

دانشگاه صنعتی شاهرود

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی اثر سپر کوبی مجدد بر رفتار سپرهای فولادی با خوردگی بالا

استاد راهنمای اول: دکتر فرشید علایی

استاد راهنمای دوم: دکتر رضا نادری

ارائه کننده: فاطمه عبدی

بررسی اثر سپرکوبی مجدد بر رفتار سپرهای فولادی با خوردگی بالا

خلاصه

سپرهای فولادی قرار گرفته در محیط های دریایی گاه آن چنان دچار خوردگی می شوند که ترمیم آنها از طریق روکش کردن آنها با مواد مقاوم در برابر خوردگی مؤثر نمی باشد زیرا به دلیل خوردگی بالا - که معمولاً در ناحیه پاشش آب و به علت جزر و مد اتفاق می افتد- اتصال بین میل مهار و سپر به تدریج از بین رفته و ایمنی سازه با خطر روبه رو می گردد و تغییر مکان های بزرگی در کل سیستم خاک و سازه ایجاد می شود. این تغییر مکان ها سبب گسیخته شدن خاک پشت سپر می گردند. در چنین شرایطی که سپر یکی از تکیه گاه های خود را از دست داده و سختی آن کاهش قابل ملاحظه ای یافته است، استفاده از روش های متداول ترمیم برای بهبود عملکرد سازه ای سپر، راه حل مناسبی به نظر نمی رسد.

به طور متداول در سازه های سپری، دیواره اصلی سپر به شدت آسیب می بیند در حالی که کابل ها و سپرهای مهاری قابل استفاده مجدد می باشند. با کوبش سپر جدید، از کابل ها و سپرهای مهاری به طور کامل و از دیواره اصلی سپر به طور نسبی استفاده می گردد و به این ترتیب ملاحظات اقتصادی نیز در نظر گرفته می شود. جنبه جدید و نوآوری در این تحقیق، بررسی توأم رفتار سپر جدید در کنار سازه موجود در حمل نیروهای وارده و همچنین بررسی رفتار خاک در نواحی مختلف می باشد.

در این تحقیق از نرم افزار PLAXIS برای مدل سازی استفاده شده است. مدل اولیه با یک ردیف سپر اولیه (خورده شده) و یک ردیف سپر کمکی که دارای دو سوم مشخصات مقاومتی مقطع سپر اول می باشد، ساخته شده است. مدل های بعدی با لایه های مختلف خاک و سپس با استفاده از یک سپر کمکی با سطح مقطع کمتر از نصف سپر اول و با عمق های نفوذ مختلف به نرم افزار معرفی گردیده. همچنین مدل هایی با مصالح مختلف پر کننده فضای بین دو سپر

ساخته شده است. در تمام این مدل ها رفتار خاک در اندرکنش با سپر و رفتار ترکیبی سپر اول، مصالح پرکننده و سپر دوم به طور کامل بررسی گردیده است.

کلمات کلیدی: خوردگی، سپر فولادی، خاک، مهار، تغییر شکل

فهرست مطالب

فصل دوم: تحلیل سپرهای فولادی به روش دستی

| | | | | |
|----|--------|----------|-----------|---|
| ۱۹ | سپری | دیوارهای | طراحی | ۱-۲- اصول |
| ۲۰ | خیز | خمشی و | فشار خاک، | ۱-۱-۲- فشار خاک، |
| ۲۲ | | | | ۲-۱-۲- الگوهای شکست در دیوارهای سپری مهار شده |
| ۲۴ | آب | و خاک | فشارهای | ۳-۱-۲- فشارهای |
| ۲۶ | | | | ۴-۱-۲- بارگذاری اعمالی بر روی خاک پشت دیوار |
| ۲۷ | رق | مس | خاک | ۵-۱-۲- خاک |
| ۲۸ | ر | دیوار | اصطکاک | ۶-۱-۲- اصطکاک |
| ۲۹ | سپرهای | طراحی | سپرهای | ۲-۲- طراحی |
| ۲۹ | شده | مهار | سپرهای | ۱-۲-۲- سپرهای |
| ۳۰ | ای | مفصلی | پای | ۲-۲-۲- سپر مهار شده با پای |
| ۳۳ | رسی | مفصلی | پای | ۳-۲-۲- سپر مهار شده با پای |
| ۳۵ | شده | مهار | سپرهای | ۴-۲-۲- کاهش لنگر برای |

فصل اول: آشنایی با سازه های سپری

- ۱-۱-۱ م ق د م ه
.....
- ۲-۱-۱ س پ ر ه ای ف و ل ا د ی
.....
- ۳-۱-۲-۱ م ق ط ع س پ ر ه ای ف و ل ا د ی
.....
- ۳-۱-۱-۲-۱ م ق ط ع ل ا ر س ن
.....
- ۵-۱-۲-۱ م ق ط ع Z ش ک ل
.....
- ۶-۱-۲-۱ م ق ط ع ب ا ج ان ص ا ف (..... م س ت ق یم)
.....
- ۷-۱-۲-۱ س پ ر ه ای ب ا پ ر د ا خ ت س ر د
.....
- ۹-۱-۲-۱ م ق ط ع ب ا م د و ل ب ا ل ا
.....
- ۹-۲-۲-۱ خ ص و ص ی ا ت م ق ط ع ف و ل ا د ی
.....
- ۹-۱-۲-۲-۱ خ ص و ص ی ا ت ا ص ل ی
.....
- ۱۰-۲-۲-۱ ک ا ر آ م د ی م ق ط ع
.....
- ۱۱-۲-۲-۱ ق ف ل و ب س ت
.....
- ۱۲-۲-۱-۳ کاربرد سپرهای فولادی در سازه ها
.....
- ۱۴-۲-۱-۱ ا ح د ا ت د ی و ا ر ه ای ح ا ئ ل ب ا س پ ر ک و ی
.....
- ۱۶-۲-۳-۱ م ه
.....

۳۵

۲-۲-۴-۱- سپرهای کوبیده شده در ماسه

- ۵۷ ۳-۱۰-۲-۳- انتگرال گیری عددی اجزای مثلثی
.....
- ۵۸ ۳-۱۰-۲-۴- مشتقات توابع شکل
.....
- ۵۹ ۳-۱۰-۲-۵- محاسبه ماتریس سختی اجزا
.....
- ۵۹ ۳-۱۰-۳- تئوری تغییر شکل خاک
.....
- ۶۰ ۳-۱۰-۳-۱- معادلات پایه تغییر شکل محیط پیوسته
.....
- ۶۱ ۳-۱۰-۳-۲- گسسته سازی اجزای محدود
.....
- ۶۳ ۳-۱۰-۳-۳- انتگرال گیری ضمنی مدل پلاستیک دیفرانسیلی
.....

فصل چهارم: معرفی پروژه اسکله سپری بندر لنگه

- ۱-۴-
.....
- ۶۶
.....
- ۶۷ ۱-۴- اطلاعات کلی در رابطه با سازه اسکله قدیمی بندر لنگه
.....
- ۶۸ ۲-۴- شرایط محیطی و اقلیمی سازه
.....
- ۶۸ ۴-۲-۱- وضعیت دریایی منطقه
..... ب
.....
- ۷۰ ۴-۳- معرفی اجزا و المان های سازه
.....
- ۷۰ ۴-۳-۱-
.....
- ۷۰ ۴-۳-۲- میل مهارهای سپر
.....
- ۷۱ ۴-۴- بررسی آسیب ها
.....
- ۷۱ ۴-۴-۱-
.....

| | | |
|----|-------------------|------------------------------------|
| ۷۳ | میل مه‌اره‌ای سپر | ۲-۴-۴ |
| ۷۳ | ..... |  |
| ۷۳ | ..... | ۵-۴- آزمایش ضخامت سنجی از سپر اصلی |
| ۷۷ | ..... | ۶-۴- مشخصات ژئوتکنیکی |

فصل پنجم: تحلیل عددی سیستم ترکیبی سپرها

| | | |
|-----|-------|--|
| ۷۹ | ..... | ۱-۵- م ق دم ه |
| ۷۹ | ..... | ۲-۵- بررسی اولی مدل |
| ۸۲ | ..... | ۱-۲-۵- خصوصیات مصالح |
| ۸۳ | ..... | ۳-۵- مدل ۱- مدل سازی سپر اولیه بدون میل مهار |
| ۸۵ | ..... | ۱-۳-۵- بارگذاری |
| ۸۷ | ..... | ۱-۱-۳-۵- روش های مدل سازی فشار آب در حالت جزر و مدی |
| ۸۸ | ..... | ۲-۱-۳-۵- نتایج حاصل از تحلیل |
| ۹۱ | ..... | ۴-۵- مدل ۲- سپر اولیه با میل مهار |
| ۹۳ | ..... | ۵-۵- مدل ۳- بررسی اثر خوردگی با گذشت زمان و روش مدل کردن وردگی |
| ۹۵ | ..... | ۱-۵-۵- کاهش سطح مقطع مهار تا ۵۰٪ |
| ۹۹ | ..... | ۲-۵-۵- کاهش سطح مقطع مهار تا ۶۷٪ |
| ۱۰۰ | ..... | ۳-۵-۵- کاهش سطح مقطع مهار تا ۷۵٪ |

۱۰۳ ۶-۵- مدل ۴- مدل کامل (شامل سپر اول و دوم و بارهای وارده)

۱۰۴ ۱-۶-۵ نَحْوَه مَدَل سَازِي

۱۰۶ ۲-۶-۵ شَبِيه سَازِي مَرَاحِل تَحْلِيل

۱۰۸ ۱-۲-۶-۵ مَرَحَلَه اَوَّل

۱۰۹ ۲-۲-۶-۵ مَرَحَلَه دَوَم

۱۱۰ ۳-۲-۶-۵ مَرَحَلَه سَوَم

۱۱۱ ۴-۲-۶-۵ مَرَحَلَه

۱۱۱ ۵-۲-۶-۵ مَرَحَلَه پَنجَم

۱۱۲ ۶-۲-۶-۵ مَرَحَلَه شَشْتَم

۱۱۳ ۷-۲-۶-۵ مَرَحَلَه هَفْتَم

۱۱۵ ۸-۲-۶-۵ مَرَحَلَه هَشْتَم

۱۱۵ ۹-۲-۶-۵ مَرَحَلَه نَهْم

۱۱۶ ۳-۶-۵ نَتَايِج حَاصِل از تَحْلِيل

۱۱۶ ۱-۳-۶-۵ مَرَحَلَه اَوَّل

۱۱۸ ۲-۳-۶-۵ مَرَحَلَه دَوَم

۱۱۹ ۳-۳-۶-۵ مَرَحَلَه سَوَم

۱۲۰ ۴-۳-۶-۵ مَرَحَلَه چَهَارَم

۱۲۱ ۵-۳-۶-۵ مَرَحَلَه پَنجَم

۱۲۳ ۶-۳-۶-۵ مَرَحَلَه شَشْتَم

۱۲۴ ۷-۳-۶-۵ مَرَحَلَه هَفْتَم

۱۲۶ ۸-۳-۶-۵ مَرَحَلَه هَشْتَم

۱۲۶

تحلیل نتایج به روش بررسی پارامترها ۴-۶-۵

۱۲۸

بررسی سایر پارامترهای ممکن در مدل سازی ۷-۵

۱۳۲

استفاده از مقطع کوچک تر برای سپر دوم ۱-۷-۵

۱۳۲

استفاده از عمق نفوذ کمتر برای سپر دوم ۲-۷-۵

۱۳۵

تلفیق سپر با مقطع کوچکتر و عمق نفوذ کمتر ۳-۷-۵

۱۳۹

استفاده از ماسه به عنوان پر کننده بین دو سپر ۴-۷-۵

۱۴۳

استفاده از خاک های دیگر در مدل سازی ۵-۷-۵

۱۴۵

پی رسی ۱-۵-۷-۵

۱۴۵

پی رسی: استفاده از مقطع کوچکتر و عمق نفوذ کمتر برای سپر دوم ۲-۵-۷-۵

۱۴۹

۱۴۵

۱۷۳

فصل ششم: نتیجه گیری

ضمیمه ۱- برخی مشخصات سپرها

ض ۱-۱- فهرست اصطلاحات فنی و شناسایی سپرها

۱۷۵

ض ۲-۱- سفارش دادن سپر ۱۷۶

ض ۳-۱- قفل و بست ۱۷۶

ضمیمه ۲- روش مدل سازی در نرم افزار PLAXIS

۱۱-۳- نحوه مدل سازی در نرم افزار PLAXIS ۱۷۹

۱-۱۱-۳- معرفی تانت کلی سازه به نرم افزار ۱۸۰

۲-۱۱-۳- رسم سازه ۱۸۱

۱-۲-۱۱-۳- خطوط و نقاط ۱۸۱

۲-۲-۱۱-۳- تیرها (دیوارها و صفحات) ۱۸۱

۳-۲-۱۱-۳- فصل مشترک ۱۸۱

۴-۲-۱۱-۳- مهارهای انتها- گیردار ۱۸۳

۳-۱۱-۳- معرفی شرایط مرزی و بارها ۱۸۲

۱-۳-۱۱-۳- گیرداری استاندارد ۱۸۳

۲-۳-۱۱-۳- بارهای سطحی ۱۸۴

۴-۱۱-۳- خصوصیات مصالح ۱۸۴

۱-۴-۱۱-۳- خاک ۱۸۴

۲-۴-۱۱-۳- تیرها ۱۹۰

۳-۴-۱۱-۳- مهارها ۱۹۲

۵-۱۱-۳- گسسته سازی ۱۹۳

۱-۵-۱۱-۳- درشتی کلی ۱۹۳

۲-۵-۱۱-۳- تصحیح کلی ۱۹۳

| | | |
|-----|--|----------|
| ۱۹۴ | تصـحـیح مـحـلی | ۳-۵-۱۱-۳ |
| ۱۹۶ | شـرـایـط اولـیـه | ۳-۱۱-۶ |
| ۱۹۶ | غـیر فـعـال سـازـی مـؤلفـه هـای هـنـدسـه | ۳-۱۱-۶-۱ |
| ۱۹۶ | تغـیـر دـادـه هـای تـنـظـیـمـات مـصـالـح | ۳-۱۱-۶-۲ |
| ۱۹۷ | تـولـیـد تـنـش اولـیـه | ۳-۱۱-۶-۳ |

ضمیمه ۳- خوردگی در محیط های دریایی

| | | |
|-----|--|-------|
| ۱۹۸ | مقدمه | ض ۱-۳ |
| ۱۹۹ | شرایطی که در آن نیازی به کنترل خوردگی نمی باشد | ض ۲-۳ |
| ۱۹۹ | شرایطی که در آن نیاز به کنترل خوردگی می باشد | ض ۳-۳ |
| ۲۰۰ | روش های کنترل خوردگی | ض ۴-۳ |
| ۲۰۰ | اصول برخی خوردگی | ض ۵-۳ |
| ۲۰۱ | انواع خوردگی | ض ۶-۳ |
| ۲۰۲ | دلایل خوردگی | ض ۷-۳ |
| ۲۰۲ | مکانیزم خوردگی فولاد در آب دریا | ض ۸-۳ |
| ۲۰۳ | مناطق خوردگی شمع های فولادی | ض ۹-۳ |

| | |
|-----|---|
| ۲۰۴ | ض ۱۰-۳- عوامل محیطی اثرگذار بر نرخ خوردگی دریایی شمع های فولادی |
| ۲۰۷ | ض ۱۱-۳- عوامل دیگری که بر نرخ خوردگی اثر می گذارند |
| ۲۰۹ | ض ۱۲-۳- خوردگی در خاک |
| ۲۱۰ | ض ۱۳-۳- خوردگی گالوانیک فولاد در آب دریا |

منابع

| | |
|-----|-------|
| ۲۱۲ | |
|-----|-------|

فهرست اشکال

فصل اول

| | |
|----|---|
| ۴ | شکل ۱-۱- مقاطع قدیمی سپر |
| ۶ | شکل ۲-۱- مقاطع Z شکل |
| ۷ | شکل ۳-۱- مقاطع با جان صاف |
| ۸ | شکل ۴-۱- مقاطع تیپ سپرهای سرد نورد شده |
| ۱۱ | شکل ۵-۱- مقاطع Z شکل با کارآمدی بالا |
| ۱۲ | شکل ۶-۱- انواع قفل و بست (اتصال) در سپرها |
| ۱۳ | شکل ۷-۱- کاربردهای سپرهای فولادی |

- شکل ۱-۸- مراحل اجرای دیوار خاکریزی شده ۱۵
- شکل ۱-۹- مراحل اجرای دیوار لایروبی شده ۱۶
- شکل ۱-۱۰- انواع مختلف مهار سپرها ۱۷

فصل دوم

- شکل ۲-۱- مقایسه بین تکیه گاه های با پای گیردار و آزاد در زمین ۲۰
- شکل ۲-۲- نمودارهای معمول فشار خاک، برش، لنگر خمشی، و تغییر مکان ۲۱
- شکل ۲-۳- روش های شکست دیوارهای سپر مهار شده ۲۳
- شکل ۲-۴- گوه خاک برای تئوری فشار خاک کولمب ۲۵
- شکل ۲-۵- مختصات بوزینسک ۲۷
- شکل ۲-۶- مقادیر تنش ناشی از سربار در پشت دیوار در حالت دو بعدی ۲۷
- شکل ۲-۷- تأثیر اصطکاک در افزایش فشار مقاوم خاک ۲۹
- شکل ۲-۸- نمودار تغییر شکل و لنگر خمشی برای سپرهای مهار شده ۳۰
- شکل ۲-۹- سپر مهار شده که در لایه ماسه ای کوبیده شده است، ج ۳۲
- شکل ۲-۱۰- سپر مهار شده با پای مفصلی که در لایه رسی کوبیده شده است ۳۴
- شکل ۲-۱۱- نمودار $\log p$ در مقابل $Md / Mmax$ برای سپرهای کوبیده شده در ماسه ۳۷
- شکل ۲-۱۲- نمودار در مقابل $Md / Mmax$ عدد پایداری برای سپرهای کوبیده شده در رس ۳۸
- شکل ۲-۱۳- روش نمودار فشار محاسباتی ۴۰
- شکل ۲-۱۴- روش پای گیردار برای سپر کوبیده شده در ماسه ۴۳

فصل سوم

- شکل ۳-۱- توابع شکل المان خطی ۳ گرهی ۵۴
- شکل ۳-۲- توابع شکل برای المان های خطی ۵ گرهی ۵۵
- شکل ۳-۳- شماره گذاری و موقعیت محلی گره ها ۵۶

فصل چهارم

- شکل ۴-۱- موقعیت قرارگیری اسکله قدیمی و نمای کلی از اسکله بندر لنگه ۶۷
- شکل ۴-۲- بولت های اتصال دهنده سپر و ویل ۷۰
- شکل ۴-۳- نمایی از سپر خورده شده ۷۱
- شکل ۴-۴- خوردگی کامل شیت پایل در بعضی از نواحی پاشش آب ۷۱
- شکل ۴-۵- مقطع سپر ۷۳
- شکل ۴-۶- دیاگرام ضخامت سپر در ترازهای مختلف از موقعیت سوم ۷۵
- شکل ۴-۷- دیاگرام ضخامت سپر در ترازهای مختلف از موقعیت چهارم ۷۶

فصل پنجم

- شکل ۵-۱- شکل شماتیک اجزای تشکیل دهنده اسکله بندر لنگه ۷۸
- شکل ۵-۲- پلان موقعیت قرارگیری مهارها در بخشی از اسکله ۷۹
- شکل ۵-۳- سپر و مهار ۸۰
- شکل ۵-۴- خصوصیات مقطع سپر ۸۱
- شکل ۵-۵- مدل ساده بدون مهار ۸۲
- شکل ۵-۶- توزیع فشار آب در حالت بحرانی جزری ۸۵
- شکل ۵-۷- مدل سازی تراز سطح آب ۸۷
- شکل ۵-۸- شکل تغییر شکل یافته سیستم ۸۹
- شکل ۵-۹- شکل تغییر شکل یافته سیستم ۹۰
- شکل ۵-۱۰- تصویر کلی سیستم به همراه مهار چ ۹۱
- شکل ۵-۱۱- شکل تغییر شکل یافته سیستم ۹۲
- شکل ۵-۱۱- المان های تغییر شکل یافته در کنار المان های تغییر شکل نیافته ۹۳
- شکل ۵-۱۲- خوردگی کامل سپر در بعضی از نواحی پاشش آب ۹۵
- شکل ۵-۱۳- تغییر شکل سیستم- کاهش سطح مقطع مهار تا ۵۰٪ ۹۵
- شکل ۵-۱۴- نمودار نیروی برشی و لنگر خمشی- کاهش سطح مقطع مهار تا ۵۰٪ ۹۸

- شکل ۵-۱۵- تغییر شکل سیستم- کاهش سطح مقطع مهار تا ۶۷٪..... ۹۹
- شکل ۵-۱۶- تغییر شکل سیستم- کاهش سطح مقطع مهار تا ۷۵٪..... ۱۰۰
- شکل ۵-۱۷- نقاط پلاستیک ۱۰۱
- شکل ۵-۱۸- مهار، سپر اولیه و سپر دوم (کمکی) ۱۰۲
- شکل ۵-۱۹- شکل کلی سیستم- مهار، سپر اولیه و سپر دوم (کمکی)..... ۱۰۳
- شکل ۵-۲۰- مش بندی سیستم - نمای کلی ۱۰۶
- شکل ۵-۲۱- مش بندی سیستم - محدوده بین دو سپر ۱۰۶
- شکل ۵-۲۲- مرحله اول: سپر اولیه به همراه میل مهار ۱۰۸
- شکل ۵-۲۳- مرحله دوم: مرحله اعمال بار افقی به سپر اول ۱۰۸
- شکل ۵-۲۴- مرحله سوم: اضافه شدن سپر دوم ۱۰۹
- شکل ۵-۲۵- مرحله چهارم: اولین مرحله پر کردن فاصله بین دو سپر با بتن ۱۱۰
- شکل ۵-۲۶- مرحله پنجم: دومین مرحله پر کردن فاصله بین دو سپر با بتن ۱۱۱
- شکل ۵-۲۷- مرحله ششم: خاکبرداری به جهت تسهیل فرایند انتقال مهار از سپر اول به سپر دوم ۱۱۲
- شکل ۵-۲۸- مرحله هفتم: انتقال مهار از سپر اول به دوم ۱۱۳
- شکل ۵-۲۹- مرحله هشتم: برداشته شدن مهار مجازی... ۱۱۴
- شکل ۵-۳۰- مرحله نهم: مرحله اعمال بار سرویس ۱۱۶
- شکل ۵-۳۱- تغییر شکل سیستم- مرحله اول ۱۱۶
- شکل ۵-۳۲- تغییر شکل سیستم- مرحله دوم ۱۱۷
- شکل ۵-۳۳- تغییر شکل سیستم- مرحله سوم ۱۱۹
- شکل ۵-۳۴- تغییر شکل سیستم- مرحله چهارم ۱۲۲
- شکل ۵-۳۵- تغییر شکل سیستم- مرحله پنجم ۱۲۲
- شکل ۵-۳۶- تغییر شکل سیستم- مرحله ششم ۱۲۳
- شکل ۵-۳۷- تغییر شکل سیستم- مرحله هفتم ۱۲۵
- شکل ۵-۳۸- تغییر شکل سیستم- مرحله هشتم ۱۲۶
- شکل ۵-۳۹- تغییر شکل سیستم- مرحله نهم ۱۲۷
- شکل ۵-۴۰- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک ۱۲۹
- شکل ۵-۴۱- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی ۱۲۹

- شکل ۵-۴۲- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم ۱۳۱
- شکل ۵-۴۳- شکل تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم ۱۳۳
- شکل ۵-۴۴- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک ۱۳۴
- شکل ۵-۴۵- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی ۱۳۴
- شکل ۵-۴۶- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم ۱۳۵
- شکل ۵-۴۷- تصویر مدل- کاهش عمق نفوذ سپر دوم تا ۴ متر ۱۳۶
- شکل ۵-۴۸- شکل تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم ۱۳۷
- شکل ۵-۴۹- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک ۱۳۸
- شکل ۵-۵۰- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی ۱۳۸
- شکل ۵-۵۱- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم ۱۳۹
- شکل ۵-۵۲- سپر دوم با مقطع *PU12 10/10* و عمق نفوذ ۳ متر ۱۴۰
- شکل ۵-۵۳- شکل تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم ۱۴۱
- شکل ۵-۵۴- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک ۱۴۲
- شکل ۵-۵۵- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی ۱۴۲
- شکل ۵-۵۶- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم ۱۴۳
- شکل ۵-۵۷- تغییر شکل سیستم ۱۴۴
- شکل ۵-۵۸- نقاط پلاستیک ۱۴۴
- شکل ۵-۵۹- تصویر مدل با پی رسی ۱۴۵
- شکل ۵-۶۰- شکل تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم ۱۴۷
- شکل ۵-۶۱- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک ۱۴۷
- شکل ۵-۶۲- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی ۱۴۸
- شکل ۵-۶۳- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم ۱۴۸
- شکل ۵-۶۴- مدل پی رسی با مقطع *PU12 10/10* و عمق نفوذ ۳ متر ۱۴۹
- شکل ۵-۶۵- شکل تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم ۱۵۱
- شکل ۵-۶۶- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک ۱۵۱
- شکل ۵-۶۷- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی ۱۵۲
- شکل ۵-۶۸- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم ۱۵۲

ضمیمه ۱

| | |
|-----|-----------------|
| ۱۷۴ | شکل ض ۱-۱ |
| ۱۷۷ | شکل ض ۲-۱ |

ضمیمه ۲

| | |
|-----|--|
| ۶۵ | شکل ض ۱-۲- تنظیمات کلی خ |
| ۶۶ | شکل ض ۲-۲- گره ها و نقاط تنش |
| ۶۷ | شکل ض ۳-۲- تب <i>Dimension</i> |
| ۶۹ | شکل ض ۴-۲- مشخصات مهارهای انتها- گیردار |
| ۷۰ | شکل ض ۵-۲- مدل اولیه سیستم |
| ۷۳ | شکل ض ۶-۲- تب <i>General</i> |
| ۷۶ | شکل ض ۷-۲- تب <i>Parameters</i> |
| ۸۵ | شکل ض ۸-۲- تب <i>Interface</i> |
| ۸۸ | شکل ض ۹-۲- خصوصیات نیمرخ سپر |
| ۸۸ | شکل ض ۱۰-۲- مشخصات تیرها |
| ۹۱ | شکل ض ۱۱-۲- مشخصات مهارها |
| ۹۳ | شکل ض ۱۲-۲- مش بندی مدل اولیه |
| ۹۴ | شکل ض ۱۳-۲- مش بندی مدل، الف- نمای کلی، ب- فاصله بین دو سپر |
| ۹۷ | شکل ض ۱۴-۲- جدول روش <i>Ko</i> |
| ۱۸۹ | شکل ض ۱۵-۲- خستگی خوردگی فولاد نرمه در آب دریا با سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه |

ضمیمه ۳

| | |
|-----|---|
| ۱۸۵ | شکل ض ۱-۳- پروفیل خوردگی سپر فولادی |
| ۱۸۶ | شکل ض ۲-۳- تغییرات خوردگی آهن به صورت تابعی از شوری |

فصل اول: آشنایی با سازه های، سپری

۱-۱- مقدمه

اصطلاح سپر به هر نوع دیوار نگهدارنده اطلاق می شود که الف) به جای ریختن یا تزریق کردن، با راندن یا کوبیدن در خاک نصب می شود، و ب) دارای نسبتاً نازک و وزن کم است به طوری که وزن دیوار هیچ کمکی به پایداری دیوار نمی کند [۱].

