**(5): p. 758-767.
16. Clough, G.W. and T.D. O'Rourke. *Construction induced movements of insitu walls*. in *Design and performance of earth retaining structures*. 1990. ASCE.

17. Finno, R.J. and J.F. Roboski, *Three-dimensional responses of a tied-back excavation through clay.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005.
18. Gassler, G. and G. Gudehus. *Soil nailing-some aspects of new technique*. 1981. PROCEEDINGS OF TENTH ICSMFE.
19. Shen, C., et al., *Field measurements of an earth support system.* Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1 :(۱۲)۱۰۷ .۹۸۱p. 1625-1642.
20. Mittal, S., *Soil Nailing Application in erosion control–an experimental study.* Geotechnical & Geological Engineering, 2006. **24**(3): p. 675-688.
21. Fan, C.-C. and J.-H. Luo, *Numerical study on the optimum layout of soil–nailed slopes.* Computers and Geotechnics, 2008. **35**(4): p. 585-599.
22. Babu, G. and V.P. Singh, *Simulation of soil nail structures using PLAXIS 2D.* Plaxis Bulletin Spring issue, 2009: p. 16-21.
23. Juran, I., et al., *Kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures.* Journal of geotechnical engineering, 1990. **116**(1): p. 54-72.
24. Schlosser, F., *The multicriteria theory in soil nailing.* Ground Engineering, 1991. **24**(9.(
25. Jewell, R. and M. Pedley, *Analysis for soil reinforcement with bending stiffness.* Journal of geotechnical engineering, 1992. **118**(10): p. 1505-1528.
26. Zhou, W.-H. and J.-H. Yin, *A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis.* Computers and Geotechnics, 2008. **35**(3): p. 479-488.
27. Zhang, M., et al., *Numerical investigation of the convex effect on the behavior of crossing excavations.* Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2011. **12**(10): p. 747-757.
28. Kim, Y., et al., *The effect of pressure-grouted soil nails on the stability of weathered soil slopes.* Computers and Geotechnics, 2013. **49**: p. 253-263.
29. Wei, L., T. Koutnik, and M. Woodward. *A slope stability case study by limit equilibrium and finite element methods*. in *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*. 2010. ASCE.
30. Fu, W .and Y. Liao, *Non-linear shear strength reduction technique in slope stability calculation.* Computers and Geotechnics, 2010. **37**(3): p. 288-298.
31. Wei, W. and Y. Cheng, *Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods.* Computers and Geotechnics, 2010. **37**(5): p. 602-618.
32. Nian, T.-K., et al., *Three-dimensional strength-reduction finite element analysis of slopes: geometric effects.* Canadian Geotechnical Journal, 2012. **49**(5): p. 574-588.
33. Maleki, M.R. and M. Mahyar, *Effect of nail characteristics on slope stability based on limit equilibrium and numerical methods.* Geomechanics and Geoengineering, 2012. **7**(3): p. 197-207.
34. Zhao, W., et al., *Researches on the Influence on Neighboring Buildings by Concave and Convex Location Effect of Excavations in Soft Soil Area.* Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015. **79**(3-4): p. 351-369.
35. ZHAO, S.-l., et al., *The Feature of Deformation at Convex Corner of Deep Foundation Pit Based on FLAC3D.* 2016.

36. Brinkgreve, R. and P. Vermeer ,*Plaxis users manual.* Balkema, Rotterdam (The Neetherlands), 2002.
37. Singh, V.P. and G.S. Babu, *2D numerical simulations of soil nail walls.* Geotechnical and Geological Engineering, 2010. **28**(4): p. 299-309.
۳۸. ترک, م.ک., مقایسه تحلیل دو بعدی و سه بعدی دیوار میخکوبی شده و تعمیم نتایج دو بعدی به سه بعدی, in دانشکده مهندسی عمران. آذر ماه ۱۳۹۳, دانشگاه علم و صنعت ایران.
39. Chu, L.-M. and J.-H. Yin, *Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests.* Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005. **131**(9): p. 1097-1107.
40. Wang, Z. and W. Richwien, *A study of soil-reinforcement interface friction.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002. **128**(1): p. 92-94.
41. Brinkgreve, R., E. Engin, and W. Swolfs, *PLAXIS 3D user manual.* Plaxis BV, 2010.
42. Durgunoglu, H., H. Kulac, and B. Arkun, *A Deep Retaining System Construction with Soil Nailing in Soft Rocks in Istanbul, Turkey, SARA-2003 Conference, June 22-26.* 2003 ,MIT Cambridge, USA.
43. Durgunoğlu, H.T., et al., *Performance of very deep temporary soil nailed walls in Istanbul.* 2007.
۴۴. نوی, و.ق., بهینه سازی سیستم های پایدار سازی گودهای عمیق با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی, in دانشکده مهندسی عمران. شهریور ماه ۱۳۹۳, دانشگاه علم و صنعت ایران.
45. Smoltczyk, U., *Geotechnical Engineering Handbook, Procedures*. Vol. 2. 2003: John Wiley & Sons.
46. Burland John, B., *ICE manual of geotechnical engineering*.
47. Institution, B.S., *British Standard Code of Practice for Ground Anchorages.* 1989, BSI: London.
48. Phear, A., et al., *Soil nailing-best practice guidance*. 2005.

Abstract:

In excavation operations, one of the most important and effective parameters on its overall stability and performance is wall deformation occurred due to its construction. Variety of methods is created to reduce and control the deformations and resist wall rupture, which one of the most effective, affordable and widely used method is soil nailed walls. Prediction of deformations and optimum design of soil nails system is a critical issue in the process of soil nail wall system design that is studied and investigated by many researchers. Numerical analysis and software modeling are common evaluation methods of such geotechnical behavior issues. Analysis, calculated deformations and the optimum nail density of convex corners is always a concern and problem for geotechnical engineers in the field of analysis and design of excavations that absence of accurate estimation of these factors can lead to irreparable damage. On the other hand, if the values of these deformations and density of designed soil nails calculated more than needed amount to meet the desired safety factor will cause increased financial costs. Due to time-consuming three-dimensional analysis of soil nailed walls these walls are often models in two-dimensional analysis and results in two-dimensional analysis usually provides conservative values. But convex corners due to increased reinforcement have been excluded from mentioned rules. The purpose of this study is to assess the differences between the results of the three-dimensional analysis and two-dimensional simplified analysis assuming plane strain state. For this purpose finite element software Plaxis 2D software and Plaxis 3D Foundation models are made and after analyzing, deformations are compared with each other. In this regard, the studies in this research will show results of convex corners modeling that really affected by three-dimensional geometric conditions and compares them with the results of two-dimensional analysis.

Keywords:

Convex corners, Three-dimensional analysis, Deformation, Soil nailed walls, Finite element method

Iran University of Science and Technology
School of Civil Engineering

Numerical evaluation of two-dimensional and three-dimensional behaviour of soil-nailed walls in convex corners

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science in Geotechnical Engineering

By:
Mohammd Reza Nabizadeh Shahrbabak

Supervisor:
Dr. Mohsen Saber Mahani

November 2016