صنعت مدرن سپرکوبی کمی بیش از ۱۰۰ سال قدمت دارد و شاید مهمترین تغییرات در نوع و انتخاب محصول از اوایل دهه ۱۹۷۰ شروع شده باشد. سپرها کاربردهای بسیار وسیعی دارند مخصوصاً تیغه ها و دیوارهای حائل دریایی که در جاهایی که محدودیت فضا وجود دارد، بسیار سودمندند. علاوه بر این، نوع خاصی

از دیوار حائل که به کافردم معروف است، به طور گسترده هم در سازه های موقت و هم در سازه های دائم به کار می رود [۱].

سپرها عموماً برای مقابله با فشارهای افقی ناشی از خاک و آب به کار می روند و مقاومت خود را از مقاومت افقی خاکی که در آن کوبیده شده اند و همینطور از تکیه گاه های افقی ای که از طریق مهارها و میلگردها در یک تراز بالاتر ایجاد شده، دریافت می کنند [۲].

سپرها از مصالح مختلفی ساخته می شوند که از آن جمله می توان به سپرهای چوبی، سپرهای بتنی پیش ساخته و سپرهای فولادی اشاره نمود. از سپرهای چوبی فقط در مورد سازه های سبک که در بالای سطح آب قرار دارند، استفاده می شود. سپرهای فولادی را می توان نوع پیشرفته سپرهای چوبی دانست. اولین تلاشها برای یافتن جایگزینی برای چوب در قرن نوزدهم و زمانی که مقاطع مختلفی از سپرهای چدنی تولید می شدند انجام شد [۳]. سپرهای بتنی پیش ساخته بسیار سنگین هستند و به منظور مقابله با نیروهای ایجاد شده در آنها در حین حمل و نقل، کوبیدن و بهره برداری، داخل آنها آرماتور بندی می شود. بتن قادر به فراهم ساختن عمر سرویس طولانی تحت شرایط عادی است اما در مقایسه با فولاد هزینه های اولیه نسبتاً بالاتری دارد. نصب سپرهای بتنی از سپرهای فولادی سخت تر است. مشاهدات درازمدت صحرایی نشان می دهد که سپرهای فولادی اگر به دقت طراحی شوند، عمر سرویس بالایی را نتیجه می دهند. سپرهای فولادی شامل مقاطع فولادی گرم نورد شده می باشد که قفل و بست هایی برای آن در نظر گرفته شده است. این قفل و بست ها، سپر های متوالی را به هم متصل می سازد تا تشکیل یک دیوار پیوسته دهند [۱].

استفاده از سپرهای فولادی راحت تر است زیرا قادر به مقاومت در برابر تنش های قابل توجهی در حین کوبیدن می باشند. وزن آنها نیز سبک بوده و قابل استفاده مجدد می باشند [۲]. انتخاب مصالح بستگی به مجموعه ای از عوامل دارد که شامل الزامات مقاومتی و محیطی می شود. طراح باید امکان خرابی مصالح و تأثیر آن بر تمامیت سازه ای سیستم را مد نظر قرار دهد. بیشتر سازه های دائم از بتن یا فولاد ساخته می شوند [۱]. به دلیل مزایای زیاد و کاربرد بالای سپرهای فولادی، در این فصل تنها این نوع سپر مد نظر قرار داده می شود و منظور از سپر در همه جا سپر فولادی می باشد.

۱-۲-سپرهای فولادی

با ورود به «عصر آهن» در اواسط دهه ۱۸۰۰، ساخت سپرهای فلزی، یک جهش طبیعی در پیشرفت این محصول به شمار می آمد. از چدن برای ساخت برخی مقاطع استفاده می شد اما به دلیل انعطاف پذیری اندک، توفیقی نیافت. با نزدیک شدن به انتهای این قرن، فولاد بسمر ۱ توسعه یافت و کارخانه ها شروع به تولید مقاطع گرم نورد شده / شکل، ناودانی و نبشی نمودند [۱].

۱-۲-۱- مقاطع سپرهای فولادی

اولین مقاطع فولادی موفق از قفل و بست های پرچی بهره می برد اما با بهبود روشهای نورد کردن، بعدها مقاطع بهتری تولید شدند [۲]. مقاطع سپر را می توان به دو دسته مقاطع Z شکل و مقاطع U شکل تقسیم نمود. در زیر به معرفی تعدادی از مقاطع متداول سپر پرداخته می شود.

۱-۱-۲-۱- مقاطع «لارسن»

مخترعان تلاش های زیادی برای توسعه سپرهایی کردند که شامل قفل و بست هایی باشد که به جای آنکه پس از پرچ کاری به تیر متصل شود، در حین فرایند تولید، به صورت غلتک هایی در آن جای گیرد. گرگسون ۲ (ایالات متحده) در سال ۱۸۹۹ نوعی قفل و بست حبابی و فکی را به ثبت رساند، هر چند این کار او باز هم منجر به تولید محصولاتی با مقطع مسطح و مدول مقطع نسبتاً پایین گردید [۱].

تریگو لارسن ۳ در سال ۱۹۰۴ موفق به ثبت یک مقطع عمیق و گرم نورد شده در آلمان گردید که مقاومت و کارآمدی دیوارهای فولادی را بسیار بالا می برد و پیشرفت بزرگی به شمار می آمد. فرض می شد که دیوار

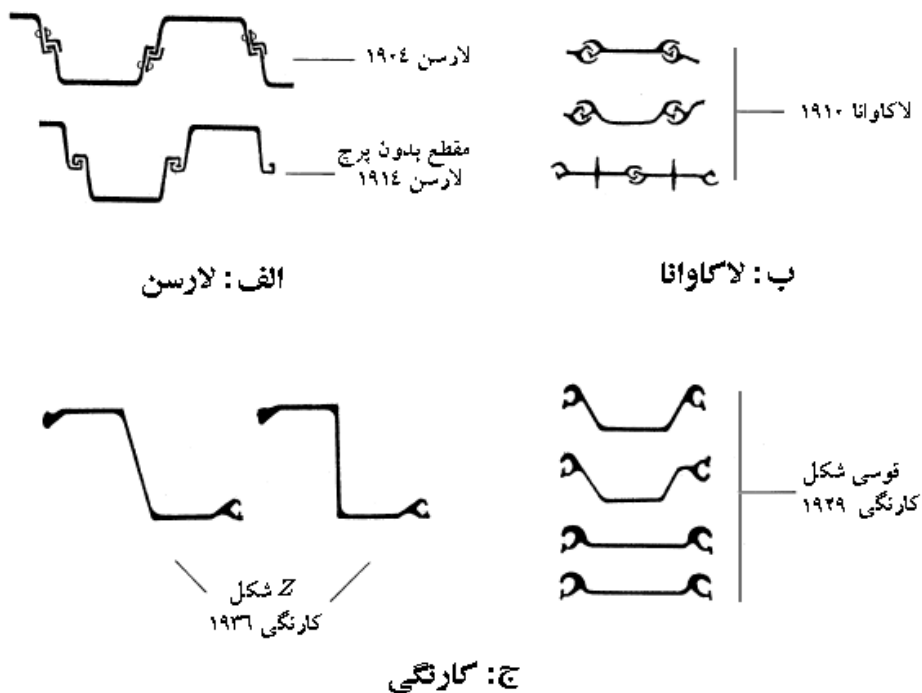
های س

1- Bessemer

دیوارهای س - سپر بر نبشی سبیل - یب - بست - س - در سن - س - س و بست سی بیون پرچ - رس -

آلمان به عرصه ظهور رسیدند (شکل ۱-۲-الف) [۱].

پس از آن در سال ۱۹۱۰ و در ایالات متحده، شرکت فولاد لاکاوانا ۴ سپرهایی با شکل مسطح و انواع مختلف قوسی با قفل و بست های نورد شده کامل ساخت (شکل ۱-۲-ب). شرکت فولاد کارنگی ۵ (مؤسسه فولادی U.S.) سه مقطع مسطح با قفل و بست های نورد شده ارائه نمود. در سال ۱۹۲۹ کاتالوگ کارنگی چهار مقطع قوسی عمیق، دو مقطع قوسی کم عمق و دو مقطع صاف را در برداشت (شکل ۱-۲-ج) [۱].



شکل ۱-۱- مقاطع قدیمی سپر [۱]

۲-۱

3- Trygve Larssen

4- Lackawanna

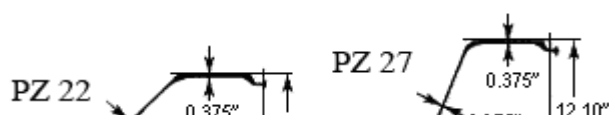
سپر المان های بیرونی، شکل گرفته بودند. از آنجا که فلز اضافی به شکل مناسبی در خارج از محور خنثای دیوار واقع می شد، به دلیل ایجاد مدول مقطع اضافی به بهترین شکل مورد استفاده قرار می گرفت. قفل و بست های لارسن در محور خنثای دیوار قرار می گرفتند. سپر های Z شکل به طرز شگفت آوری به سرعت و از سال ۱۹۱۱ در اروپا تولید شدند. نیمرخ های رنسام ۶ بسیار شبیه بعضی از مقاطع z شکل سبک امروزی بود. سپر های Z

شکل عمیق تر لامپی که در حدود سال ۱۹۱۳ معرفی شد، شبیه به سپرهای Z شکل مدرن توپ و سوکت بود [۱].

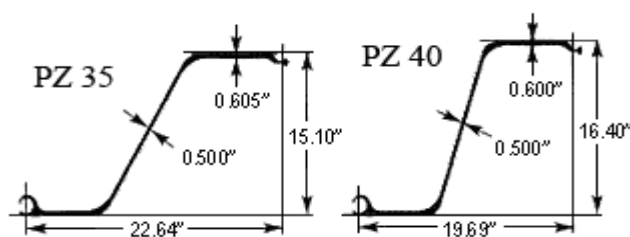
در اروپا پس از آنکه مقاطع U شکل لارسن توسعه یافتند، مقاطع Z شکل محبوبیت خود را از دست دادند. دو مقطع Z شکل در دهه ۱۹۳۰ در امریکا عرضه شد و نسبتاً محبوبیت یافت. PZ-32 و PZ-38 از تمام مقاطع قوسی شکل موجود در آن زمان، پهن تر و عمیق تر بودند. بحث های دامنه دار مربوط به خصوصیات واقعی مقاومت خمشی مقاطع U و قوسی شکل در امریکا باعث شد تا جنبشی دوباره در سپرهای Z شکل به وجود آید [۱].

سپرهای Z شکل در انتهای دیوار، قفل و بست می شد و یک جان صلب متصل به دو بال ایجاد می کرد. مقاطع PZ-27 که در دهه ۱۹۴۰ عرضه شد، دارای مدول مقطع $30/2$ اینچ مکعب بر فوت بود که تقریباً سه برابر مدول مقطع مقاطع قوسی با وزن معادل در هر فوت مکعب دیوار بود. در نتیجه تبدیل به محبوب ترین مقطع در تاریخ مقاطع سپرها گردید. مقاطع Z شکل امروزه با مدول های مقطع گسترده در بازه $8/6$ تا 85 اینچ مکعب بر فوت دیوار تولید می شوند [۱].

در شکل (۴-۱)، مقاطع Z شکل و در جدول (۲-۱)، مشخصات اصلی آنها آمده است.



6- Ransome



شکل ۲-۱ - مقاطع Z شکل [۴]

جدول ۱-۱- مشخصات اصلی مقاطع Z شکل [۴]

| | | در هر مقطع | | | | | | | | در هر متر دیوار | | | |
|----------|------|----------------|-------|-------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------|--------------------|--------------------|
| نوع مقطع | عرض | عمق | ضخامت | ضخامت | مساحت | وزن | ممان | مدول | مساحت | مساحت | وزن | ممان | مدول |
| | اسمی | دیوار (ارتفاع) | جان | بال | | هر متر | اینرسی | مقطع | نهایی سطح | | هر متر | اینرسی | مقطع |
| | cm | cm | mm | mm | cm ² | kg/m | cm ⁴ | cm ³ | m ² /m | cm ² /m | kg/m | cm ⁴ /m | cm ³ /m |
| PZ 22 | 56 | 23 | 10 | 10 | 79 | 61.76 | 6493 | 552 | 1.51 | 140.8 | 33.6 | 11621.2 | 989.2 |
| PZ 27 | 46 | 31 | 10 | 10 | 79 | 61.76 | 11696 | 760 | 1.51 | 172.1 | 41.2 | 25577.5 | 1666.7 |
| PZ 35 | 58 | 38 | 13 | 15 | 125 | 98.22 | 29011 | 1513 | 1.78 | 217.6 | 52.1 | 50444.8 | 2629.0 |
| PZ 40 | 50 | 42 | 13 | 15 | 124 | 97.63 | 34331 | 1649 | 1.78 | 248.7 | 59.5 | 68648.1 | 3295.7 |

۱-۲-۱-۳- مقاطع با جان صاف (مستقیم)

مقاطع نیمرخ های مسطح در ابتدا فقط به دلیل محدودیت های کارخانه ای تولید می شدند. رقابت و نیاز مشتریان انگیزه ای برای بسط سپرهای کارآمد سازه ای به وجود آورد. این نیمرخ های مسطح، دارای مقاومت کششی ای بودند که برای استفاده در ساخت سازه های سپری مدور بسیار مناسب بود. [۱]

صفحات مسطح مقاومت کمی در برابر خمش دارند اما قفل و بست های آنها در برابر تنش های « قلاب » بسیار مقاوم است. بیشترین کاربرد این مقاطع در سازه های مدور و بزرگ است. این مقاطع باید قابلیت چرخش بین صفحات را طوری فراهم کنند که تشکیل یک دایره را بدهد. بیشتر تولید کنندگان برای طول های استاندارد سپر، حداقل چرخشی بین ۸ تا ۱۰ درجه بین صفحات مجاور را تضمین می کنند. [۱]

سپرهای مسطح تنها به شکل گرم نورد شده موجودند زیرا در فرایند پرداخت سرد، مقاومت کششی کافی برای قفل و بست فراهم نمی شود. به دلیل نیاز به ساخت سلول ۷ های بزرگتر برای کافردم های عمیق تر،

مقاومت های قفل و بست به تدریج افزایش پیدا کرده اند. در شکل ۱-۵، مقاطع با جان صاف و در جدول (۱)-۲، مشخصات اصلی آنها آمده است. [۱]

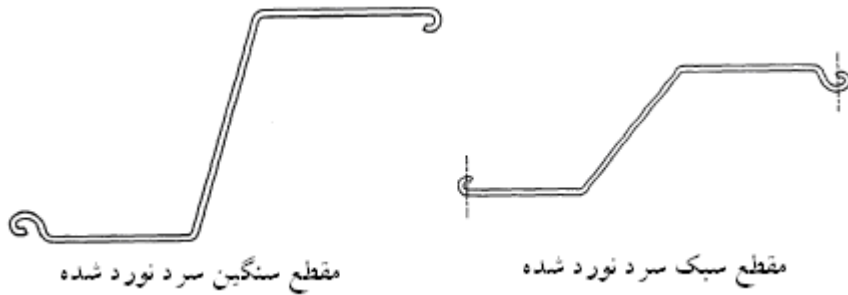


شکل ۱-۳- مقاطع با جان صاف [۴]

جدول ۱-۲- خصوصیات اصلی مقاطع با جان صاف [۴]

| | | در هر مقطع | | | | | در هر متر دیوار | | |
|-------------|------|------------|-------------------|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| نوع مقطع | عرض | ضخامت | وزن | ممان | مدول | مساحت | وزن | ممان | مدول |
| | اسمی | جان | هر متر | اینرسی | مقطع | اندود شده | هر متر | اینرسی | مقطع |
| | cm | mm | kg/m ² | cm ⁴ /m | cm ³ | m ² /m | kg/m | cm ⁴ /m | cm ³ /m |
| PS 27.5 | 50 | 10 | 67.27 | 682.8 | 52 | 1.12 | 40.93 | 409.7 | 102.2 |
| PS 31.0 | 50 | 13 | 75.75 | 682.8 | 52 | 1.12 | 46.13 | 409.7 | 102.2 |

از اوایل دهه ۱۹۷۰ یک روش دیگر تولید سپرهای فولادی، باعث ایجاد تنوع بیشتر در مقاطع شد. در این روش جدید از صفحات گرم نورد شده لوله ای شکلی استفاده می شد که از طریق مجموعه ای از پایه های نورد سرد تغذیه می شدند. این پایه ها وظیفه تولید مقاطع قوسی و Z شکلی را داشتند که با یک قفل و بست قلاب دار ساده تکمیل می شد. این محصول نیاز به هزینه سرمایه گذاری کمتری نسبت به محصول نورد گرم دارد و نظر تعدادی از تولید کنندگان جدید را به خود جلب کرده است [۱].



شکل ۱-۴- مقاطع تیپ سپرهای سرد نورد شده [۱]

این سپرها دارای مقاطع کم عمقی هستند. در این مقاطع برای رسیدن به ضخامت ثابت کمتر از ۰/۲۵ اینچ از روش شکل دهی سرد استفاده شده و تولید آنها مطابق با *ASTM A 857* بوده است. مقاومت تسلیم بستگی به ضخامت ورق دارد و بین ۲۵ تا ۳۶ کیلو پوند بر اینچ مربع (*ksi*) است. این مقاطع در مقایسه با مقاطع سنگین و ضخیم Z شکل، مدول های مقطع کمتر و ممان اینرسی بسیار کمتری دارند [۱].

۱-۲-۵- مقاطع با مدول بالا

در برخی موارد محدود استفاده از سپرهایی لازم است که خصوصیات مقاومتی آنها از محصولات استاندارد موجود بیشتر باشد. این مقاطع ممکن است برای خاکبرداری های عمیق، خاک های ضعیف، لایروبی های عمیق و دیگر شرایط خاص مورد نیاز باشند [۱].

۱-۲-۲- خصوصیات مقاطع فولادی

۱-۲-۲-۱- خصوصیات اصلی

در مقاطع سپر معمولی، سه خصوصیت مهم وجود دارد که مزیت های ویژه ای به آنها می بخشد:

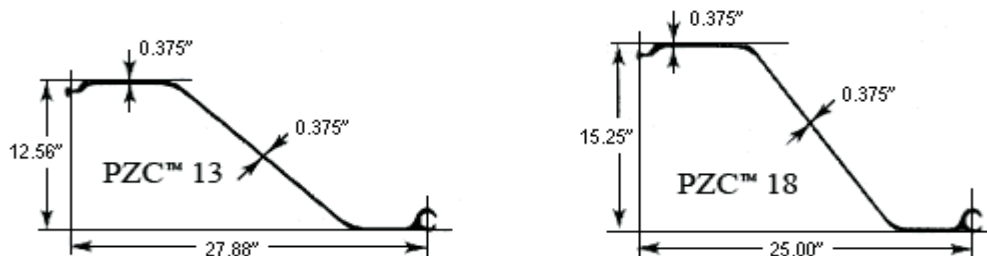
الف- قفل و بست کمک می کند تا سپر ها به هم متصل شده و تشکیل یک دیوار پیوسته را دهند. قفل و بست، بسیار قوی است و احتمال کمی وجود دارد که یک سپر از جای خود به بیرون بلغزد. در نتیجه ظاهر نهایی دیوار سپری، رضایت بخش خواهد بود. قفل و بست در تمام کاربردها، کاملاً خاک نگهدار و همچنین به قدر کافی آب نگهدار است. در مواردی که از مقاطع معمولی سپر استفاده می شود، انحراف زاویه ای بسیار کمی بین هر سپر با سپر کناری امکان پذیر است. میزان این انحراف بسته به روش تولید سپرها متغیر است [۲].

ب- شکل مقطع عرضی سپر طوری طراحی شده که دیوار سپری را قادر سازد تا مانند مجموعه ای از تیرهای متصل به هم در برابر خمش مقاومت کنند. بخش های طولی در جلو و پشت دیوار (بال ها) معادل بال های تیرهای فولادی / شکل گرم نورد شده است و بخش اصلی مقاومت خمشی دیوار را فراهم می کند در حالی که بخش های عرضی یا جان ها که بال های رو به رو را به هم متصل می سازند، مشابه جان تیرهای / شکل گرم نورد شده، برش را تحمل می کنند. اگر به مقاومت های خمشی بالاتری نیاز باشد باید از سپرهایی با عمق کلی بزرگ تر و ضخامت بال بیشتر استفاده به عمل آید. با این حال صرف نظر از مقاومت خمشی، مقطع باید قابلیت کوبش در خاک تا عمق مورد نظر را داشته باشد که شکل مقطع عرضی، سختی کافی را برای این منظور فراهم می نماید [۲].

ج- مصالحی که سپر از آن ساخته شده (فولاد) آن را قادر می سازد تا در برابر ضربه های سنگین چکش در حین کوبیدن مقاومت کند. میزان مقاومت خاک که باید در حین سپر کوبی بر آن غلبه شود، تعیین کننده میزان فولاد در مقطع عرضی و کیفیت فولادی است که مقطع از آن ساخته می شود. علاوه بر آن فولاد قادر است با مساحت های کوچک مقطع عرضی، مقاومت خمشی بالایی به دست دهد که در نتیجه آن در هنگام کوبیدن سپرهای فولادی، لازم نیست خاک زیادی جابجا شود و متعاقباً می توان به اعماق نفوذ بیشتری در مقایسه با سپرهای بتنی و چوبی که دارای مقاطع عرضی بسیار بزرگتری هستند، دست یافت. به علاوه برای یک مقاومت خمشی معین، سپرهای فولادی سبک وزن تر از دیگر انواع هستند و از این نظر دو مزیت مهم را سبب می شوند: حمل و نقل سپرها و جابجا کردن آنها در محل برای کوبیدن، آسان تر و کم هزینه تر است و برای رسیدن به عمق نفوذ مورد نیاز احتیاج به چکش های سبک تری می باشد [۲].

۱-۲-۲-۲- کارآمدی مقطع

در طی سال های گذشته بهبود هایی در کار نورد صورت گرفته که تولید مقاطع کارآمدتر را میسر ساخته است. کارآمدی به صورت نسبت مدول مقطع در واحد طول دیوار، به هزینه سپر در واحد سطح دیوار تعریف می شود. عمدتاً با استفاده از مقاطع عریض تر همراه با برخی کاهش ها در ضخامت، کارآمدی بهبود می یابد [۵]. در شکل (۵-۱) مقاطع با کارآمدی بالا و در جدول (۳-۱) مشخصات اصلی آنها آمده است.



شکل ۵-۱- مقاطع Z شکل با کارآمدی بالا [۴]

جدول ۳-۱- مشخصات اصلی مقاطع Z شکل با کارآمدی بالا [۴]

| نوع مقطع | | در هر مقطع | | | | | | | | در هر متر دیوار | | | | |
|----------|----|------------|-------|-------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|------|
| | | عرض | عمق | ضخامت | ضخامت | مساحت | وزن | ممان | مدول | مساحت | مساحت | وزن | ممان | مدول |
| | | اسمی | دیوار | جان | بال | | هر متر | اینرسی | مقطع | نهایی | | هر متر | اینرسی | مقطع |
| | cm | cm | mm | mm | cm ² | kg/m | cm ⁴ | cm ³ | m ² /m | cm ² /m | kg/m | cm ⁴ /m | cm ³ /m | |
| PZC™12 | 71 | 32 | 9 | 9 | 88 | 69.05 | 13594 | 852 | 1.86 | 124.3 | 29.8 | 19200.2 | 1204.3 | |
| PZC™13 | 71 | 32 | 10 | 10 | 96 | 75.00 | 14693 | 921 | 1.86 | 135.1 | 32.3 | 20756.9 | 1301.1 | |
| PZC™14 | 71 | 32 | 11 | 11 | 104 | 81.85 | 15929 | 991 | 1.86 | 147.1 | 35.3 | 22504.9 | 1397.8 | |
| PZC™17 | 64 | 39 | 9 | 9 | 88 | 69.05 | 20516 | 1057 | 1.86 | 138.7 | 33.2 | 32309.8 | 1666.7 | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|-------|-------|------|------|-------|------|---------|--------|
| PZC™18 | 64 | 39 | 10 | 10 | 96 | 75.00 | 22152 | 1144 | 1.86 | 150.7 | 36.0 | 34890.8 | 1801.1 |
|--------|----|----|----|----|----|-------|-------|------|------|-------|------|---------|--------|

۱-۲-۳- قفل و بست

استاندارد صنعتی ای برای قفل و بست سپرهای فولادی وجود ندارد. تمام تولید کننده ها اهداف مشابهی

برای قفل و بست دارند:

۱- بین سپرهای منفرد، اتصال دائمی ایجاد کند تا تشکیل یک دیوار پیوسته نسبتاً آب بند یا خاک نگهدار

دهد.

۲- اجازه دهد برای ایجاد پیوند بهتر در حین نصب، میزان مناسبی لغزش وجود داشته باشد

۳- الزامات مقاومتی را برآورده سازد [۶]

قفل و بست ها به شکل های متنوعی ساخته می شوند. انواع مختلف قفل و بست در زیر نشان داده شده

است:



شکل ۱-۶- انواع قفل و بست (اتصال) در سپرها [۷]

اطلاعات بیشتر درباره قفل و بست ها در ضمیمه ۱ موجود می باشد.

۱-۲-۳- کاربرد سپرهای فولادی در سازه ها

شکل (۷-۱) کاربردهای مختلف سپرهای فلزی را نشان می دهد. در این شکل نه تنها بازه ای از کاربردهای سپرها دیده می شود بلکه این کاربرد ها مطابق با الگوی گیرداری دیوارها طبقه بندی شده و رابطه انواع سازه ها با یکدیگر نیز نشان داده شده است [۸].

شکل ۷-۱- کاربردهای سپرهای فولادی

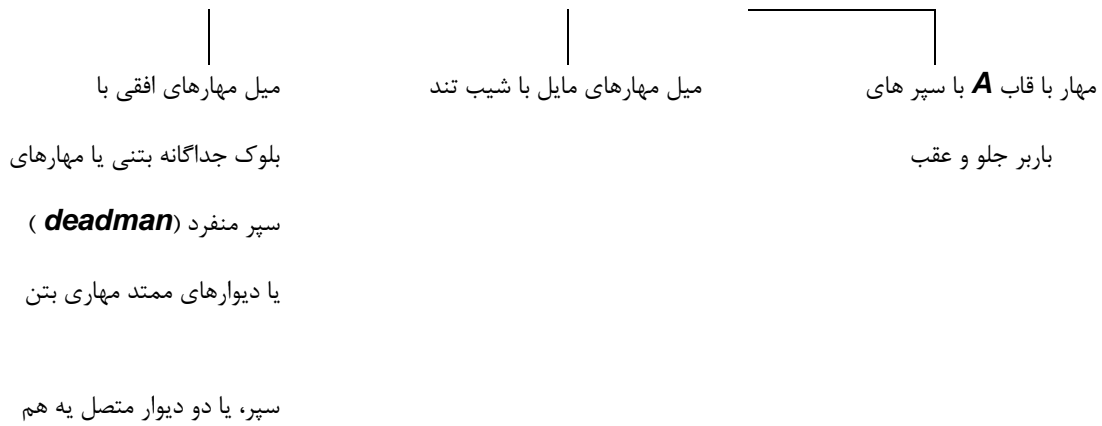
۱-۳-۲-۱- احداث دیوارهای حائل با سپرکوبی

دیوارهای حائل احداث شده با سپرکوبی به دو دسته اصلی سپرهای طره ای و سپرهای مهار شده تقسیم می شوند. احداث دیوارهای حائل با سپرکوبی به دو طریق انجام می شود. در روش اول سپرها در سمت آب کوبیده شده و پشت آن خاکریز می شود و در روش دوم، سپرها در سمت خاک کوبیده شده و جلوی آن لایروبی می شود. در هر حال خاک مورد استفاده برای خاکریز پشت دیوار، معمولاً دانه ای است. خاکی که ریشه سپر در آن کوبیده شده، ممکن است ماسه ای و یا رسی باشد [۹].

تراز زمین در جلوی دیوار (سمت آب) به تراز یا خط لایروبی معروف است. با توجه به مطالب ارائه شده، دو روش برای احداث دیوارهای سپرکوبی وجود دارد:

۱- دیوار خاکریزی شده

۲- دیوار لایروبی شده



مراحل اجرای دیوار خاکریزی شده به قرار زیر است (شکل ۱-۸):

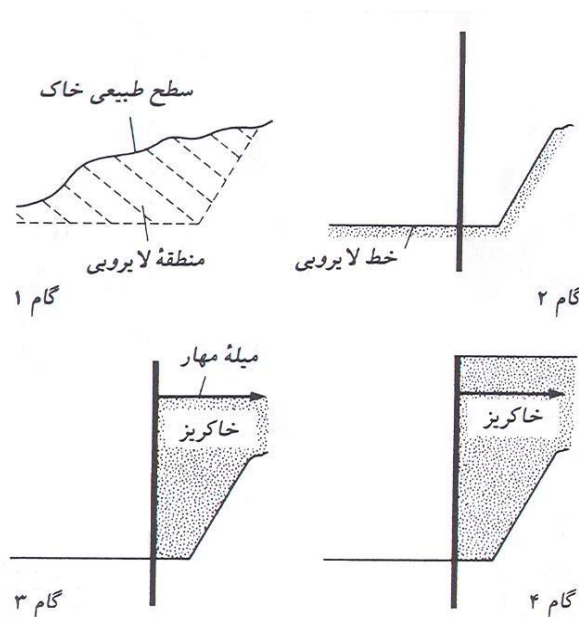
گام ۱- لایروبی خاک موجود در جلو و پشت دیوار پیشنهادی

گام ۲- کوبیدن سپرها

گام ۳- خاکریزی تا تراز مهار دیوار و نصب سیستم مهار

گام ۴- تکمیل خاکریزی تا بالای دیوار

برای سپرهای طره ای فقط گام های ۱ و ۲ و ۴ مورد استفاده قرار می گیرند [۳].



شکل ۱-۸- مراحل اجرای دیوار خاکریزی شده [۳]

مراحل اجرای دیوارهای لایروبی شده به قرار زیر است (شکل ۹-۱):

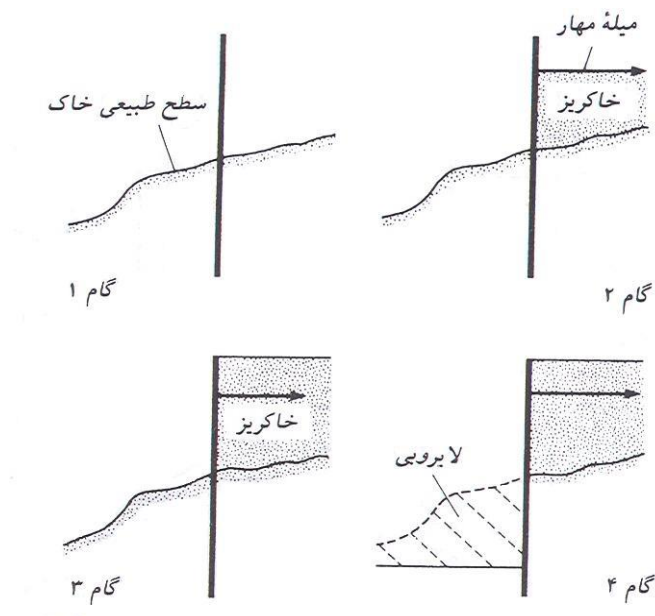
گام ۱- کوبیدن سپرها

گام ۲- خاکریزی تا تراز مهار و نصب سیستم مهار

گام ۳- خاکریزی تا بالای دیوار

گام ۴- لایروبی جلوی دیوار

برای دیوار طره ای گام ۲ لازم نیست. [۳]

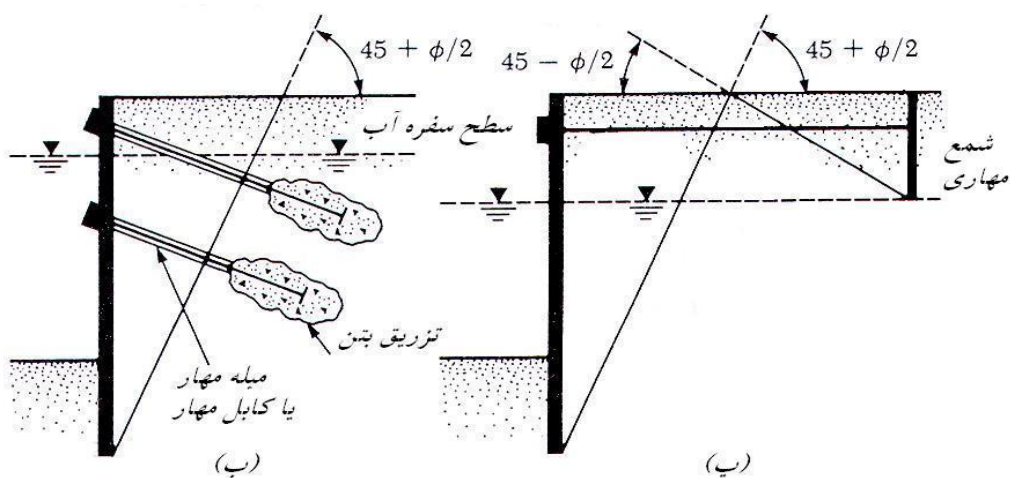
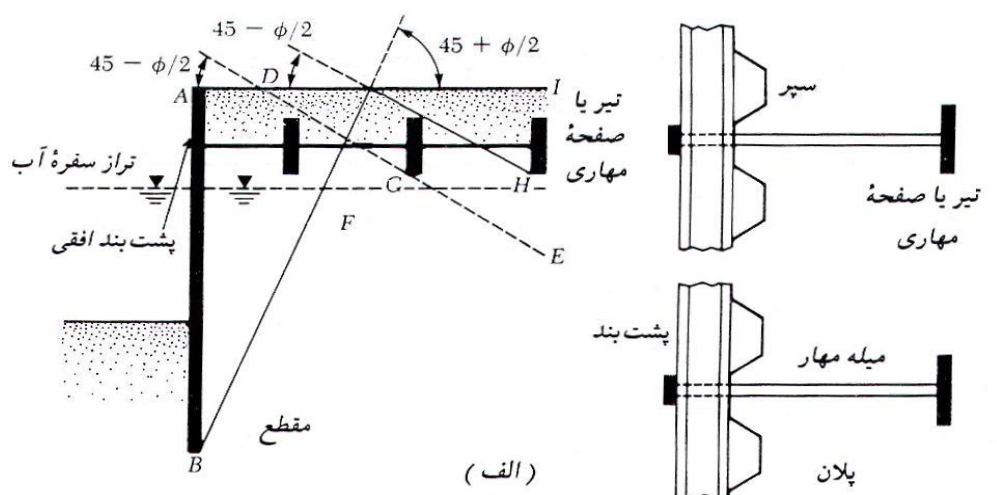


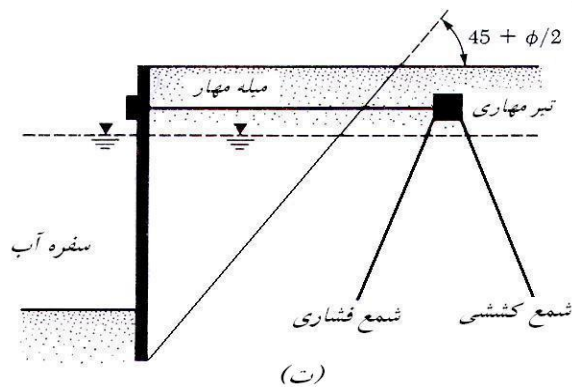
شکل ۹-۱- مراحل اجرای دیوار لایروبی شده [۳]

۱-۲-۳-۲-مهـار

وقتی که ارتفاع سپر (از تراز لایروبی) از ۶ متر تجاوز کند، اقتصادی تر است که سپر در نزدیکی بالای آن مهار شود. مهار سپر باعث کاهش عمق نفوذ و کاهش لنگر خمشی سپر می گردد، لیکن در طرح و اجرای مهار باید دقت شود. انواع مهارهای مختلفی که در سپرهای مهار شده مورد استفاده قرار می گیرند، به شرح زیر می باشند:

- ۱- تیرها و صفحات مهار
- ۲- میل مهار با انتهای تزریق (کور) شده (شکل ۱۰-۱-الف)
- ۳- شمع های مهار قائم (شکل ۱۰-۱-پ)
- ۴- تیرهای مهار با شمع های مایل (شکل ۱۰-۱-ت) [۳]





شکل ۱-۱۰- انواع مختلف مهار سپرها. (الف) تیر یا صفحه مهار، (ب) مهار با انتهای تزریق شده، (پ) شمع مهار قائم، (ت) تیر مهار با شمع‌های مایل [۳]

برای صفحات یا تیرهای مهار معمولاً از قطعات پیش ساخته بتنی استفاده می شود. مهارها توسط میل مهار به سپر وصل می شوند. برای اتصال میل مهارها به سپر، یک پشت بند افقی در جلو و یا پشت سپر قرار داده می شود تا تکیه گاه مناسبی صلبی برای سپر تأمین گردد. برای محافظت میل مهار در مقابل خوردگی، معمولاً روی آن توسط رنگ یا اپوکسی اندود می شود. در مهار با انتهای تزریق شده ابتدا یک سوراخ در زمین حفر شده و در داخل آن میله یا کابل مهار قرار داده شده و انتهای آن تزریق می شود (کابل ها از نوع فولاد پر مقاومت که در کارهای پیش تنیده از آنها استفاده می شود، می باشند) [۳].

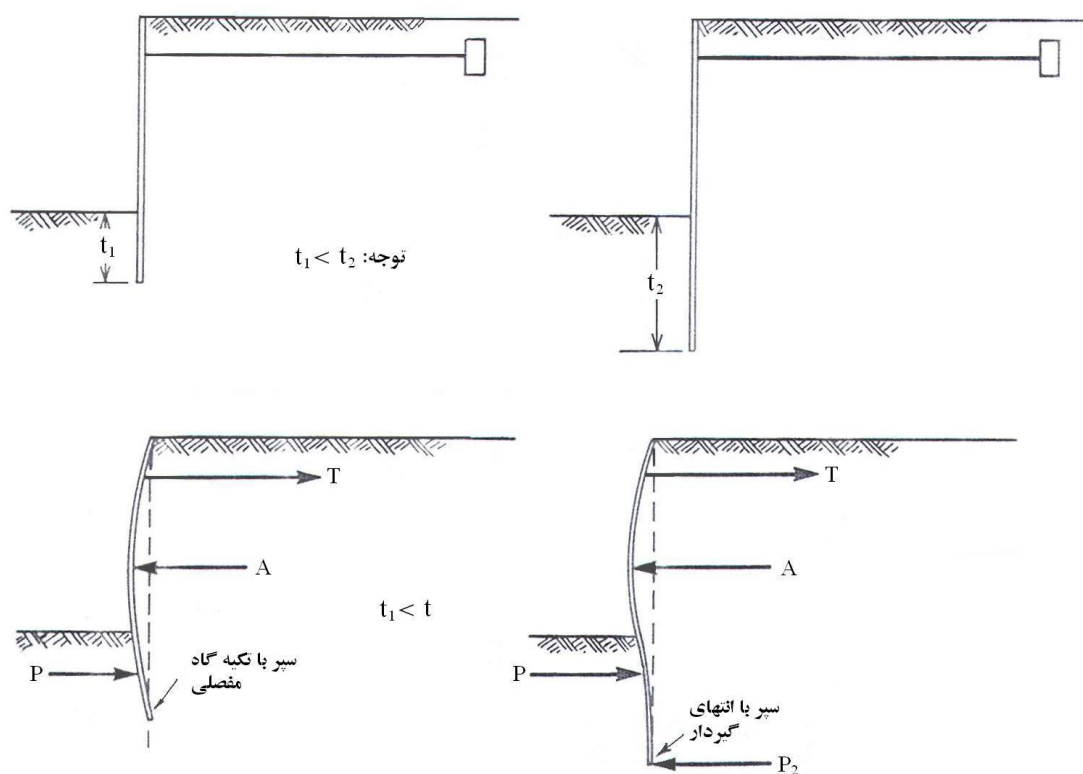
فصل دوم: تحلیل سپرهای فولادی به روش دستی

۲-۱- اصول طراحی دیوارهای سپری

همان طور که در بخش (۱-۲-۷) از فصل اول (احداث دیوارهای حائل با سپرکوبی) گفته شد دیوارهای حائل احداث شده با سپر به دو دسته اصلی سپرهای طره ای و سپرهای مهار شده تقسیم می شوند. سپرهای طره ای تنها برای ارتفاعات متوسط، حدود ۶ متر یا کمتر از خط لایروبی قابل توصیه هستند. وقتی که ارتفاع سپر (از تراز خط لایروبی) از حدود ۶ متر تجاوز نماید، بهتر آن است که سپر در نزدیکی بالای آن مهار شود. مهار

سپر، باعث کاهش عمق نفوذ و کاهش لنگر خمشی سپر می گردد. این مزایا باعث اقتصادی تر شدن طرح می گردند. به همین دلیل در این فصل تنها به تحلیل سپرهای مهار شده پرداخته می شود [۳].

فرض های طراحی دیوارهای سپری بر اساس نوع دیوار صورت می گیرند. دیوارهای سپری مهار شده بسته به میزان نسبی نفوذ سپر در زیر خط لایروبی نهایی به دو دسته بزرگ تقسیم می شوند: سپرهای با تکیه گاه آزاد در زمین و سپرهای با تکیه گاه گیردار در زمین (شکل ۱-۲). در دیوار نوع اول که نفوذ کمتری نسبت به نوع دوم دارد فرض می شود که شمع مانند یک تیر عمودی با دو تکیه گاه عمل می کند. این دو تکیه گاه یکی سیستم مهاری و دیگری خاک زیر خط لایروبی است. در دیوار با تکیه گاه گیردار، سپر نفوذ بیشتری زیر خط لایروبی دارد و در نتیجه فرض می شود که سپر در پایین در امتداد خود ثابت است. بنابراین دیوار به شکل مؤثری معادل یک تیر افقی حائل تثبیت شده در انتهای پایینی عمل می کند [۵].

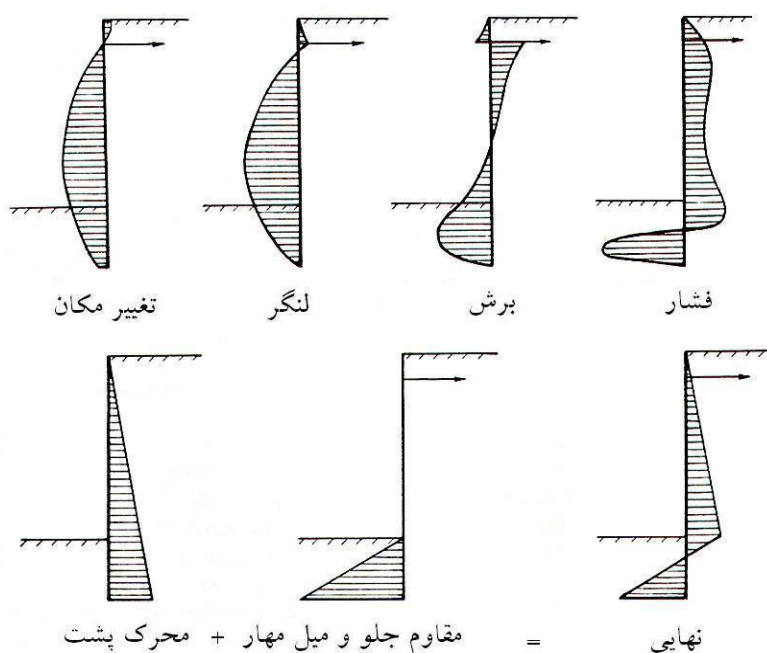


شکل ۱-۲- مقایسه بین تکیه گاه های با پای گیردار و آزاد در زمین [۵]

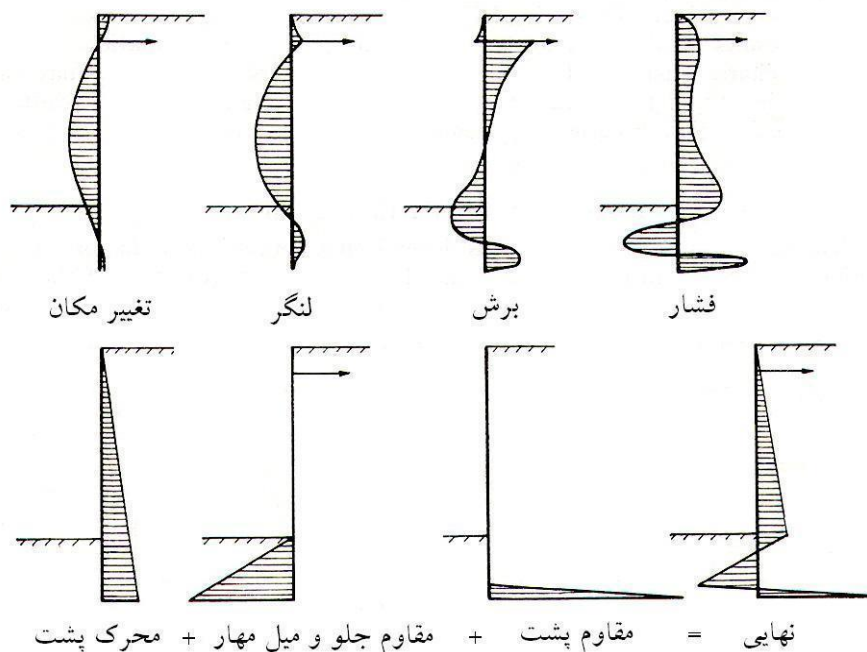
۱-۱-۲- فشار خاک، لنگر خمشی و خیز

نمودارهای معمول فشار خاک، لنگر خمشی و خیز برای شرایط تکیه گاه گیردار در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.

در صورت لزوم می توان اثر اصطکاک را نیز در نظر گرفت. محاسبه مقادیر فشارهای محرک و مقاوم بر مبنای تئوری های مختلف انجام می گردد. تحقیقات و مشاهدات رفتار سازه های حائل نشان داده است که این تئوری ها تصویر نادرستی از رفتار فشار خاک به دست می دهد مگر آنکه با شرایط دیگر سختی دیوار، گیرداری پای دیوار و حالت فیزیکی خاک اصلاح شوند [۵].



(الف) پای آزاد



(ب) پای گیردار

شکل ۲-۲- نمودارهای معمول فشار خاک، برش، لنگر خمشی، و تغییر مکان.

الف- پای آزاد، ب- پای گیردار [۲]

۲-۱-۲- الگوهای شکست در دیوارهای سپری مهار شده

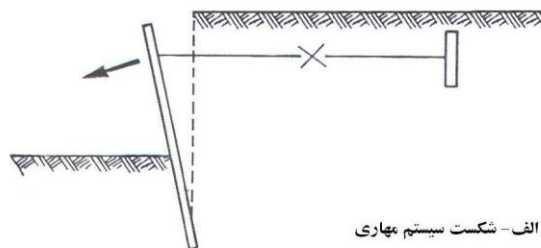
در زیر خلاصه ای از انواع مهم شکست که احتمال وقوع در سپر را دارد، آمده است:

الف- شکست سیستم مهاری: شکست دیوار ممکن است به دلیل ناکافی بودن بولت های متصل کننده تیرها (ی پشت بند میل مهار) به شمع بندی، تیرها، میلگردهای مهاری و انتهای ثابت شده آنها، یا خود مهار ها روی دهد. ممکن است شکست هنگامی روی دهد که اجزای سیستم مهاری به تنهایی کافی هستند اما مهار بسیار به دیوار سپر نزدیک است و میل مهار طول کافی را ندارد. احتمال دیگر، شکست مهار به دلیل سر بارهای اضافی (*Surcharge*) در پشت مهار است (شکل ۲-۳- الف) [۲].

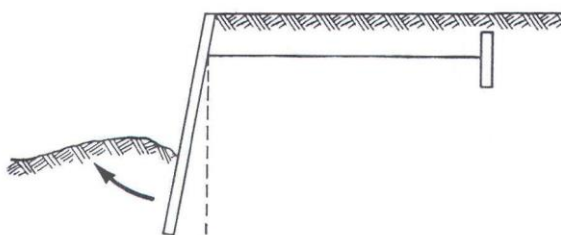
ب- حرکت پنجه های شمع ها به سمت خارج در زیر خط لایروبی: شکست در این نوع ممکن است به دلیل ناکافی بودن نفوذ شمع رخ دهد و یا جریان آب باعث شود که مقداری از خاک سطحی شسته و لایروبی گردد و به این ترتیب عمق نفوذ کاهش یابد (شکل ۲-۳- ب) [۲].

پ- شکست سپر در خمش: این نوع از شکست ممکن است هنگامی رخ دهد که سطح مقطع سپر ناکافی باشد، فشار خاک به درستی تعیین نشده باشد، مصالح پرکننده نامناسبی به کار رفته باشد و یا سربار (*Surcharge*) بزرگ ناخواسته ای در پشت دیوار اعمال گردد و یا اینکه خط لایروبی به طور ناخواسته از طریق شسته شدن خاک یا بیش لایروبی کردن، پایین بیاید (شکل ۲-۳-۲ پ) [۲].

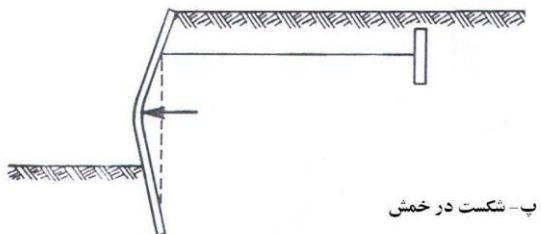
ت- نشست خاکریز: نشست بیش از حد خاکریز پشت سپر را می توان نوعی شکست تلقی نمود. چنین شکستی ممکن است باعث پایین کشیده شدن میل مهار شده و تنش های اضافی در آن ایجاد نماید. نشست خاکریز ممکن است به علت متراکم شدن خاکریز باشد (شکل ۲-۳-۲ ت) [۲].



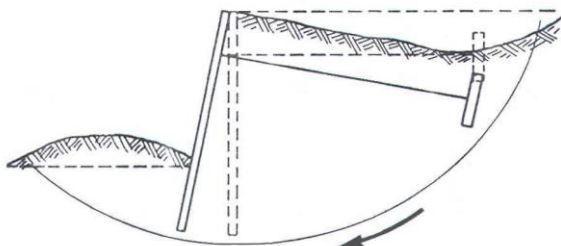
الف- شکست سیستم بهاری



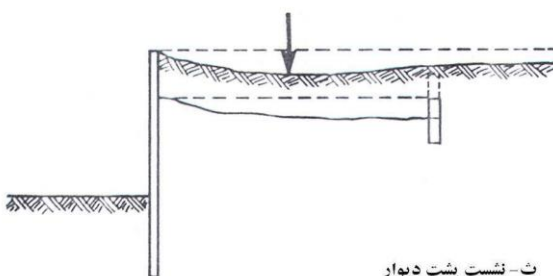
ب- حرکت پایین سیر به سمت بیرون



پ- شکست در خمش



ت- لغزش دایره ای رس نرم



ث- نشست پشت دیوار

شکل ۲-۳- روش های شکست دیوارهای سیر مهار شده

ث- نشست خاک پشت دیوار: نشست خاک پشت دیوار (به علت بیش بارگذاری) می تواند باعث شکست سیستم مهاریه گردد (شکل ۲-۳-ث) [۲].

جالب توجه است که بیشتر شکست ها به دلیل شکست های دسته الف و ب؛ یعنی شکست سیستم مهاریه و یا ناکافی بودن نفوذ در زیر خط لایروبی اسمیه روی می دهند. موارد اندکی وجود دارد که شکست تنها ناشی از شکست سپر در خمش باشد [۲].

۲-۱-۳- فشارهای خاک و آب

الف- خاک های غیر چسبنده

۱- فشار مقاوم: در خاک های غیر چسبنده که دیوار افقی است و سطح خاک پشت دیوار قائم است، مؤلفه افقی فشار مقاوم خاک p_p در عمق h برابر است با:

$$p_p = K_p \gamma \cdot h \quad (۱-۲)$$

۲- فشار محرک: در خاک های غیر چسبنده که دیوار افقی است و سطح خاک پشت دیوار قائم است، بر اساس رابطه رانکین، مؤلفه افقی فشار محرک خاک p_a در عمق h برابر است با:

$$p_a = K_a \gamma \cdot h, \quad K = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (۲-۲)$$

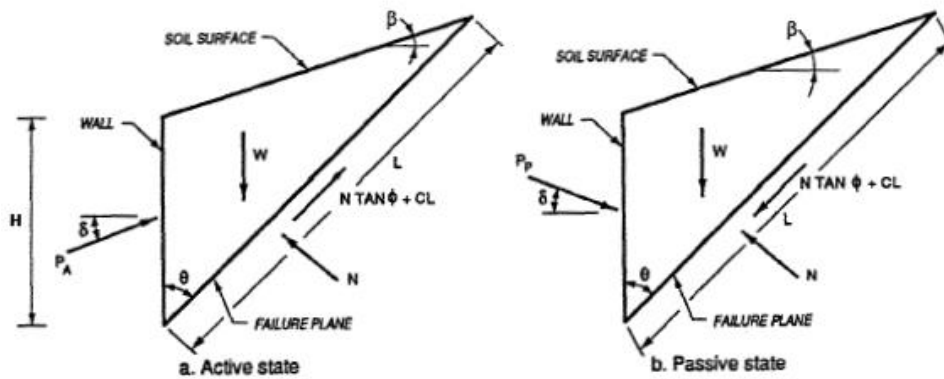
و یا برابند فشار برابر است با:

$$P = \frac{wH^2}{2} \cdot \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right) \quad (۳-۲)$$

که در آن w وزن گوه خاک و H ارتفاع گوه است (شکل ۲-۴) [۵].

بر طبق رابطه کولمب

$$P = \frac{wH^2}{2} \cdot \text{tg}^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$



شکل ۲-۴- گوه خاک برای تئوری فشار خاک کولمب [۵]

در حضور آب، فشار آب کامل $\gamma_w \cdot h$ بر روی سپر عمل می کند. در نتیجه فشار خاک در این ناحیه بر مبنای حالت غوطه ور محاسبه می شود [۵].

$$p_a = K_a \gamma' \cdot h \quad (۴-۲)$$

ب- خاک های چسبنده: در خاک های چسبنده فشار نهایی به صورت زیر به دست می آید: [۵]

۱- فشار مقاوم

$$p_p = \gamma \cdot h - 2c \quad (۵-۲)$$

۲- فشار محرک

$$\text{اگر } \gamma = \gamma_w + \gamma' \rightarrow p_a = \gamma_w \cdot h + (\gamma' h - 2c) \quad (۶-۲)$$

$$\rightarrow P = \frac{wH^2}{2} \cdot \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right) - 2c \sqrt{\left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right)} \quad (۷-۲)$$

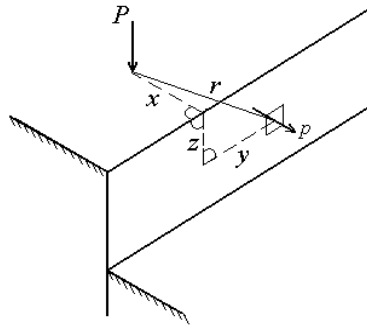
در طراحی دیوارهای سپری، چسبندگی باید یک خصوصیت بسیار متغیر در نظر گرفته شود مگر آنکه از خاک در برابر تغییرات فصلی میزان آب و زهکشی کامل - که ندرتاً به طور همزمان اتفاق می افتند- حفاظت گردد [۵].

۲-۱-۴ - بارگذاری اعمالی بر روی خاک پشت دیوار

حالات متفاوتی برای بارگذاری روی خاک پشت دیوار وجود دارد. در حالت سه بعدی و با در نظر گرفتن یک بار نقطه ای مطابق شکل (۲-۵)، تنش ایجاد شده از رابطه تجربی اسپنگلر (برای مقادیر معمول فشار واحد P در پشت دیوار و در نقطه ای با مختصات x و y و z) به صورت زیر به دست می آید:

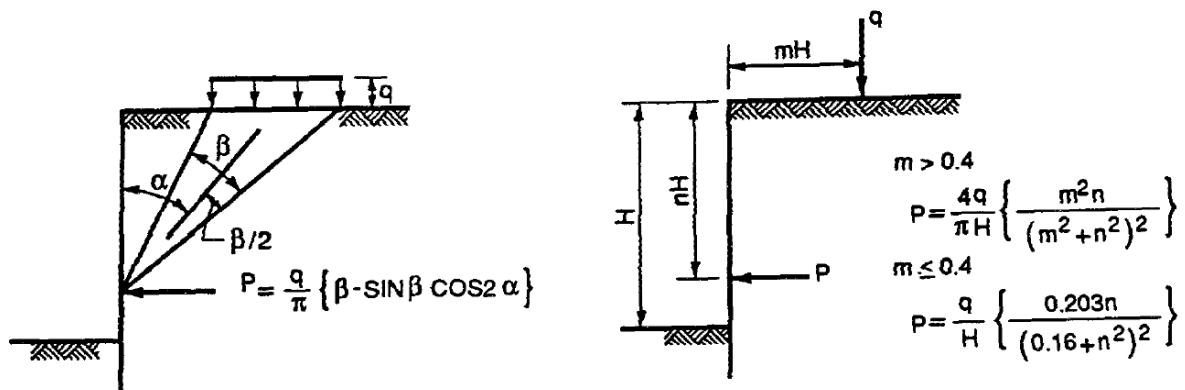
$$p = \frac{KP}{x^{0.25}} \cdot \frac{x^2 z}{R^5} \quad (۸-۲)$$

که در آن P بار وارد شده و K یک ثابت تجربی است که مقدار آن $1/1$ برای میانگین نتایج و $1/3$ برای حداکثر تنش ها به دست آمده است [۵].



شکل ۲-۵- مختصات بوزینسک [۵]

در حالات دو بعدی نیز می توان به شکل زیر مقادیر تنش ها را به کار برد (شکل ۲-۶):



شکل ۲-۶- مقادیر تنش ناشی از سربار در پشت دیوار در حالت دو بعدی [۵]

۲-۱-۵- خاک مستغرق

اگر w_e وزن هر فوت مکعب از خاک خشک باشد، آنگاه وقتی که خاک، مستغرق شود، فشار جانبی، مجموع فشار افقی محرک خالص و فشار هیدرواستاتیکی wh است که در آن h عمق اندازه گیری شده از بالای آب می باشد. در مورد اول، وزن واحد خاک به دلیل خاصیت شناوری کاهش می یابد و فشار محرک با استفاده از زاویه

اصطکاک داخلی در آب که ممکن است ۵ تا ۱۰ درجه کمتر از حالت خاک خشک در نظر گرفته شود به دست می آید به شرط آنکه حرکت آب در هر جهت ممکن باشد. بنابراین با استفاده از تئوری رانکین و با فرض آب تازه و اینکه ϕ' زاویه اصطکاک داخلی در آب باشد، آنگاه در عمق h زیر سطح معمول آب و خاک داریم:

$$p = 62.5h + \left[w_e - \left(\frac{100 - v}{100} \right) 62.5 \right] \left(\frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \right) h \quad (9-2)$$

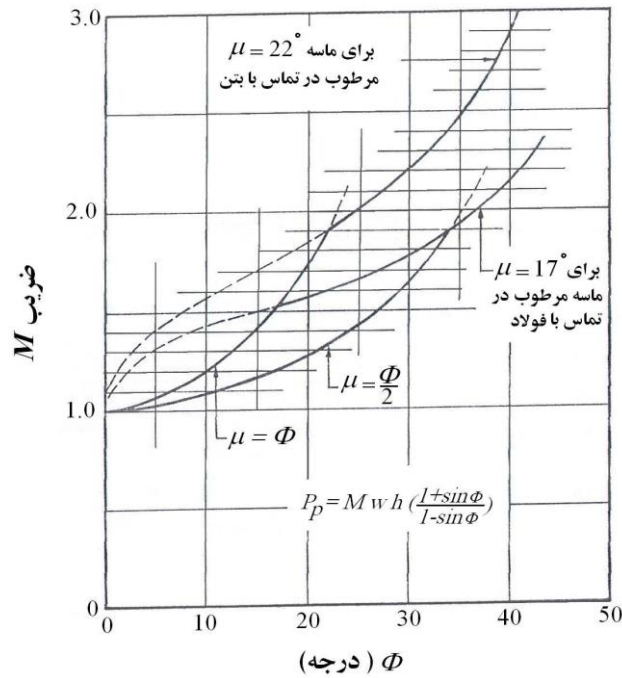
که در آن v درصد تخلخل در خاک و w_e وزن هر فوت مکعب از خاک خشک است [۵].

۲-۱-۶ - اصطکاک دیوار سپر

اصطکاک بین خاک و دیوار سپر کاهش عمده ای در برابند فشار محرک پشت دیوار نمی دهد و باید از آن صرفنظر شود. این اصطکاک می تواند فشار مقاوم خاک را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. ضریب اصطکاکی که تحت نامطلوب ترین شرایط یعنی هنگام خیس بودن خاک به دست می آید؛ یک عامل تعیین کننده است [۵].
عموماً و بدون تخطی از تئوری رانکین، می توان با ضرب کردن مقدار فشار مقاوم در $1/5$ برای خاک هایی که در آنها ϕ بیش از ۲۰ درجه است، اصطکاک را در محاسبات منظور کرد:

$$p_p = 1.5 wh \cdot \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \quad (10-2)$$

شکل (۷-۲) تخمین دقیق تری از فشار مقاوم به دست می دهد [۵].



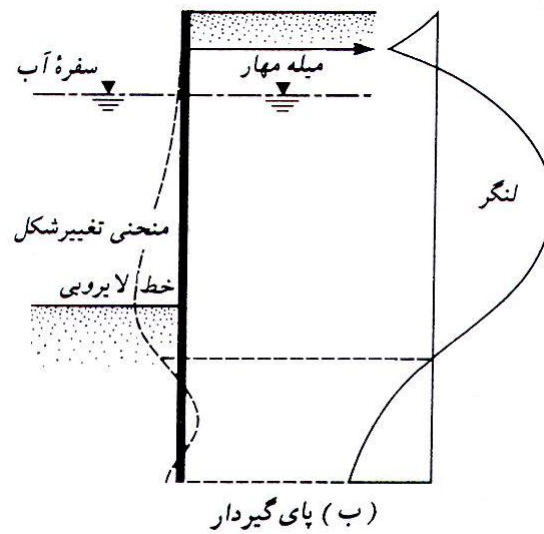
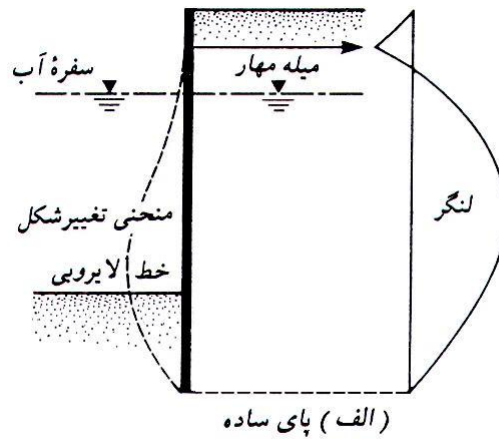
شکل ۲-۷- تأثیر اصطکاک در افزایش فشار مقاوم خاک [۵]

۲-۲- طراحی سپرها

۱-۲-۲- سپرهای مهار شده

وقتی که ارتفاع سپر (از تراز خط لایروبی) از حدود ۶ متر تجاوز نماید، اقتصادی تر است که سپر در نزدیکی بالای آن مهار شود. این حالت سپر مهار شده نامیده می شود. مهار سپر، باعث کاهش عمق نفوذ و کاهش لنگر خمشی سپر می گردد، لیکن در طرح و اجرای مهار باید دقیق بود [۳].

دو روش اصلی برای طرح و اجرای سپرهای مهار شده وجود دارد: (الف) پای مفصلی (ب) پای گیردار. در شکل (۲-۸) منحنی تغییر شکل و نمودار لنگر خمشی برای هر یک از دو حالت فوق ارائه شده است. طول نفوذ سپر در حالت اول حداقل است و سیستم سازه ای آن معین می باشد [۳].



شکل ۲-۸- نمودار تغییر شکل و لنگر خمشی برای سپرهای مهار شده

(الف) پای ساده (ب) پای گیردار

۲-۲-۲- سپرهای مهار شده با پای مفصلی در زمین ماسه ای

شکل (۲-۹) یک سپر مهار شده را نشان می دهد که در خاک ماسه ای کوبیده شده است. میل مهار در عمق

l_1 از بالای سپر، سپر را به یک نقطه مناسب (مثلاً یک شمع کوبیده شده در زمین) مهار کرده است.

فشار محرک و مقاوم رانکین در عمق z برابرند با:

$$p_a = [\gamma L_1 + \gamma' L_2 + \gamma'(z - L_1 - L_2)] K_a \quad (11-2)$$

$$p_p = \gamma'(z - L_1 - L_2) K_p \quad (12-2)$$

با ترکیب روابط بالا فشار جانبی خاک به صورت زیر به دست می آید:

که در آن K_a و K_p به ترتیب ضرایب محرک و مقاوم خاک هستند.

$$\begin{aligned} p &= p_a - p_p = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a - \gamma'(z - L_1 - L_2)(K_p - K_a) \\ &= p_2 - \gamma'(z - L)(K_p - K_a) \end{aligned} \quad (13-2)$$

$$L = L_1 + L_2 \quad \text{که در آن:}$$

حال عمق L_3 که به ازای آن فشار خالص مساوی صفر می شود، به دست می آید:

$$p_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a, \quad \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (14-2)$$

$$p_2 - \gamma'(z - L)(K_p - K_a) = 0 \quad (15-2)$$

$$(z - L) = L_3 = \frac{p_2}{\gamma'(K_p - K_a)} \rightarrow L_3 = \frac{p_2}{\gamma(K_p - K_a)} \quad (16-2)$$

در عمق $z = (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)$ فشار خالص را می توان از رابطه زیر تعیین نمود:

$$p_8 = \gamma'(K_p - K_a) L_4 \quad (17-2)$$

توجه شود که شیب خط DEF مساوی ۱ قائم به $\gamma'(K_p - K_a)$ افقی می باشد. برای تعادل سپر، مجموع نیروهای افقی و مجموع لنگرها در حول نقطه O' مساوی صفر قرار داده می شود (O' در تراز میله مهار قرار دارد).

با جمع زدن نیروها در امتداد افقی (برای واحد طول دیوار) خواهیم داشت:

$$F=0 \text{ - مساحت سطح } EBF \text{ - مساحت سطح } ACDE$$

که در آن F کشش میله مهار برای واحد طول دیوار می باشد:

رابطه فوق را می توان با آزمون و خطا برای محاسبه L_4 حل کرد. با تعیین این مقدار، عمق نفوذ تئوریک به صورت زیر به دست می آید:

$$D_{theoretical} = L_3 + L_4 \quad (\text{تئوریک})$$

عمق نفوذ واقعی ۳۰ تا ۴۰ درصد بزرگتر از عمق تئوریک در نظر گرفته می شود:

$$D \text{ (واقعی)} = 1.3 \text{ تا } 1.4D \text{ (تئوریک)} \quad (20-2)$$

در روش گام به گام بخش ۶-۳ اشاره شد که به جای اعمال ضریب اطمینان در آخر مسئله به عمق نفوذ، می توان در ابتدای کار، ضریب اطمینان را به ضریب فشار مقاوم K_p اعمال کرد.

$$K_{p(\text{طرح})} = K_p / FS$$

اگر این کار انجام شود، دیگر لازم نیست ضریب اطمینان دیگری به عمق نفوذ در انتهای کار اعمال گردد. روش اعمال ضریب اطمینان به K_p نتایج محافظه کارانه تری به دست می دهد.

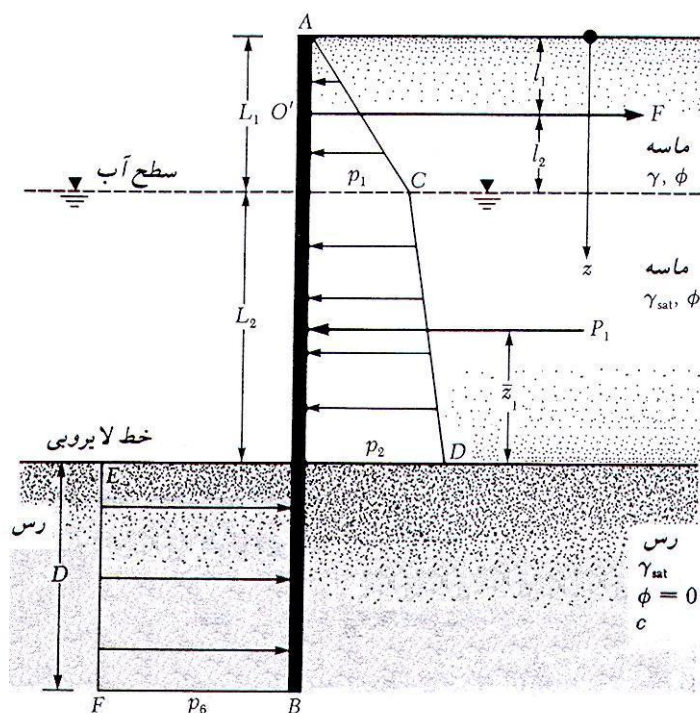
حداکثر لنگر خمشی سپر، در حد فاصل $z=L_1$ تا $z=L_1+L_2$ قرار خواهد داشت. عمق z که در آن برش صفر و لنگر خمشی حداکثر می شود، از حل رابطه زیر تعیین می شود:

$$1/2 p_1 L_1 - F + p_1(z - L_1) + 1/2 K_a \gamma' (z - L_1)^2 = 0 \quad (21-2)$$

با تعیین عمق z ، مقدار حداکثر لنگر خمشی را می توان به آسانی تعیین نمود [۳].

۳-۲-۲ سپرهای مهار شده با پای مفصلی در زمین رسی

شکل (۲-۱۰) یک سپر مهار شده را نشان می دهد که در یک لایه رسی کوبیده شده و دارای خاکریز دانه ای می باشد. توزیع فشار خالص در زیر خط لایروبی (از $z=L_1+L_2$ تا $z=L_1+L_2+D$) را می توان به صورت زیر نشان داد:



شکل ۲-۱۰- سپر مهار شده با پای مفصلی که در لایه رسی کوبیده شده است [۳]

برای $p_6 = 4c - (\gamma L_1 + \gamma' L_2)$

تعدادل

استاتیکی، مجموع نیروها در امتداد افق باید مساوی صفر باشد. داریم:

$$P_1 - p_6 D = F \quad (2-22)$$

که در آن:

P_1 = مساحت سطح ACD در نمودار توزیع فشار

F = نیروی مهار برای واحد طول دیوار

با نوشتن لنگر در حول نقطه O' به دست می آید:

$$P_1 (L_1 + L_2 - l_1 - \bar{z}_1) - p_6 D \left(l_2 + L_2 + \frac{D}{2} \right) = 0$$

با ساده سازی رابطه فوق نتیجه می شود:

$$p_6 D^2 + 2p_6 D (L_1 + L_2 - l_1) - 2P_1(L_1 + L_2 - l_1 - \bar{z}_1) = 0 \quad (2-23)$$

با استفاده از رابطه فوق می توان عمق نفوذ تئوریک D را تعیین کرد.

همانند بخش (2-2-2)، حداکثر لنگر در این حالت در عمقی در حد فاصل $L_1 < z < L_1 + L_2$ رخ می دهد.

عمق نقطه برش صفر با حداکثر لنگر را می توان از رابطه (2-21) تعیین کرد [3].

2-2-4 کاهش لنگر برای سپرهای مهار شده

سپرهای انعطاف پذیر هستند به علت این انعطاف پذیری، دارای تغییر مکان جانبی می باشند. این تغییر مکان جانبی باعث باز توزیع فشار جانبی می شود که نتیجه آن کاهش لنگر خمشی حداکثر M_{max} نسبت به نتایج محاسباتی ارائه شده در قسمتهای قبل می باشد. راو ۱ (۱۹۵۲ و ۱۹۵۷) روشی برای کاهش لنگر حداکثر طرح در سپرهای مهار شده با پای مفصلی ارائه نمود. در این قسمت اصول کاهش لنگر راو مورد بررسی قرار می گیرد [3].

2-2-4-1 سپرهای کوبیده شده در ماسه

در شکل (2-11) که برای سپرهای کوبیده شده در ماسه معتبر است، از علائم زیر استفاده شده است:

$$1- H' = \text{ارتفاع کل سپر (یعنی مجموع } L_1 + L_2 + D_{actual} \text{)}$$

$$2- \text{انعطاف پذیری نسبی سپر } (\rho)$$

$$\rho = 10.91 \times 10^{-7} \left(\frac{H'^4}{EI} \right) \quad (24-2)$$

که در آن H' بر حسب متر می باشد.

E = ضریب الاستیسیته مصالح سپر (MN/m^2)

I = ممان اینرسی، واحد طول، سپر

1- Rowe

$$-4 \quad M_{max} = \text{لنگر تئوریک حداکثر}$$

روش استفاده از نمودار کاهش لنگر (شکل ۲-۱۱) به شرح زیر می باشد:

گام ۱- یک نیمرخ برای سپر مورد طراحی انتخاب نمایید.

گام ۲- اساس مقطع نیمرخ انتخابی در گام ۱ را برای واحد طول سپر تعیین نمایید.

گام ۳- ممان اینرسی نیمرخ انتخابی در گام ۱ را برای واحد طول سپر تعیین نمایید.

گام ۴- مقدار H' را به دست آورده ρ را از رابطه (۲۴-۲) محاسبه نمایید.

گام ۵- $\log \rho$ را تعیین کنید.

گام ۶- از رابطه $M_d = \sigma_{all} \cdot S$ ، ظرفیت خمشی نیمرخ انتخابی در گام ۱ را تعیین نمایید.

گام ۷- نسبت M_d/M_{max} را محاسبه نمایید.

گام ۸- نقاط $\log \rho$ (گام ۵) و M_d/M_{max} را روی شکل (۲-۱۱) ببرید.

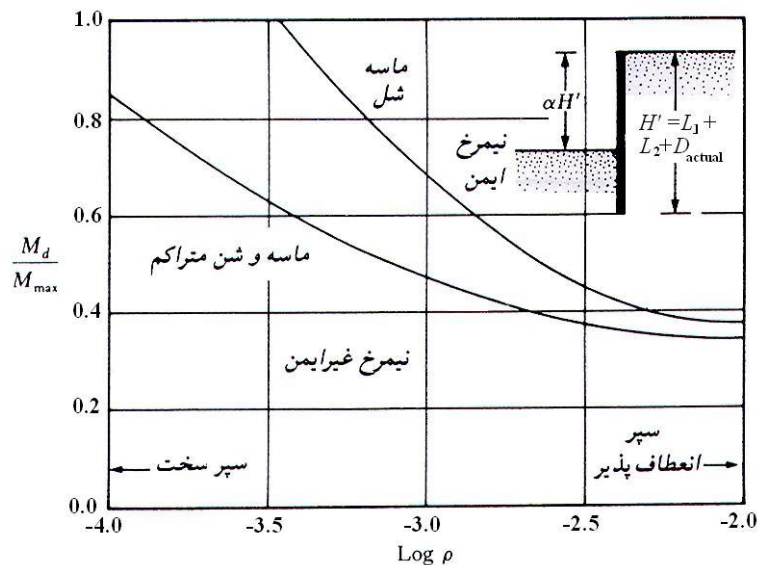
گام ۹- گام ها ۱ تا ۸ را برای نیمرخ های مختلف تکرار نمایید. نقاطی که در بالای منحنی قرار می

گیرند (بر حسب مورد، منحنی ماسه شل، یا منحنی ماسه متراکم و شن)، مربوط به نیمرخ های

ایمن هستند. نقاطی که در زیر منحنی قرار می گیرند، نیمرخ های غیر ایمن می باشند. از میان

نیمرخ هایی که نقاط مربوطه آن در بالای منحنی قرار دارد، می توان سبک ترین نیمرخ را انتخاب

نمود. توجه شود که نیمرخ انتخابی دارای $M_d < M_{max}$ خواهد بود [۳].



شکل ۲-۱۱- نمودار $\log \rho$ در مقابل M_d / M_{max} برای سپرهای کوبیده شده در ماسه [۳]

۲-۲-۴-۲- سپرهای کوبیده شده در رس

برای سپرهای کوبیده شده در رس، علائم به کار رفته در شکل (۲-۱۲) به قرار زیر می باشند:

۱- عدد پایداری

$$S_n = 1.25 \frac{c}{(\gamma L_1 + \gamma' L_2)} \quad (2-25)$$

که در آن c چسبندگی زهکشی نشده می باشد. (شرایط $\phi = 0$)

۲- ضریب α

$$\alpha = \frac{L_1 + L_2}{L_1 + L_2 + D_{actual}} \quad (2-26)$$

۳- عدد انعطاف پذیری ρ

۴- لنگرهای حداکثر و طرح (به ترتیب M_d و M_{max})

روش کاهش لنگر با استفاده از شکل (۲-۱۲) به قرار زیر می باشد:

گام ۱- تعیین H'

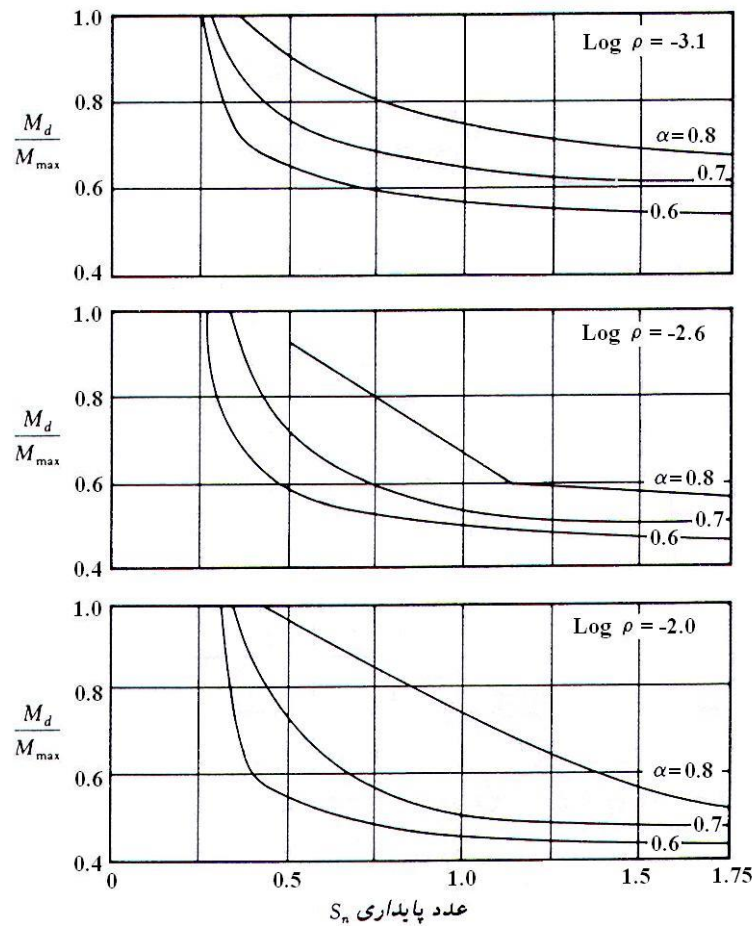
گام ۲- تعیین $\alpha = (L_1 + L_2) / H'$

گام ۳- تعیین S_n

گام ۴- برای یک مقدار مشخص α و S_n (گام های ۲ و ۳)، مقدار M_d/M_{max} را برای مقادیر مختلف

$\log \rho$ از شکل (۲-۱۲) تعیین نمایید و نمودار M_d/M_{max} را در مقابل $\log \rho$ رسم کنید.

گام ۵- گام های ۱ تا ۹ ارائه شده برای سپرهای کوبیده شده در ماسه را دنبال نمایید [۳].



شکل ۲-۱۲- نمودار در مقابل M_d/M_{max} عدد پایداری برای سپرهای کوبیده شده در رس [۳]

۲-۲-۵- روش نمودار فشار محاسباتی برای سپرهای کوبیده شده

در خاک ماسه ای

روش نمودار فشار محاسباتی (روش CPD) برای سپرهای مهار شده کوبیده شده در خاک های ماسه ای یک روش ساده و جایگزین برای روش پای مفصلی می باشد که در بخش های (۲-۲-۲) و (۴-۲-۲) شرح داده شد (ناتاراج و هادلی ۲ ۱۹۸۴). در این روش نمودار فشار خالص نشان داده شده در شکل (۲-۱۰) با یک نمودار فشار مستطیلی مطابق شکل (۲-۱۲) جایگزین می شود [۳].

توجه شود که \bar{p}_a عرض نمودار فشار محرک خالص در بالای خط لایروبی و \bar{p}_p عرض نمودار فشار مقاوم خالص در زیر خط لایروبی است. مقادیر \bar{p}_a و \bar{p}_p را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\bar{p}_a = CK_a \gamma_{av} L \quad (27-2)$$

$$\bar{p}_p = RCK_a \gamma_{av} L = R\bar{p}_a \quad (28-2)$$

$$(L=L_1+L_2) \quad \text{که در آن:}$$

γ_{av} = وزن مخصوص مؤثر متوسط ماسه که برابر است با:

$$\cong \frac{\gamma L_1 + \gamma' L_2}{L_1 + L_2} \quad (29-2)$$

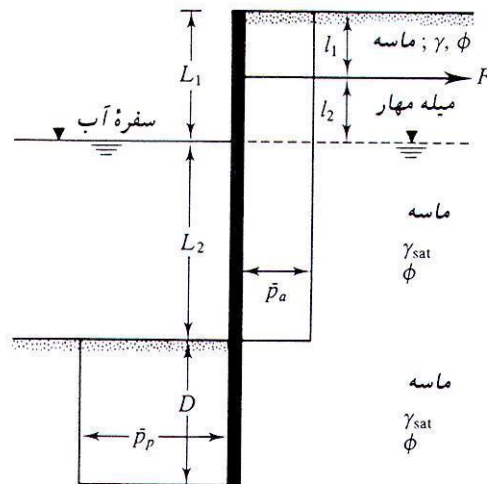
C = ضریب

$$\text{ضریب} = R = \frac{L(L-2l_1)}{D(2L+D-2l_1)} \quad (30-2)$$

دامنه تغییرات C و R در جدول (۶-۲) ارائه شده اند [۳].

| نوع خاک | C^a | R |
|-------------|-----------|-----------|
| ماسه شل | 0.8-0.85 | 0.3-0.5 |
| ماسه متوسط | 0.7-0.75 | 0.55-0.65 |
| ماسه متراکم | 0.55-0.65 | 0.6-0.75 |

a- برای حالاتی معتبر است که هیچ گونه سربار در روی خاکریز وجود ندارد.



شکل ۲-۱۳- روش نمودار فشار محاسباتی (توجه: $L=l_1+l_2$) [۳]

عمق نفوذ D و نیروی مهاری برای واحد طول دیوار و حداکثر لنگر M_{max} را می توان از روابط زیر تعیین نمود:

$$D^2 + 2DL \left[1 - \left(\frac{l_1}{L} \right) \right] - \left(\frac{L^2}{R} \right) \left[1 - 2 \left(\frac{l_1}{L} \right) \right] = 0 \quad (۳۱-۲) \text{ عمق نفوذ}$$

$$F = \bar{p}_a (L - RD) \quad (۳۲-۲) \text{ نیروی مهاری}$$

$$M_{\max} = 0.5 \bar{p}_a L^2 \left[\left(1 - \frac{R}{D}\right)^2 - \left(\frac{2l_1}{L}\right) \left(1 - \frac{RD}{L}\right) \right] \quad (2-33) \text{ حداکثر لنگر}$$

لازم به تذکر است که:

۱- مقدار D به دست آمده از رابطه (۲-۳۱) در حدود $1/25$ تا $1/5$ برابر مقدار D تئوریک به دست آمده در روش پای مفصلی می باشد که در بخش ۲-۲-۳ مورد بحث قرار گرفت. در نتیجه

$$D \approx D_{\text{actual}}$$

که در آن D و D_{actual} به ترتیب مقادیر به دست آمده از روابط (۲-۳۱) و (۲-۲۰) می باشند.

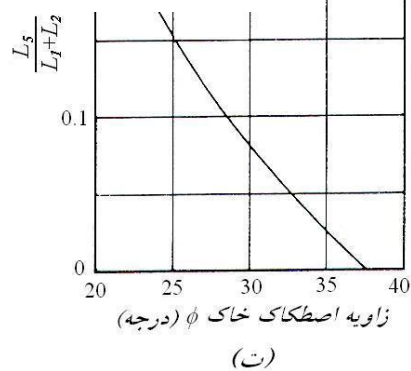
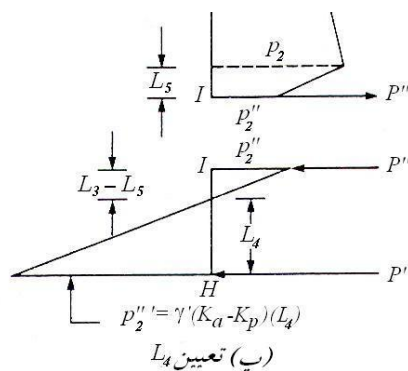
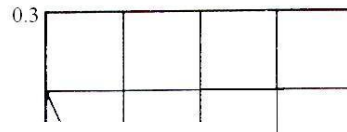
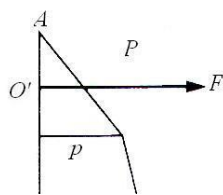
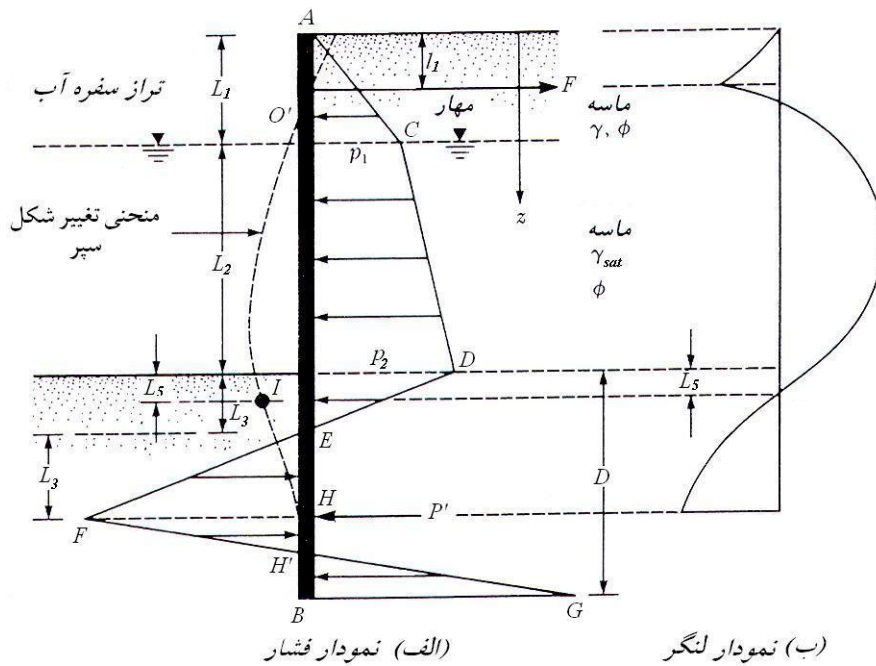
۲- مقدار F به دست آمده از رابطه (۲-۳۲) در حدود $1/2$ تا $1/6$ برابر مقدار به دست آمده از رابطه (۲-۱۸) است. بنابراین اعمال ضریب اطمینان اضافی لزومی ندارد.

۳- مقدار M_{\max} به دست آمده از اعمال رابطه (۲-۳۳) در حدود $0/6$ تا $0/75$ مقدار M_{\max} به دست آمده از روش معمول پای مفصلی است بنابراین بدون استفاده از روش کاهش راو، این مقدار می تواند به عنوان لنگر کاهش یافته تلقی شود [۳].

۲-۲-۶- سپر مهار شده با پای گیردار در زمین ماسه ای

در طراحی سپرها به روش پای گیردار، فرض می شود که پای ستون در مقابل دوران، گیردار است (شکل ۲-۱۴ الف). در این شکل، نمودار توزیع فشار خالص جانبی نیز نشان داده شده است. در تحلیل پای گیردار، قسمت پایینی نمودار توزیع فشار، یعنی $HFH'GB$ ، با نیروی متحرک P' جایگزین می شود. برای محاسبه L_4 ، معمولاً یک حل ساده که روش تیر معادل نامیده می شود، مورد استفاده قرار می گیرد. برای درک روش تیر معادل، نقطه I که نقطه عطف منحنی تغییر شکل سپر است، مورد توجه قرار می گیرد. در این نقطه می توان فرض کرد که سپر لولا شده و لنگر خمشی مساوی صفر است (شکل ۲-۱۴ ب). فاصله قائم بین نقطه I و خط لایروبی مساوی L_5 در نظر گرفته می شود. بلوم^۳ (۱۹۳۱) یک راه حل ریاضی برای تعیین L_5 و $L_1 + L_2$ ارائه داد. در شکل ۲-۱۴ ت تغییرات $L_5/(L_1 + L_2)$ در مقابل زاویه اصطکاک ϕ رسم شده است.

حال با دانستن ϕ و $L_1 + L_2$ ، مقدار L_5 را می توان به دست آورد. قسمتی از سپر که در بالای نقطه I قرار داشته (شکل ۲-۱۴-پ) و تحت فشار جانبی خالص می باشد، با نیروی مهار F و برش p'' متعادل می شود. نیروی برشی p'' را می توان با لنگرگیری حول نقطه O' (نقطه مهار سپر) تعیین نمود. بعد از تعیین p'' ، طول L_4 را می توان با لنگرگیری حول نقطه H به دست آورد (به قسمت پایین نمودار ۲-۱۴-پ مراجعه شود). عمق نفوذ D نیز چیزی در حدود 1.2 تا $1.4 (L_3 + L_4)$ در نظر گرفته می شود [۳].



شکل ۲-۱۴- روش پای گیردار برای سپر کوبیده شده در ماسه [۳]

فصل سوم: روابط، تئوری ها و فرضیات حاکم بر روش اجزای محدود در تحلیل مسائل ژئوتکنیک

۳-۱- مقدمه

استفاده از روش اجزای محدود در مهندسی ژئوتکنیک به سال ۱۹۶۶ و زمانی بر می گردد که کلاف و وودوارد^۱ از آن برای تعیین تنش ها و تغییر مکان های خاکریزها بهره گرفتند و ریز و دیر^۲ کاربرد آن در تحلیل بازشوهای زیرزمینی در سنگ را تشریح نمودند. بسیاری از مطالعات تحقیقاتی و کاربردهای عملی در این زمینه

¹ *Clough and Woodward*

² *Reyes and Deer*

در خلال ۴۰ سال گذشته صورت گرفته است. در طی این مدت پیشرفت های چشمگیری در تئوری و عمل حاصل شده و هزینه های کامپیوتری به شدت کاهش یافته است [۱۰].

۳-۲- انواع مسائل

الف- توالی رخدادهای واقعی: تقریباً تحلیل تمام مسائل ژئوتکنیکی اجزای محدود به صورت گام به گام انجام می گیرد. این گام ها توالی رخدادهای واقعی را شبیه سازی می نمایند. به عنوان نمونه می توان به مراحل متوالی خاکبرداری یک ترانشه مهار شده یا مهار نشده اشاره نمود. انجام گام به گام تحلیل دارای دو مزیت مهم در مسائل ژئوتکنیک است:

۱- می توان هندسه را از یک گام به گام بعدی تغییر داد و به این صورت اجرای خاکبرداری یا خاکریزی را با حذف یا اضافه نمودن المان ها به شبکه شبیه سازی نمود.

۲- می توان خصوصیات خاک را از یک گام به گام بعدی تغییر داد و به این شکل تغییرات رفتار خاک را که ناشی از تغییر در تنش های داخل توده خاک است، شبیه سازی نمود [۱۱].

ب- انواع مسائل: روش اجزای محدود برای طیف وسیعی از مسائل مهندسی ژئوتکنیک و به منظور تعیین تنش ها، تغییر مکان ها و فشارهای حفره ای کاربرد دارد. برخی انواع مسائل که به روش اجزای محدود تحلیل می شوند به شرح زیرند:

- دیوارهای مهار شده برای پایدار سازی زمین لغزه^۳ ها
- پی ساختمان ها
- کافردم ها
- سدهای خاکی

³ Landslide

- سازه های دور از ساحل

- خاکریزهای مسلح

- شیروانی های مسلح

- دیوارهای حائل

- تونل ها

- خاکبرداری های مهار شده و مهار نشده

روشن است که روش اجزای محدود قابل کاربرد برای محاسبه تنش ها و تغییر مکان ها تحت تقزیه تماماً شرایط ژئوتکنیکی است. محدودیت های موجود در کاربرد این روش معمولاً ریشه در محدودیت های منابع تعریف مسئله دارد و ناشی از نارسایی ذاتی روش نیست [۱۱].

۳-۳ - اطلاعات لازم برای تحلیل اجزای محدود

الف- رفتار غیر خطی تنش - کرنش: تقریباً تمام تحلیل های اجزای محدود نمایانگر رفتار غیر خطی تنش - کرنش خاک است زیرا این مسئله در غالب موارد یک عامل تعیین کننده می باشد. برای مدل سازی رفتار غیر خطی باید تخمینی از موارد زیر موجود باشد:

- تنش های اولیه (پیش از ساخت)

- مقاومت و رفتار غیر خطی تنش - کرنش خاک

- شرایط بارگذاری در مراحل متوالی ساخت

ب- تنش در خاک: تخمین موارد فوق الذکر به این دلیل ضروری است که رفتار تنش - کرنش خاک بستگی به تنش های موجود در خاک دارد (با ثابت نگه داشتن بقیه موارد)، و هر چه تنش انحرافی^۴ خاک بیشتر باشد (در شرایطی که بقیه عوامل ثابت باشند) خاک از سختی کمتری برخوردار خواهد بود. علاوه بر آن از آنجا که خاک

⁴ Deviator

ماده ای غیر الاستیک است، کرنش ها و تغییر مکان های ایجاد شده به توالی تغییرات بارگذاری و میزان بارها وابسته خواهد بود. به رغم پیچیدگی های رفتار خاک، می توان داده های لازم برای تحلیل اجزای محدود خاک را از مطالعه دقیق تر آزمایش های مشابهی به دست آورد که به عنوان مثال برای تحلیل های متداول نشست یا پایداری لازم است.

ج- پارامترها: می توان پارامترهای لازم برای بیشتر مدل های تنش- کرنش خاک که در تحلیل های اجزای محدود به کار می روند را از نتایج آزمایش های متداول خاک نظیر آزمایش های سه محوری یا برش مستقیم یا تحکیم به دست آورد. همچنین می توان از نتایج آزمایش های صحرایی و داده های خاک های مشابه در شرایطی که نتایج آزمایش های دست نخورده در دسترس نیست، بهره گرفت [۱۱].

۳-۴- مدل های رفتار خاک

الف- الاستیسیته خطی: مؤلفه های سازه ای در تحلیل اندرکنش خاک- سازه در اکثر موارد با استفاده از الاستیسیته خطی مدل سازی می گردد با اینکه رفتار خاک بسیار پیچیده تر است.

ب- فشار محدود کننده: همانطور که پیش از این گفته شد، رفتار تنش- کرنش خاک، غیر خطی و غیر الاستیک است. در تمام موارد به استثنای خاک اشباع تحت شرایط زهکشی نشده، رفتار تنش- کرنش خاک بستگی به فشار محدود کننده دارد. این جنبه های رفتاری خاک در بیشتر پروژه های مهندسی ژئوتکنیک از جمله مسائل اندرکنش خاک- سازه به چشم می خورد.

ج- مدل های مصالح: بسیاری از مدل های مصالح مانند مدل هایپربولیک دانکن و چانگ^۵ (۱۹۷۰) و مدل کم- کلی (روسکو و بورلند^۶، ۱۹۶۸) این خصوصیات خاک را مد نظر قرار داده اند. مدل هایپربولیک از یک فرمول

⁵ Duncan and Chang

⁶ Roscoe and Burland

بندی الاستیک غیر خطی وابسته به فشار محدود کننده استفاده می نماید. مدل کم- کلی نیز از یک فرمول بندی پلاستیک بهره می برد که با افزایش فشار محدود کننده، مقادیر افزایش یافته مدول را به دست می دهد. یکی از مزایای کلیدی پلاستیسیته این است که می تواند کرنش های پلاستیک را که در جهتی غیر از جهت اعمال بار رخ می دهند، مدل سازی نماید. این ویژگی به خصوص هنگامی که توده خاک در آستانه شکست است، اهمیت دارد. در چنین مواردی، استفاده از نمو بار در یک جهت می تواند منجر به تغییر مکان های بزرگی در جهت دیگر گردد به شرط آنکه قبلاً بارهای بزرگی به این جهت دیگر اعمال شده باشد. در سازه هایی که به شکل اصولی طراحی شده اند و در آنها شکست توده بزرگی از خاک محتمل نیست، مدل سازی این جنبه شکست، اهمیت کمتری پیدا می کند [۱۱].

۳-۵ - مقادیر خصوصیات تنش - کرنش مصالح

الف - مقادیر خصوصیات مصالح: انتخاب مقادیر مناسب خصوصیات تنش - کرنش مصالح غالباً مهمترین گام در انجام تحلیل اندرکنش خاک - سازه می باشد. چهار روش برای تعیین مقادیر خصوصیات مصالح وجود دارد: نمونه گیری و آزمایش های آزمایشگاهی، آزمایش های صحرایی، درون یابی بین مقادیر شاخص خصوصیات و مطالعات کالیبراسیون.

ب - انتخاب روش: روشن است که انتخاب روشی برای تعیین مقادیر خصوصیات مصالح به نوع اطلاعات موجود بستگی دارد. روش های فوق وقتی بیشترین کارایی را خواهند داشت که در ترکیب با هم به کار روند.

۳-۶ - شبکه اجزای محدود

⁷ Mesh

الف- شبکه اجزای محدود: شبکه اجزای محدود باید منعکس کننده هندسه سازه، لایه بندی^۸ خاک زیر پی و شکل خاکبرداری یا خاکریزی باشد. به علاوه شبکه باید به گونه ای اصلاح شود که در آن تغییرات تنش ها و تغییر شکل ها از یک المان به المان بعدی، هموار و بدون پرش باشد.

ب- شرایط مرزی معلوم: شبکه باید تا ناحیه ای گسترش یابد که شرایط مرزی به وجود آمده معلوم باشد (به عنوان مثال بستر های سنگی را اغلب می توان با شرایط مرزی گیردار نمایش داد) و یا تا مسافتی ادامه یابد که شرایط موجود در مرز، تأثیر عمده ای بر تنش ها و تغییر شکل های ناحیه مورد مطالعه نداشته باشد.

شبکه اجزای محدود برای تحلیل اندرکنش خاک-سازه می تواند شامل انواع بسیار متنوعی از المان ها باشد:

۱- المان های دو بعدی: برای بخش هایی از خاک و بتن در تحلیل تنش مسطح یا متقارن محوری

۲- المان های مکعبی سه بعدی: برای بخش هایی از خاک یا بتن در تحلیل سه بعدی

۳- المان های تیر یا پوسته: برای دیوارهای سپر، کافردم و دیگر اعضای سازه ای

۴- المان های میله ای: برای *strut* ها و میل مهارها

۵- المان های فصل مشترک: برای مدل سازی لغزش بین مصالح نا مشابه مانند خاک و دیوار حائل

بتنی [۱۲]

۳-۷- توالی ساخت

الف- توالی ساخت: مدل سازی مراحل ساخت به دو دلیل در مسائل اندرکنش خاک-سازه اهمیت دارد:

۱- پاسخ خاک غیر خطی است و ۲- هندسه می تواند در طول ساخت تغییر کند.

⁸ Stratigraphy

ب- تنش های اولیه در محل: به دلیل رفتار غیر خطی تنش- کرنش خاک همواره لازم است که ابتدا تنش های اولیه درجا در مصالح پی محاسبه گردند. علاوه بر آن لازم است انواع عملیات ساخت زیر به صورت گام به گام مدل سازی شوند:

خاکبرداری، خاکریزی، نصب یا حذف اجزای سازه ای و اعمال بارها و فشارها. مدل سازی دیگر منابع بار نظیر کرنش های حرارتی در اجزای سازه ای غالباً از اهمیت کمتری برخوردارند [۱۲].

۳-۸- به کارگیری نرم افزار در روش های عددی

همان طور که از توضیحات فوق بر می آید در روش تحلیل عددی کامل، سعی شده است تمام الزامات تئوریک برآورده گردند که از آن جمله می توان به مدل های خاک و شرایط مرزی که به طور یقین اندیشانه شرایط کارگاهی را شبیه سازی می کنند، اشاره کرد. روش هایی که بر پایه روش های تفاضلات محدود، المان مرزی و المان محدود بنا شده اند، به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. این روش ها اصولاً یک شبیه سازی کامپیوتری از تاریخچه مسائل مقدار مرزی، از شرایط کارگاهی گرفته تا ساخت و شرایط درازمدت را در بر می گیرند. علاوه بر آن با استفاده از *FEM* تاریخچه کامل مسئله شبیه سازی می گردد و اطلاعات لازم برای تمام مراحل طراحی فراهم می شود [۱۲].

با این وجود و علیرغم مزایای روش های کامل عددی مخصوصاً روش اجزای محدود، این روش ها بسیار پیچیده هستند و با پیچیده شدن مسئله و افزایش تعداد پارامترها و دقت مورد نیاز، حل آنها به روش دستی تقریباً غیر ممکن می گردد. در حال حاضر برای انجام چنین تحلیل هایی از برنامه های کامپیوتری استفاده می شود. از جمله این برنامه ها می توان به نرم افزار *PLAXIS* اشاره کرد که یک برنامه اجزای محدود بوده و کاربرد زیادی در حل مسائل ژئوتکنیک دارد.

۳-۹- معرفی نرم افزار *PLAXIS*

PLAXIS یک برنامه اجزای محدود دو و سه بعدی است که اختصاصاً برای تحلیل تغییر شکل ها و پایداری در پروژه های مهندسی ژئوتکنیک ساخته شده است. روش های ساده ورودی گرافیکی این نرم افزار، تولید سریع مدل های پیچیده اجزای محدود را امکان پذیر ساخته و امکانات بهینه خروجی آن، امکان مشاهده نتایج پر جزئیات محاسباتی را فراهم نموده است [۱۳]. محاسبات تماماً خودکار و بر مبنای روش های عددی مطمئن می باشد و از این جهت یادگیری و کار با این نرم افزار بسیار ساده می باشد. حل های واقعی با مدل های کرنش صفحه ای یا متقارن محوری انجام می گیرد [۱۴].

عملکرد و دقت PLAXIS با تحلیل مسائل به روش های تحلیلی شناخته شده، به دقت آزمایش شده است. PLAXIS برای تحلیل مسائل الاستیک، پلاستیک و جریان آب در زیر خاک و تحکیم کاربرد دارد. برخی از ویژگی های اصلی این نرم افزار به شرح زیرند:

- تولید خودکار مش بندی
- استفاده از المان های مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی برای مدل سازی خاک
- استفاده از المان های تیری مخصوص برای مدل سازی خمشی دیوارهای نگهدارنده، پوشش تونل، پوسته ها و دیگر سازه های لاغر
- وجود المان های گرهی برای مدل سازی اندرکنش خاک-سازه (مدل سازی فصل مشترک)
- استفاده از المان های فنری الاستوپلاستیک برای مدل سازی مهارها و *strut* ها
- استفاده از مدل ساده موهر-کولمب
- استفاده از مدل های پیشرفته متعدد خاک مانند مدل سخت شوندهی خاک، مدل خزش نرم خاک برای بررسی دقیق رفتار وابسته به زمان و تراکم لگاریتمی خاک های نرم عادی تحکیم یافته، و مدلی برای تحلیل رفتار غیر ایزوتروپیک سنگ های گرهی
- لحاظ کردن فشار حفره ای پایدار در محاسبات
- فشارهای اضافی حفره ای
- بارگذاری خودکار مرحله به مرحله
- کنترل طول قوس برای محاسبه دقیق بارهای گسیختگی و مکانیزم های شکست

- ساخت مرحله به مرحله قادر به شبیه سازی واقعی و دقیق ساخت و خاکبرداری
- تحلیل تحکیم
- لحاظ کردن ضریب اطمینان [۱۵]

۳-۱۰-۱- تئوری ها و روابط مورد استفاده در نرم افزار PLAXIS

۳-۱۰-۱-۱ فرمول بندی اجزا

در این قسمت، توابع درون یاب اجزا که در PLAXIS مورد استفاده قرار گرفته، تشریح شده است. هر المان شامل تعدادی گره است. هر گره متشکل از تعدادی درجه آزادی است که با مقادیر مستقل مجهولی که از تحلیل مسأله مقدار مرزی حاصل می شوند، متناظر می باشد. در مورد تئوری تغییر شکل، درجات آزادی با مؤلفه های جابجایی متناظر می باشد در حالی که در مورد جریان آب زیرزمینی، درجات آزادی با ارتفاع های آب زیرزمینی متناظر می باشد. برای مسائل تحکیم، درجات آزادی، شامل هر دو مؤلفه جابجایی و فشارهای منفذی (اضافی) هستند. علاوه بر این، توابع درون باب به توصیف نوع انتگرال گیری عددی بکار رفته روی المان های مورد استفاده در PLAXIS می پردازد [۱۶].

۳-۱۰-۲- توابع درون یاب برای اجزای خطی

در یک المان، میدان جابجایی $\underline{u} = (u_x, u_y)^T$ از مقادیر گرهی مستقل در یک بردار $\underline{v} = (v_1, v_2, v_3)^T$ با استفاده از توابع درون یاب ترکیب شده در ماتریس \underline{N} به دست می آید.

$$\underline{u} = \underline{N} \underline{v}$$

از این رو برای درون یابی مقادیر معلوم گره ها، توابع درون یاب \underline{N} ، مورد استفاده قرار می گیرند. توابع درون یاب همچنین به عنوان توابع شکل شناخته شده اند.

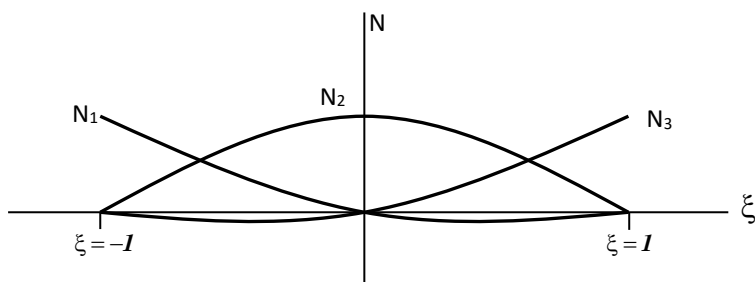
یک المان خطی را در نظر بگیرید. المان های خطی، پایه و اساس المان های جیوتکستایل، المان های صفحه و بارهای گسترده هستند.

وقتی موقعیت محلی، ξ ، یک نقطه (معمولاً یک نقطه تنش یا یک نقطه انتگرال گیری) معلوم است، برای یک مؤلفه جابجایی u می توان نوشت:

$$u(\xi) = \sum_{i=1}^n N_i(\xi) v_i$$

که در آن:

| | |
|------------|--|
| v_i | مقادیر گرهی |
| $N_i(\xi)$ | مقدار تابع شکل گره i در موقعیت ξ |
| $u(\xi)$ | مقدار نتیجه در موقعیت ξ |
| n | تعداد گره های هر المان |



شکل ۳-۱- توابع شکل المان خطی ۳ گرهی

در این نمودار، مثالی از یک المان خطی ۳ گرهی ارائه شده است. نظر به اینکه المان های مثلثی ۶ گرهی در هر سمت خود دارای سه گره هستند از این رو المان خطی ۳ گرهی فوق با المان های مثلثی ۶ گرهی در PLAXIS

سازگار می باشد. توابع شکل، N دارای این ویژگی هستند که مقدار این تابع در گره i مساوی یک (۱) و در سایر گره ها مساوی صفر (۰) است [۱۶].

برای المان های خطی ۳ گرهی، جایی که گره های ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب در موقعیتهای ξ برابر ۱- و ۰ و ۱ قرار می گیرند، توابع شکل به صورت روابط زیر داده می شوند:

$$N_1 = -\frac{1}{2} \xi (1 - \xi)$$

$$N_2 = (1 - \xi)(1 + \xi)$$

$$N_3 = \frac{1}{2} \xi (1 + \xi)$$

با استفاده از المان های مثلثی ۱۵ گرهی، در هر طرف ۵ گره وجود دارد. برای المان های خطی ۵ گرهی که گره های ۱ تا ۵ به ترتیب برابر ۱-، -۱/۲، ۰، ۱/۲ و ۱ قرار دارند (شکل (۳-۲))، داریم:

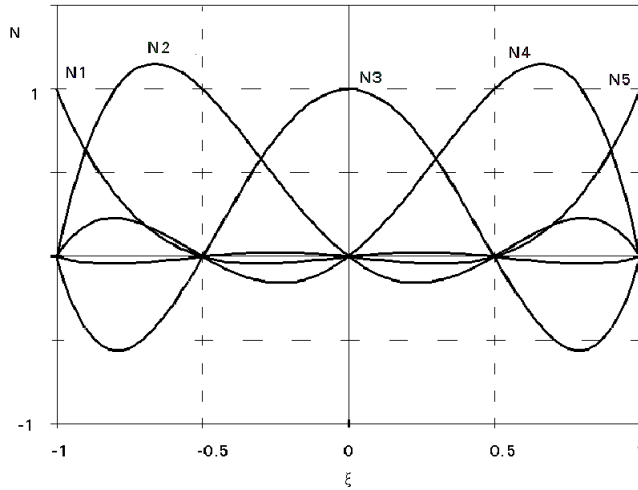
$$N_1 = -\xi(1 - \xi)(1 - 2\xi)(-1 - 2\xi) / 6$$

$$N_2 = 4\xi(1 - \xi)(1 - 2\xi)(-1 - \xi) / 3$$

$$N_3 = (1 - \xi)(1 - 2\xi)(-1 - 2\xi)(-1 - \xi)$$

$$N_4 = 4\xi(1 - \xi)(-1 - 2\xi)(-1 - \xi) / 3$$

$$N_5 = -\xi(1 - 2\xi)(-1 - 2\xi)(-1 - \xi)$$



شکل ۳-۲- توابع شکل برای المان های خطی ۵ گرهی [۱۶]

۳-۱۰-۲-۱- توابع درون یاب برای اجزاء مثلثی

برای المان های مثلثی، دو مختصات محلی (ξ, η) وجود دارد. علاوه بر این از یک مختصات کمکی

$\mu = 1 - \xi - \eta$ استفاده می شود. توابع درون یاب برای المان های مثلثی ۱۵ گرهی به صورت زیرند (شکل ۳-۳)

(۳):

$$N_1 = \zeta (4\zeta - 1)(4\zeta - 2)(4\zeta - 3) / 6$$

$$N_2 = \xi (4\xi - 1)(4\xi - 2)(4\xi - 3) / 6$$

$$N_3 = \eta (4\eta - 1)(4\eta - 2)(4\eta - 3) / 6$$

$$N_4 = 4\zeta\xi (4\zeta - 1)(4\xi - 1)$$

$$N_5 = 4\xi\eta (4\xi - 1)(4\eta - 1)$$

$$N_6 = 4\zeta\eta (4\zeta - 1)(4\eta - 1)$$

$$N_7 = \zeta\xi (4\zeta - 1)(4\zeta - 2) \times 8/3$$

$$N_8 = \zeta\xi (4\xi - 1)(4\xi - 2) \times 8/3$$

$$N_9 = \eta\xi (4\xi - 1)(4\xi - 2) \times 8/3$$

$$N_{10} = \xi\eta (4\eta - 1)(4\eta - 2) \times 8/3$$

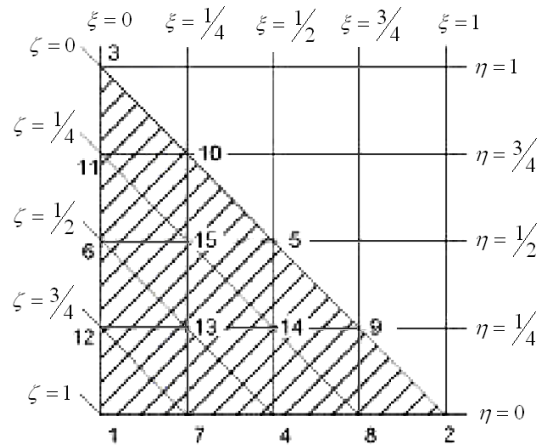
$$N_{11} = \zeta\eta (4\eta - 1)(4\eta - 2) \times 8/3$$

$$N_{12} = \eta\xi (4\zeta - 1)(4\zeta - 2) \times 8/3$$

$$N_{13} = 32\eta\xi\zeta (4\zeta - 1)$$

$$N_{14} = 32\eta\xi\zeta (4\xi - 1)$$

$$N_{15} = 32\eta\xi\zeta (4\eta - 1)$$



شکل ۳-۳- شماره گذاری و موقعیت محلی گره ها [۱۶]

۳-۱۰-۲-۲- انتگرال گیری عددی اجزای خطی

به منظور انتگرال گیری روی یک خط یا مساحت خاص، انتگرال گیری به صورت عددی تخمین زده می شود:

$$\int_{\xi=-1}^1 F(\xi) d\xi \approx \sum_{i=1}^k F(\xi_i) w_i$$

که $F(\xi_i)$ مقدار تابع در موقعیت ξ_i و w_i ضریب وزنی در نقطه i می باشد. همچنین k کل نقاط نمونه گیری مورد استفاده می باشد. غالباً در *PLAXIS* دو روش مورد استفاده قرار می گیرد: روش اول انتگرال گیری نیوتن - کوتس^۹ در جایی که نقاط کمتری در موقعیت گره ها انتخاب شده باشد و روش دوم انتگرال گوس^{۱۰}، در جایی که نقاط کمتری در محل های خاصی می تواند برای رسیدن به دقت بالا مورد استفاده قرار گیرد [۱۶].

⁹ Newton- Cotes

¹⁰ Gauss

با استفاده از روش انتگرال گیری نیوتن-کوتس، ضمن اینکه توابع چند گانه به طور دقیق انتگرال گیری می شوند، تعداد نقاط کمتری نیز بکار می روند. برای روش انتگرال گیری گوس، یک تابع چند گانه با درجه $2k-1$ می تواند با استفاده از k نقطه به طور دقیق انتگرال گیری شود.

برای المان های فصل مشترک، *PLAXIS* از روش انتگرال گیری نیوتن-کوتس استفاده می کند، با وجود این برای المان های تیر و انتگرال گیری بارهای مرزی از روش انتگرال گیری گوسی استفاده می شود [۱۶].

۳-۱۰-۲-۳- انتگرال گیری عددی اجزای مثلثی

برای المان های خطی می توان انتگرال گیری عددی را روی المان های مثلثی فرمول بندی کرد.

$$\iint F(\xi, \eta) d\xi \cdot d\eta \approx \sum_{i=1}^k F(\xi_i, \eta_i) w_i$$

PLAXIS برای المان های مثلثی از روش انتگرال گیری گوسی استفاده می کند. برای المان های ۶ گرهی،

انتگرال گیری بر مبنای ۳ نقطه نمونه انجام می شود؛ با وجود این برای المان های ۱۵ گرهی، از ۱۲ نقطه استفاده می شود [۱۶].

۳-۱۰-۲-۴- مشتقات توابع شکل

به منظور محاسبه مؤلفه های کرنش از جابجایی ها در دستگاه کارترین، مطابق معادله (۲-۱۰)، لازم است مشتقات نسبت به دستگاه محورهای مختصات کلی (محورهای X و Y و Z) گرفته شوند.

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{B}}_i v_i$$

که:

$$\underline{\underline{B}}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

در المان ها، مشتقات نسبت به سیستم مختصات محلی (ξ, η, ζ) محاسبه شده اند. رابطه بین مشتقات

محلی و کلی، در قالب ماتریس ژاکوبین، J ، ارائه می شود.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{bmatrix}$$

نظر به اینکه توابع شکل در مختصات محلی فرمول بندی می شوند، مشتقات محلی می تواند به آسانی از

توابع شکل المان به دست آید [۱۶].

مؤلفه های کرنش در دستگاه کارتزین از مجموع همه گره ها به دست می آیند:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \sum_i \underline{\underline{B}}_i \begin{bmatrix} v_{x,i} \\ v_{y,i} \\ v_{z,i} \end{bmatrix}$$

که v_i مؤلفه های جابجایی در گره ها هستند. بنا به تعریف در تحلیل کرنش صفحه ای، مؤلفه های کرنش در

جهت Z صفر هستند؛ یعنی $\varepsilon_{zz} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$.

۳-۱۰-۲-۵- محاسبه ماتریس سختی اجزا

ماتریس سختی المان، K^e به وسیله انتگرال گیری محاسبه می شود:

$$\underline{\underline{K}}^e = \int \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{B}} dV$$

این انتگرال گیری همانطور که در بخش (۳-۵) تشریح شد، با انتگرال گیری عددی تخمین زده می شود. در واقع ماتریس سختی المان، مرکب از زیر ماتریس های K_{ij}^e است که در آن i و j گره های محلی هستند. روند محاسبه ماتریس سختی المان می تواند به صورت زیر فرمول بندی شود:

$$\underline{\underline{K}}_{ij}^e = \sum_k \underline{\underline{B}}_{=i}^T \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{B}}_{=j} w_k$$

۳-۱۰-۳- تئوری تغییر شکل خاک

در این قسمت معادلات پایه استاتیکی یک حجم خاک در قالب مکانیک محیط های پیوسته فرمول بندی شده است. در ادامه توضیحات مبسوطی بر اساس روش اجزای محدود به طور مجزا ارائه می گردد [۱۶].

۳-۱۰-۳-۱- معادلات پایه تغییر شکل محیط پیوسته

معادله ایستایی یک محیط پیوسته را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\underline{\underline{L}}^T = \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{p}} = 0 \quad (۳-۱۳)$$

این معادله مشتق های فضایی ۶ مؤلفه تنش را که در بردار $\underline{\underline{\sigma}}$ قرار دارند به ۳ مؤلفه نیروهای حجمی که در بردار $\underline{\underline{p}}$ قرار دارند مرتبط می کند. $\underline{\underline{L}}^T$ ماتریس ترانهاده عملگر دیفرانسیلی است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\underline{\underline{L}}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (14-3)$$

علاوه بر معادلات تعادل، روابط سینماتیکی می تواند به صورت زیر به فرمول درآید:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{L}} \underline{\underline{u}} \quad (15-3)$$

این معادله با استفاده از عملگر دیفرانسیلی $\underline{\underline{L}}$ که قبلاً معرفی گردید به تشریح ۶ مؤلفه کرنش ترکیب شده در بردار $\underline{\underline{\varepsilon}}$ به عنوان مشتقات فضایی ۳ مؤلفه جابجایی ترکیب شده در بردار $\underline{\underline{u}}$ می پردازد. پیوند بین معادلات (۱۳) و (۱۵) به وسیله رابطه مشخصه معرف رفتار مصالح شکل گرفته است. روابط مشخص، یعنی روابط میان نرخ های تنش و کرنش به صورت گسترده در راهنمای مدل های مصالح مورد بحث قرار گرفته است که این رابطه به صورت زیر است:

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}}} = \underline{\underline{M}} \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} \quad (16-3)$$

ترکیب معادلات (۱۳-۳) و (۱۴-۳) و (۱۶-۳) منجر به تشکیل معادله دیفرانسیل دوم در جابجایی $\underline{\underline{u}}$ می شود. هر چند بر طبق اصل تغییرات گالرکین، به جای یک ترکیب مستقیم می توان معادله تعادل را مجدداً فرمول بندی کرد [۱۶]:

$$\int \delta \underline{\underline{u}}^T (\underline{\underline{L}}^T \underline{\underline{\sigma}} + p) dV = 0 \quad (17-3)$$

در این رابطه، $\delta \underline{\underline{u}}$ تغییرات جابجایی های قابل قبول سینماتیکی را نشان می دهد. به کار بردن تئوری گرین برای انتگرال گیری جزئی قسمت اول معادله (۱۷-۳) به معادله زیر منجر می شود:

$$\int \delta \underline{\underline{\varepsilon}}^T \underline{\underline{\sigma}} dV = \int \delta \underline{\underline{u}}^T \underline{\underline{p}} dV + \int \delta \underline{\underline{u}}^T \underline{\underline{t}} ds \quad (18-3)$$

این معادله، انتگرال مرزی را هنگامی که کشش مرزی رخ می دهد، معرفی می کند. بردار \underline{t} مشتمل بر ۳ مؤلفه کشش مرزی است. معادله (۱۸-۳) معرف یک معادله کار مجازی است. توسعه حالت پیشرفته تنش $\underline{\sigma}$ می تواند در یک فرایند افزایشی به صورت زیر بیان شود:

$$\underline{\sigma}^i = \underline{\sigma}^{i-1} + \Delta \underline{\sigma}, \Delta \underline{\sigma} = \int \underline{\dot{\sigma}} dt \quad (19-3)$$

در این رابطه $\underline{\sigma}^i$ معرف حالت واقعی تنش است که مجهول می باشد و $\underline{\sigma}^{i-1}$ عبارت از نرخ تنش انتگرال گیری شده در یک دوره زمانی کوچک است. اگر معادله (۱۸-۳) برای حالت واقعی i در نظر گرفته شود، تنش های مجهول $\underline{\sigma}^i$ را می توان با استفاده از معادله (۱۹-۳) حذف نمود:

$$\int \delta \underline{\varepsilon}^T \Delta \underline{\sigma} dV = \int \delta \underline{u}^T \underline{p}^i dV + \int \delta \underline{u}^T \underline{t}^i ds - \int \delta \underline{\varepsilon}^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (20-3)$$

شایان ذکر است که تمام کمیت های ظاهر شده در معادلات (۱۳-۳) تا (۲۰-۳) توابعی از موقعیت در فضای سه بعدی هستند [۱۶].

۳-۱۰-۳-۲- گسسته سازی اجزای محدود

بنا بر روش اجزای محدود، یک محیط پیوسته از نظر حجم به تعدادی المان تقسیم می شود. هر المان مرکب از تعدادی گره است که نظیر مقادیر مستقل مجهولات می باشند. این مقادیر مجهول از حل مسئله شرایط مرزی به دست می آیند. در مورد تئوری تغییر شکل حاضر، درجات آزادی متناظر با مؤلفه های تغییر مکان هستند. در داخل یک المان، میدان جابجایی \underline{u} ، از مقادیر مستقل گرهی در یک بردار \underline{v} ، با استفاده از توابع درونیابی که درون ماتریس \underline{N} استقرار یافته اند، به دست می آید:

$$\underline{u} = \underline{N} \underline{v} \quad (21-3)$$

توابع درونیاب در ماتریس \underline{N} معمولاً به صورت توابع شکل تفکیک شده اند. با جایگزین نمودن معادله (۳-۲۱) رابطه زیر به دست می آید:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{L} \underline{N} \underline{v} = \underline{B} \underline{v} \quad (۳-۲۲)$$

در این رابطه \underline{B} ماتریس درونیاب کرنش است که شامل مشتق های فضایی توابع درونیاب است.

حال می توان معادله (۲۰) را دوباره به صورت رابطه مستقل زیر درآورد:

$$\int (\underline{B} \delta \underline{v})^T \Delta \underline{\sigma} dV = \int (\underline{N} \delta \underline{v})^T \underline{p}^i dV + \int (\underline{N} \delta \underline{v})^T \underline{t}^i dS - \int (\underline{B} \delta \underline{v})^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (۳-۲۳)$$

با قرار دادن جابجایی های مستقل در خارج از انتگرال داریم:

$$\delta \underline{v}^T \int (\underline{B})^T \Delta \underline{\sigma} dV = \delta \underline{v}^T \int \underline{N}^T \underline{p}^i dV + \delta \underline{v}^T \int \underline{N}^T \underline{t}^i dS - \delta \underline{v}^T \int \underline{B}^T \underline{\sigma}^{i-1} dV \quad (۳-۲۴)$$

معادله بالا یک شرط پیچیده تعادل می باشد که ماهرانه به صورت مجزا درآمده است. اولین جمله در سمت راست به همراه دومین جمله، معرف بردار نیروی خارجی جاری و آخرین جمله معرف بردار عکس العمل داخلی از گام قبلی است. اختلاف بین بردار نیروی خارجی و بردار عکس العمل داخلی باید به وسیله تغییرات تنش $\Delta \underline{\sigma}$ به تعادل برسد. رابطه بین تغییرات تنش و تغییرات کرنش معمولاً غیر خطی است. در نتیجه میزان تغییرات کرنش $\Delta \underline{\varepsilon}$ را نمی توان به طور مستقیم محاسبه کرد. برای ارضای شرایط تعادل (معادله (۳-۲۳)) برای کلیه نقاط مصالح، احتیاج به روش های تکراری عمومی داریم که در این مجال نمی گنجد [۱۶].

۳-۳-۱۰-۳- انتگرال گیری ضمنی مدل پلاستیک دیفرانسیلی

بنا بر معادله (۳-۱۹) تغییرات تنش $\Delta\sigma$ به وسیله انتگرال گیری نرخ های تنش به دست می آید. به طور کلی برای مدل های پلاستیک دیفرانسیلی، تغییرات تنش می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\Delta\sigma = \underline{D}^e (\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon^p) \quad (۳-۲۵)$$

در این رابطه \underline{D}^e نشان دهنده ماتریس مصالح الاستیک برای تغییرات تنش جاری است. تغییرات کرنش $\Delta\varepsilon$ از تغییرات جابجایی Δv با استفاده از ماتریس درونیاب کرنش \underline{B} مانند معادله (۲۲) به دست می آید. برای رفتار مصالح الاستیک، تغییر کرنش الاستیک $\Delta\varepsilon^p$ صفر است. برای رفتار مصالح پلاستیک، تغییر کرنش الاستیک را می توان بنا بر نظر ورمیر به صورت زیر نوشت:

$$\Delta\varepsilon^p = \Delta\lambda \left[(1-\omega) \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma} \right)^{i-1} + \omega \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma} \right)^i \right] \quad (۳-۲۶)$$

در این معادله $\Delta\lambda$ ، تغییر ضریب پلاستیک و ω پارامتری است که نشانگر نوع انتگرال گیری زمانی است. برای $\omega = 0$ انتگرال گیری، صریح و برای $\omega = 1$ ضمنی نامیده می شود. ورمیر نشان داد که استفاده از انتگرال ضمنی دارای مزایای بسیار مهمی است به طوری که در انتقال از رفتار الاستیک به الاستو پلاستیک، قادر به تصحیح تنش ها در سطح تسلیم است. علاوه بر آن می توان اثبات کرد که انتگرال ضمنی تحت شرایط خاص منجر به تشکیل ماتریس دیفرانسیلی مثبت و متقارن $\partial\varepsilon/\partial\sigma$ می شود که بر روش های تکراری تأثیر می گذارد. به همین دلیل توجه خاصی به انتگرال گیری ضمنی شده است و به سایر انتگرال گیری های زمانی توجهی نشده است. از این رو برای $\omega = 1$ معادله (۳-۲۶) به شکل زیر در می آید:

$$\Delta\varepsilon^p = \Delta\lambda \omega \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma} \right)^i \quad (۳-۲۷)$$

با جایگذاری معادله (۳-۲۷) در (۳-۲۵) و به طور مضاعف در معادله (۳-۱۹)، معادله زیر به دست می آید:

$$\underline{\sigma}^i = \underline{\sigma}^{tr} - \Delta\lambda \underline{D}^e \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma} \right)^i, \quad \underline{\sigma}^{tr} = \underline{\sigma}^{i-1} + \underline{D}^e \Delta\varepsilon \quad (۳-۲۸)$$

در این رابطه $\underline{\sigma}''$ یک بردار تنش کمکی تحت عنوان تنش های ارتجاعی یا تنش های آزمایشی می باشد که با در نظر گرفتن رفتار مصالح به صورت کاملاً خطی، حالت جدیدی از تنش است. تغییر ضریب پلاستیک، $\Delta\lambda$ همانطور که در معادله (۳-۲۸) به کار رفته، می تواند از شرایطی که حالت تنش جدید مجبور به ارضای شرط تسلیم است، به دست آید.

$$f(\underline{\sigma}^i) = 0 \quad (۳-۲۹)$$

برای مدل های پلاستیک کامل و سخت شدگی خطی، تغییرات ضریب پلاستیک می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\Delta\lambda = \frac{f(\underline{\sigma}''^i)}{d+h} \quad , \quad d = \left(\frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}} \right)^{\sigma''^i} \underline{\underline{D}}^e \left(\frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}} \right)^i \quad (۳-۳۰)$$

نشانه h پارامتر سخت شدگی را مشخص می کند که برای حالت پلاستیک کامل برابر صفر و برای مدل های سخت شدگی خطی، ثابت است.

با استفاده از روابط بیان شده در این قسمت می توان ماتریس سختی را به صورت زیر به دست آورد:

$$\underline{\underline{K}} = \int \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{B}} dV \quad (۳-۳۱)$$

که پارامترهای داخل انتگرال قبلاً معرفی شده اند. استفاده از ماتریس سختی حتی وقتی که از مدل های پلاستیکی ناپیوسته استفاده می شود، یک روش تکراری نیرومند را نتیجه می دهد. برای مدل های مواد با رفتار خطی در محدوده الاستیک مانند روش موهر- کولمب، استفاده از یک ماتریس سختی الاستیک به طور خاص مورد قبول است [۱۶].

فصل چهارم: معرفی پروژه اسکله سپری بندر لنگه

۱-۴- مقدمه

سپرهای فولادی کاربرد بسیاری در ساخت بنادر دارند. این سپرها در کشور ما نیز در نقاط مختلف ساحلی جهت احداث اسکله ها مورد استفاده قرار گرفته اند. تعدادی از بنادری که از سپر فولادی در ساخت آنها استفاده شده است در جدول (۱-۴) دیده می شود.

جدول ۱-۴- تعدادی از بنادر ساخته شده با سپر فولادی

| نام بندر | استان | کاربری | نوع سازه | سال احداث | طول | عرض | آبخور نسبت به مینا | نوع و درصد خرابی اسکله |
|---------------------|----------|--------------|------------|-----------|------|------|--------------------|---------------------------|
| خارک | پوتهر | چندمنظوره | سپر فولادی | ۱۳۷۹ | ۸۵٫۷ | ۲۳ | -۵ | |
| اسکله صیادی پوتهر | پوتهر | تجارتی | سپر فولادی | ۰ | ۳۱۰ | ۰ | ۰ | خوردگی سپرها |
| نفت فالنت قاره خارک | پوتهر | نفتی | سپر فولادی | ۰ | ۱۰۰ | ۷۰ | -۵ | |
| خرمشهر | خوزستان | کالای عمومی | سپر فولادی | ۰ | ۲۶۰ | ۰ | -۳ | عریته نیاز به تعمیر دارد. |
| انزلی-تجاری | گیلان | کالای عمومی | سپر فولادی | ۰ | ۱۱۸ | ۳۰ | -۵٫۵ | |
| ترکمن | مازندران | چندمنظوره | سپر فولادی | ۰ | ۱۷۵ | ۱۵ | -۲٫۲ | |
| گز | مازندران | مسافری | سپر فولادی | ۰ | ۲۲۰ | ۰ | ۰ | |
| نوتهر | مازندران | تجاری | سپر فولادی | ۱۳۱۸ | ۳۵۲ | ۲۶٫۵ | -۵٫۵ | خوردگی سپرها |
| نوتهر | مازندران | تجاری | سپر فولادی | ۱۳۱۸ | ۵۲۰ | ۱۱٫۳ | -۵٫۵ | خوردگی سپرها |
| نوتهر | مازندران | تجاری | سپر فولادی | ۱۳۱۸ | ۳۳۰ | ۲۴ | -۵٫۵ | نشست اسکله و خوردگی سپر |
| اسکله ۲۳ بهمن | هرمزگان | چندمنظوره | سپر فولادی | ۰ | ۱۷۰ | ۱۲ | -۵٫۵ | |
| جاسک-تجاری | هرمزگان | تجاری | سپر فولادی | ۱۳۶۴ | ۲۶۰ | ۲۰ | -۵٫۵ | |
| درگهان جدید | هرمزگان | تجاری-مسافری | سپر فولادی | ۱۳۸۱ | ۹۳ | ۶۰ | -۴ | |
| کنگ | هرمزگان | تجارتی | سپر فولادی | ۱۳۴۶ | ۷۰ | ۳ | -۴ | خوردگی سپرها |
| لنگه | هرمزگان | چندمنظوره | سپر فولادی | ۱۳۶۲ | ۲۴۰ | ۱۳ | -۵٫۵ | خوردگی سپرها |

همان طور که در جدول بالا دیده می شود، خرابی تعدادی از اسکله ها به علت خوردگی سپر فولادی بوده است که به علت قرار گرفتن سپرها در محیط خورنده دریایی رخ داده است. در بندر لنگه نیز که موضوع این پایان نامه می باشد و در ردیف پایانی جدول قرار گرفته است، خوردگی سپرها، عامل خرابی بوده است.

در این فصل ابتدا و به طور اجمالی درباره سازه بندر لنگه صحبت شده است. سپس وضعیت خوردگی ها در آن تشریح گردیده و نتایج آزمایش های ضخامت سنجی انجام شده در محل ذکر گردیده است. در انتها نیز خصوصیات خاک های موجود در محل اسکله بیان شده است.

۴-۲- اطلاعات کلی در رابطه با سازه اسکله قدیمی بندر لنگه

بندر لنگه یکی از بنادر مهم جنوب کشور به شمار می رود. فاصله بندر لنگه تا شهر لار ۲۸۰ کیلومتر، تا بندر عباس ۱۹۲ کیلومتر و تا بوشهر ۴۲۰ کیلومتر می باشد.

در سال ۱۳۶۴ اسکله قدیمی بندر لنگه که موضوع پایان نامه حاضر است، با طرح سپر فولادی توسط شرکت ترکیه ای Sezai در ضلع جنوبی بندر به طول تقریبی ۲۳۴ متر احداث گردید. این اسکله با توجه به عمق حوضچه (۵/۵ متر)، قابلیت پهلودهی به شناورهای تا تناژ ۲۰۰۰ تن را دارا می باشد. موقعیت قرارگیری این اسکله و نمای کلی بندر در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، اسکله قدیمی در مجاورت موج شکن غربی قرار گرفته است. ساختار اصلی این اسکله سپری بوده و فندرپایل هایی در فاصله ۴/۸ متر از یکدیگر، در جلوی سپر اجرا شده است.



شکل ۴-۱- موقعیت قرارگیری اسکله قدیمی و نمای کلی از اسکله بندر لنگه

۳-۴- شرایط محیطی و اقلیمی سازه

شرایط محیطی سازه اسکله به لحاظ قرار گرفتن آن در مجاورت دریا، بسیار نامساعد بوده و ضروری است عوامل مؤثر به دقت مورد بررسی قرار گیرند. شرایط محیطی و اقلیمی سازه از دو جنبه وضعیت جوی و وضعیت دریایی، مورد ارزیابی قرار گرفته اند که در اینجا تنها به جنبه وضعیت دریایی اشاره می گردد.

۱-۳-۴- وضعیت دریایی منطقه

در بررسی وضعیت دریایی منطقه بندر لنگه نیز می توان به پارامترهایی از جمله رژیم جزر و مدی، میزان املاح در آب دریا و تغییرات درجه حرارت آب اشاره نمود.

الف- رژیم جزر و مدی

بر اساس مطالعات انجام شده می توان رژیم جزر و مدی آب دریا در موقعیت بندر لنگه را در جدول (۱-۴) خلاصه نمود.

جدول ۲-۴- رژیم جزر و مدی آب دریا در بندر لنگه

| موقعیت | Z ₀ = ML | MHHW | MLHW | MHLW | MLLW |
|-----------|---------------------|------|------|------|------|
| بندر لنگه | 1.48 | 2.36 | 1.81 | 1.15 | 0.63 |

ب- میزان املاح در آب دریا

مطالعات و بررسی های آزمایشگاهی نشان می دهد که املاح موجود در آب دریا در این منطقه از زمره بیشترین املاح موجود در آب های جهان است. بالا بودن غلظت یون کلر و سولفات در این آب ها زمینه خوردگی در سازه های

ساحلی و دریایی را فراهم می‌سازد. میزان متوسط و حداکثر املاح موجود در آب دریا در منطقه بندر لنگه در جدول (۲-۴) آمده است.

جدول ۳-۴- میزان متوسط و حداکثر املاح موجود در آب دریا در منطقه بندر لنگه

| میزان حداکثر املاح mg/lit | میزان متوسط املاح mg/ lit | نام املاح و یون های موجود |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 8.2 | 7.9 | PH |
| 1073 | 304.63 | HCO ₃ |
| 24800 | 23091.7 | CL |
| 3130 | 3008.7 | SO ₄ |
| 560 | 496.8 | Ca |
| 1660 | 1476.8 | Mg |
| 14200 | 13100 | Na |

ج- درجه حرارت آب

دمای آب خلیج فارس در ماه بهمن از ۲۱°C به کمترین دما یعنی تقریباً ۱۶°C و در ماه شهریور از ۳۲°C به بیشترین دما یعنی ۳۶°C تغییر می‌کند.

۴-۴- معرفی اجزا و المان های سازه

اسکله قدیمی بندر لنگه را می‌توان به اجزاء اصلی ذیل تقسیم نمود:
 ۱- سپر، ۲- بلوک‌های بتنی سرشمع، ۳- تیر پیشانی، ۴- میل مهارهای سپر (Tie-Rod)، ۵- قطعات فلزی اسکله

شامل بولاردها و نردبان ها ، ۶- داکت تأسیساتی، ۷- دال محوطه اسکله، ۸- ضربه گیرها، ۹- پانتون شناور، ۱۰- دلفین های مهاربندی، در زیر تنها به موارد ۱ و ۴ پرداخته می شود.

۴-۴-۱- سپر

همان طور که گفته شد، اسکله قدیمی بندر لنگه از نوع سپری می باشد. نقش سپر در اسکله ها، جلوگیری از رانش خاک پشت اسکله بوده و به عنوان یک دیوار حائل در مقابل فشار خاک مقاومت می کند.

سپر به کار رفته در اسکله قدیمی بندر لنگه از نوع PU32 بوده و با ارتفاع ۱۵/۵ متر و عمق نفوذ ۶/۲ متر اجرا شده است. علاوه بر سپر اصلی اسکله، سپر دیگری نیز به موازات آن در پشت اسکله کوبیده شده است. ارتفاع این سپر ۵/۵ متر بوده و تراز بالاترین نقطه آن، ۱/۵ متر پایین تر از سطح عرشه اسکله می باشد. نقش این سپر، ایجاد تکیه گاه برای میل مهارهای سپر اصلی است.

۴-۴-۲- میل مهارهای سپر

معمولاً جهت کنترل حرکت جانبی سپرها در برابر نیروی خاک، از میل مهار (Tie Rod) استفاده می شود. میل مهارهای به کار رفته در این اسکله در انتها توسط یک سپر موازی با سپرهای اصلی، مهار شده اند. شکل (۴-۲) بولت های اتصال دهنده میل مهار به سپر اصلی را نشان می دهد.



شکل ۴-۲- بولت های اتصال دهنده سپر و ویل

۴-۵- بررسی آسیب ها

در این قسمت به بررسی وضعیت موجود سپرهای به کار رفته در سازه اسکله پرداخته و شرایط آن جهت انتخاب گزینه های ترمیم مورد ارزیابی واقع می شود. اطلاعات بیشتر در زمینه خوردگی در محیط های دریایی در ضمیمه ۲ موجود است.

۴-۵-۱- سپر

سپرها در ناحیه جزر و مدی (Tidal Zone) به شدت خورده شده اند (شکل ۴-۳). وضعیت آنها در ناحیه مغروق قابل مشاهده نبوده اما به نظر می رسد از وضعیت بهتری نسبت به نواحی بیرون آب برخوردار باشند. علت آن را می توان در کم بودن اکسیژن محلول در آب نسبت به هوای آزاد دانست. در بالای ناحیه جزر و مدی (ناحیه پاشش آب) و در محل اتصال سپر به تیر پیشانی نیز خوردگی های شدیدی بر روی سطح سپر مشاهده می شود (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۳- نمایی از سپر خورده شده



شکل ۴-۴- خوردگی کامل شیت پایل در بعضی از نواحی پاشش آب

۴-۵-۲- میل مهارهای سپر

با توجه به بازدید انجام شده، قسمت نمایان میل مهارها و بولت های اتصالی در جلوی سپر از وضعیت بهتری نسبت به سپر برخوردار بوده و خوردگی کمتری بر روی آنها مشاهده می شود (شکل (۴-۲)). اما لازم است که وضعیت خود میل مهارها و المان های اتصال دهنده آنها به سپرها در زیر خاک با انجام عملیات حفاری، مورد بررسی دقیق قرار گیرد.

۴-۶- آزمایش ضخامت سنجی از سپر اصلی

مطابق دستورالعمل انجام آزمایش های تکمیلی، جهت ارزیابی وضعیت سپر در نواحی مختلف شامل نواحی پاشش آب (Splash Zone)، جزر و مدی (Tidal Zone) و مغروق (Submerged)، عملیات ضخامت سنجی در فواصل مختلف

نسبت به سطح زیرین تیر پیشانی انجام پذیرفت. عملیات ضخامت سنجی از سپر (در پنج نقطه) صورت گرفت. موقعیت این نقاط عبارتند از:

نقطه A: ۵۰ سانتیمتر پایینتر از سطح زیرین تیر پیشانی بر روی سپر (بالای تراز Tie Rod)

نقطه B: ۱٫۴۰ متر پایینتر از سطح زیرین تیر پیشانی بر روی سپر (۲۰ سانتیمتر پایین تر از تراز Tie Rod)

نقطه C: ۲٫۶۰ متر پایینتر از سطح زیرین تیر پیشانی بر روی سپر

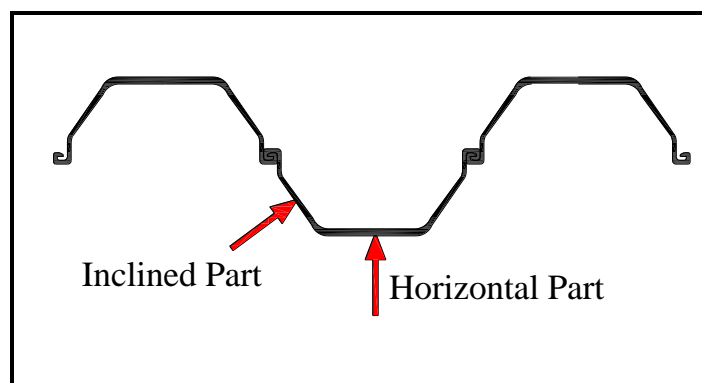
نقطه D: ۳٫۵ متر پایینتر از سطح زیرین تیر پیشانی بر روی سپر (در ناحیه مغروق)

نقطه E: ۴٫۵ متر پایینتر از سطح زیرین تیر پیشانی بر روی سپر (در ناحیه مغروق)

نقطه F: ۱ متر پایینتر از سطح زیرین بلوک بتنی بر روی فندر پایل (در ناحیه مغروق)

نقطه G: ۲ متر پایینتر از سطح زیرین بلوک بتنی بر روی فندر پایل (در ناحیه مغروق)

براساس دستورالعمل آزمایش ها، این عملیات در پنج موقعیت از طول اسکله در فواصل حدود ۵۰ متر از یکدیگر انجام شده و نتایج آن در جداول (۳-۴) تا (۷-۴) جمع آوری گردیده است. همچنین دیاگرام ضخامت نقاطی که در آنها خوردگی شدید اتفاق افتاده در اشکال (۴-۶) و (۴-۷) نشان داده شده است.



شکل ۴-۵- مقطع سپر

جدول ۴-۴- نتایج ضخامت سنجی سپر در ترازهای مختلف از موقعیت اول

| <i>Location Number</i> | <i>Point</i> | <i>Part</i> | <i>Thickness Value (mm)</i> | <i>Average Thickness (mm)</i> |
|---------------------------------|--------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Location 1 (X = 5 m)</i> | <i>A</i> | <i>Horizontal Part</i> | 16.61 | 16.92 |
| | | | 17.23 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 12.66 | 12.06 |
| | | | 11.46 | |
| | <i>B</i> | <i>Horizontal Part</i> | 20.97 | 20.70 |
| | | | 20.42 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 12.79 | 12.61 |
| | | | 12.42 | |
| | <i>C</i> | <i>Horizontal Part</i> | 18.36 | 17.86 |
| | | | 17.36 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 11.06 | 11.53 |
| | | | 11.99 | |
| | <i>D</i> | <i>Horizontal Part</i> | 19.06 | 18.98 |
| | | | 18.89 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 10.73 | 11.08 |
| | | | 11.43 | |
| | <i>E</i> | <i>Horizontal Part</i> | 19.02 | 19.05 |
| | | | 19.08 | |
| <i>Inclined Part</i> | | 12.48 | 12.31 | |
| | | 12.13 | | |

جدول ۴-۵- نتایج ضخامت سنجی سپر در ترازهای مختلف از موقعیت دوم

| <i>Location Number</i> | <i>Point</i> | <i>Part</i> | <i>Thickness Value (mm)</i> | <i>Average Thickness (mm)</i> |
|------------------------|--------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| | <i>A</i> | <i>Horizontal Part</i> | 17.80 | 18.11 |
| | | | 18.42 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 11.42 | 11.15 |
| | | | 10.87 | |
| | | | 18.73 | |

جدول ۴-۶- نتایج ضخامت سنجی سپر و فندریپایل در ترازهای مختلف از موقعیت سوم

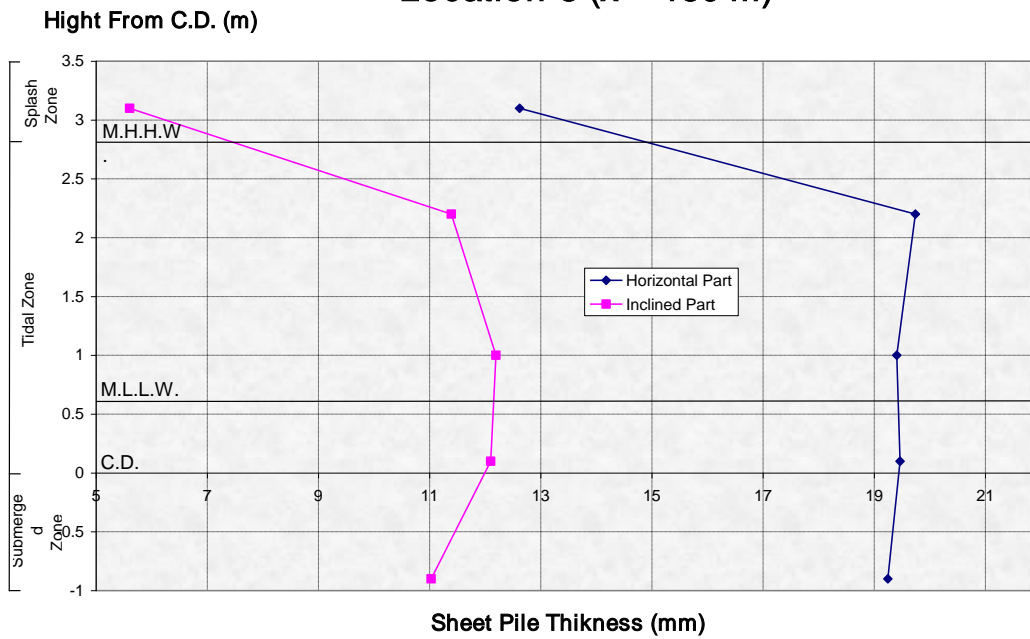
| <i>Location Number</i> | <i>Point</i> | <i>Part</i> | <i>Thickness Value (mm)</i> | <i>Average Thickness (mm)</i> |
|-----------------------------------|--------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Location 3 (X = 130 m)</i> | <i>A</i> | <i>Horizontal Part</i> | 12.55 | 12.62 |
| | | | 12.69 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 6.13 | 5.61 |
| | | | 5.08 | |
| | <i>B</i> | <i>Horizontal Part</i> | 19.65 | 19.74 |
| | | | 19.83 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 11.46 | 11.39 |
| | | | 11.32 | |
| | <i>C</i> | <i>Horizontal Part</i> | 19.20 | 19.41 |
| | | | 19.61 | |

| | | | | |
|---|--|------------------------|-------|-------|
| | | <i>Inclined Part</i> | 12.38 | 12.20 |
| | | | 12.01 | |
| D | | <i>Horizontal Part</i> | 19.66 | 19.47 |
| | | | 19.27 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 12.54 | 12.10 |
| | | | 11.66 | |
| F | | <i>Horizontal Part</i> | 19.24 | 19.25 |
| | | | 19.25 | |

جدول ۴-۷- نتایج ضخامت سنجی سپر و فندریایل در ترازهای مختلف از موقعیت چهارم

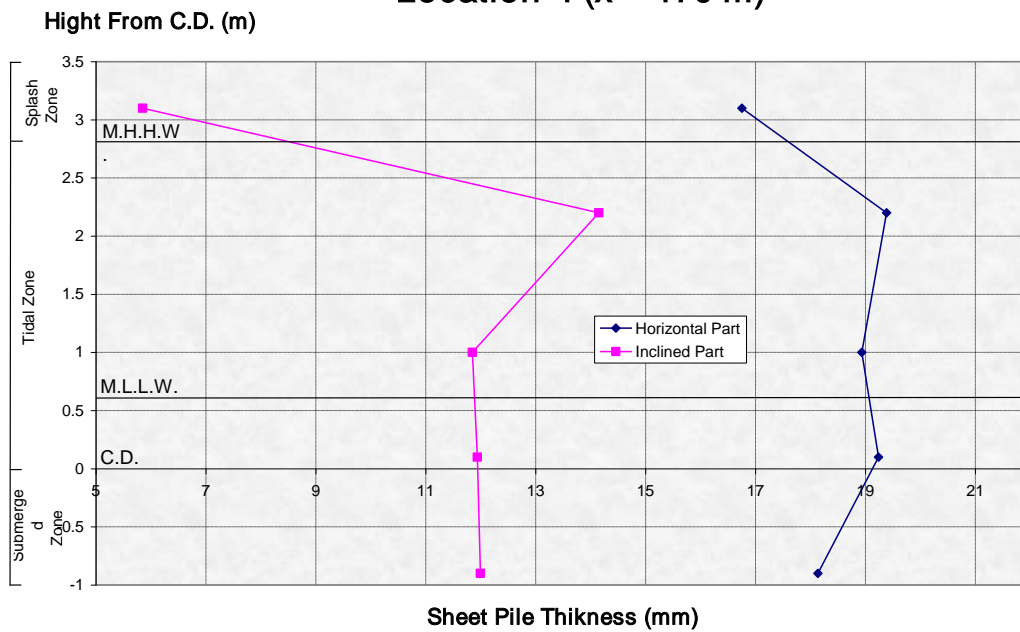
| <i>Location Number</i> | <i>Point</i> | <i>Part</i> | <i>Thickness Value (mm)</i> | <i>Average Thickness (mm)</i> |
|---------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Location 4 (X = 170 m) | A | <i>Horizontal Part</i> | 16.90 | 16.76 |
| | | | 16.61 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 6.38 | 5.85 |
| | | | 5.32 | |
| | B | <i>Horizontal Part</i> | 19.22 | 19.39 |
| | | | 19.55 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 14.03 | 14.15 |
| | | | 14.27 | |
| | C | <i>Horizontal Part</i> | 18.55 | 18.94 |
| | | | 19.32 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 11.40 | 11.85 |
| | | | 12.30 | |
| | D | <i>Horizontal Part</i> | 19.17 | 19.24 |
| | | | 19.91 | |
| | | <i>Inclined Part</i> | 11.63 | 11.94 |
| | | | 12.25 | |
| E | <i>Horizontal Part</i> | 18.13 | 18.14 | |
| | | 18.14 | | |
| | <i>Inclined Part</i> | 11.88 | 12.00 | |
| | | 12.11 | | |

Location-3 (x = 130 m)



شکل ۴-۶- دیاگرام ضخامت سپر در ترازهای مختلف از موقعیت سوم (در فاصله ۱۳۰ متری از لبه غربی اسکله)

Location-4 (x = 170 m)



شکل ۴-۷- دیاگرام ضخامت سپر در ترازهای مختلف از موقعیت چهارم (در فاصله ۱۷۰ متری از لبه غربی اسکله)

۴-۷- مشخصات ژئوتکنیکی

تنها مطالعات ژئوتکنیک انجام گرفته در محل، که گزارش و نتایج آن در دسترس می‌باشد، گزارش مطالعات ژئوتکنیک انجام گرفته توسط FUGRO-CESCO در سال ۱۹۷۶ می‌باشد. دو گمانه به عمق‌های ۲۵ و ۲۰ متری در محل اسکله‌ها حفر و چند آزمایش برش و تحکیم بر روی نمونه‌های خاک اخذ شده از گمانه‌ها، انجام شده است. طبق گزارش و نقشه‌ها، گمانه ۲۰ متری دقیقاً در محلی که سپری جدید اجرا خواهد شد، حفر شده است.

لایه بندی خاک بدین صورت گزارش شده است که یک لایه ۱ متری خاک سست و سطحی بر روی یک لایه خاک ماسه‌ای سیمانته شده به ضخامت حدود ۶ متر قرار دارد. طبق آزمایش‌های تک محوری و سایر اطلاعات موجود از زمان اجرا، این لایه بسیار سخت و مقاوم می‌باشد که البته در زمان اجرا این لایه به طور کامل حفاری و لایروبی شده است. در زیر لایه ماسه‌ای تا عمق ۲۵ متری یک لایه رسی «سفت» با درصد بالای ماسه و سیلت وجود دارد. طبق آزمایش‌های تحکیم، این مصالح دارای پیش‌تحکیم یافتگی قابل توجهی می‌باشند. بر اساس نتایج آزمایش‌های برش سه محوری زهکشی نشده (CU)، مقدار زاویه اصطکاک داخلی مصالح برابر $\phi = 38^\circ \sim 39^\circ$ و چسبندگی آن برابر $c = 100 \sim 110 \text{ kPa}$ گزارش شده است. دانسیته خاک نیز در حالت اشباع $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$ می‌باشد.

با توجه به جنس خاک محل از نوع رس سفت دارای مقدار زیادی سیلت و رس، ظهور زاویه اصطکاک داخلی بالا به همراه چسبندگی زیاد، تا حدود زیادی متناقض می‌نماید. از آنجا که در حال حاضر مطالعاتی انجام نگرفته است و مشاهدات میدانی نیز در این زمینه امکان پذیر نمی‌باشد، لذا در جهت اطمینان از چسبندگی خاک صرف‌نظر و مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز با توجه به دانه‌بندی و تراکم آن برابر $\phi = 37^\circ$ اتخاذ شد.

اطلاع دقیقی از مشخصات ژئوتکنیکی مصالح خاکریزی شده در پشت سپر وجود ندارد و صرفاً در نقشه‌های موجود به "QUARRY RUN 0-100 kg" و "Sand fill" اشاره شده است. لذا پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح خاکریزی شده در پشت سپری‌ها نیز بر اساس تجربه و در جهت اطمینان انتخاب شدند.

پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح که در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، در جدول (۳-۱) خلاصه شده است.

جدول ۳-۱: پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح پی و خاکریز پشت سپرها

| نسبت پواسون (ν) | مدول الاستیسیته (E_s) | چسبندگی زهکشی نشده (c_u) | چسبندگی موثر (c) | زوايه اصطکاک داخلی (ϕ) | دانسیتة (kN/m^3) | | مصالح |
|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------|-------|----------------|
| | (kN/m^2) | (kN/m^2) | (kN/m^2) | (deg) | اشباع | مرطوب | |
| ۰/۳۵ | ۱۵۰۰۰ | - | ۰/۰ | ۳۵ | ۱۸ | ۱۸ | خاکریز پشت سپر |
| ۰/۴ | ۵۰۰۰۰ | ۸۰ | ۰/۰ | ۳۷ | ۲۰ | ۲۰ | پی |

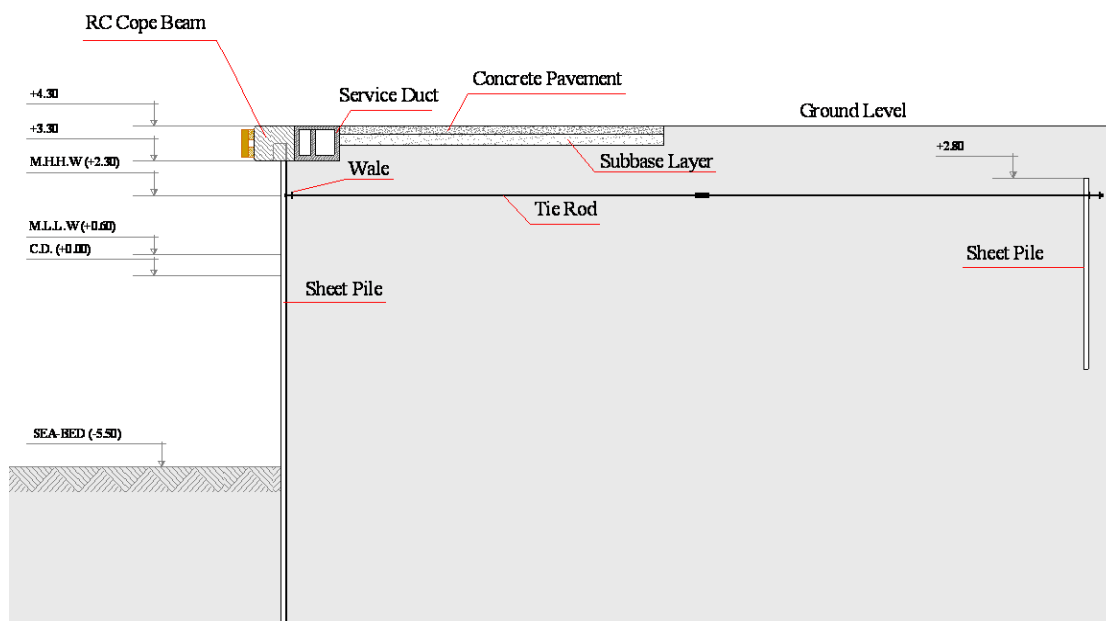
فصل پنجم: تحلیل عددی سیستم ترکیبی سپرها

۵-۸- مقدمه

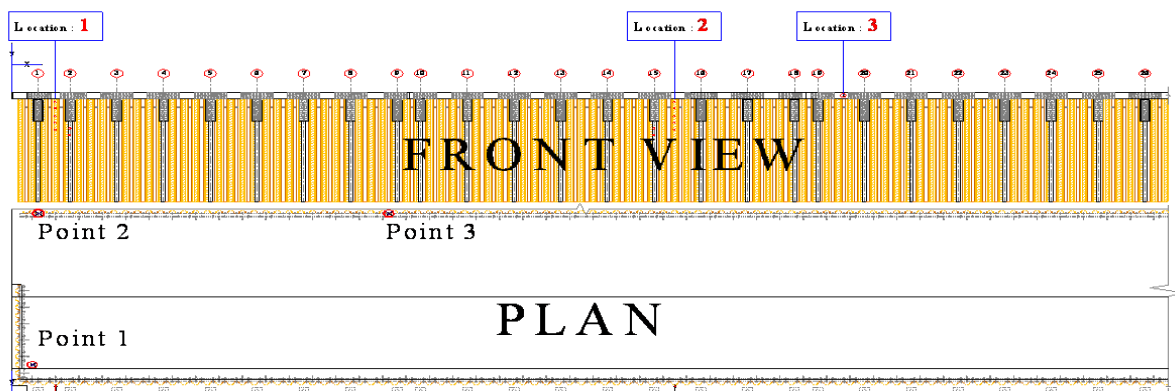
مدل سازی سیستم در این فصل و با توجه به مطالب گفته شده در فصل چهارم انجام می گیرد. در این قسمت مدل های مختلفی از سیستم تلفیقی خاک و سازه ساخته می شود. سعی بر آن است که محاسبات به صورت گام به گام انجام شده و شرایط ایجاد شده برای سیستم مرحله به مرحله مدل سازی گردد.

۵-۹- بررسی مدل اولیه

همان طور که در فصل پیش ذکر شد، سازه مورد بررسی، در محیط دریایی بندر لنگه قرار گرفته است. اجزای تشکیل دهنده سازه اسکله بندر لنگه - که در فصل ۴ نیز به آنها اشاره شد- به صورت شماتیک در شکل (۱-۵) دیده می شود. در شکل (۲-۵) نیز پلان موقعیت قرار گیری مهارها نسبت به یکدیگر در بخشی از اسکله به چشم می خورد.



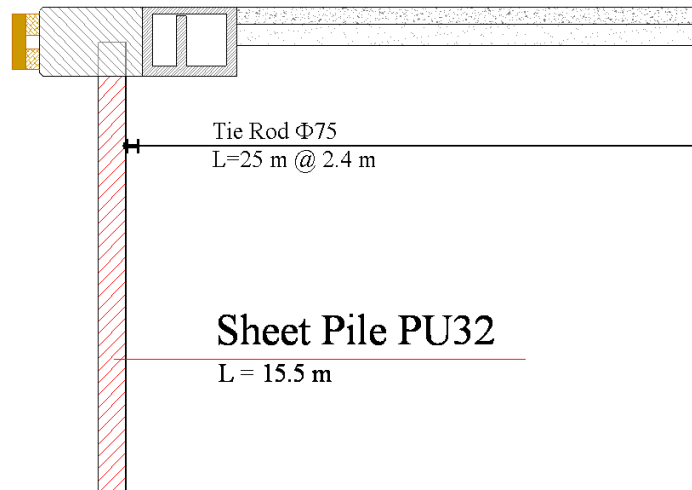
شکل ۱-۵- شماتیک اجزای تشکیل دهنده اسکله بندر لنگه



شکل ۲-۵- پلان موقعیت قرار گیری مهارها در بخشی از اسکله

همان طور که در شکل ها دیده می شود سیستم کلی، تلفیقی از خاک و سازه می باشد که در یک محیط دریایی واقع شده اند. به این ترتیب که ابتدا در یک توده خاک، سپری فولادی با نیمرخ $PU32$ کوبیده شده و نقش یک دیوار نگهدارنده را ایفا می کند. این سپر با استفاده از میل مهارهایی که با فاصله $2/4$ متر از یکدیگر قرار گرفته اند، در خاک نگه داشته شده است که این مهارها نیز توسط یک ردیف سپر دیگر به فاصله 25 متر از سپرهای اصلی در خاک ثابت شده اند.

در فصل قبل درباره آسیب ها و شرایط موجود در سازه سپری بندر لنگه توضیحات مختصری بیان گردید. مشخص گردید که سازه در قسمت های جزر و مدی دچار خوردگی شدیدی شده است. این خوردگی ها بیشترین تأثیر را در نواحی پاشش آب - که محل اتصال مهار به سپر (شکل (۵-۳)) در آن واقع شده است - می گذارند. بر اثر این خوردگی ها به تدریج اتصال میان مهار و سپر از بین می رود. مهار نوعی تکیه گاه به شمار می رود و هدف از قرار دادن آن در سیستم، جلوگیری از تغییر شکل های بالای سپر و کمک به آن جهت مقاومت در برابر فشار محرک خاک می باشد. بنابراین با کاهش تدریجی اتصال مهار با سپر، نیروی کششی ایجاد شده در مهار آزاد می گردد و دیگر مهار به صورت یک تکیه گاه عمل نخواهد کرد. با قطع کامل اتصال مهار و سپر، دیوار سپر تبدیل به یک تیر طره با تکیه گاهی در پایین خواهد شد. با کاهش یکی از درجات آزادی سپر، انعطاف پذیری آن افزایش می یابد و نیروهای وارده از طرف آب و خاک ایجاد تغییر شکل های بزرگی در آن می کنند و ایمنی سیستم را با مشکل رو به رو می سازند.



شکل ۵-۳- سپر و مهار

برای مدل سازی سازه سپری باید علاوه بر مشخصات هندسی اعضا که در شکل (۱-۵) دیده می شود، خصوصیات اجزای سازنده اسکله (در حال ساده شده خاک پی و خاکریز، سپر و میل مهار) را داشته باشیم. این خصوصیات در زیر آمده اند:

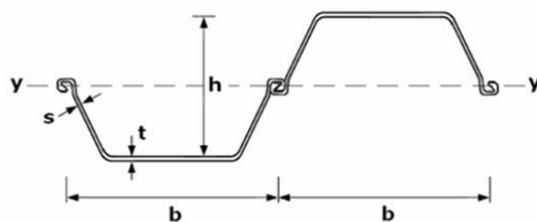
۵-۲-۱- خصوصیات مصالح:

۱- خصوصیات خاک

جدول ۵-۱- خصوصیات خاک ها

| خاک | γ_d | γ_{wet} | k_x | k_y | E | ν | c | φ | Interface |
|------------|------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-----|-----------|-----------|
| Backfill | 17 | 17 | 1.0 | 1.0 | 1.5E4 | 0.35 | 1.0 | 35 | 0.67 |
| Foundation | 18 | 18 | 1.0 | 1.0 | 5E4 | 0.4 | 1.0 | 37 | 0.67 |

۲- خصوصیات سپر:



| Section | Width Height | | Thickness | | Sectional area cm ² /m | Mass | | Moment of inertia cm ⁴ /m | Elastic section modulus cm ³ /m | Static moment cm ³ /m | Plastic section modulus cm ³ /m | Class* |
|---------|--------------|---------|-----------|---------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------|---|---|-------------------------------------|---|-------------|
| | b mm | h mm | t mm | s mm | | kg/m of single pile | kg/m ² of wall | | | | | |
| PU 32 | 600 | 452 | 19.5 | 11.0 | 242 | 114.1 | 190 | 72320 | 3200 | 1825 | 3687 | 2 2 2 2 2 2 |

شکل ۵-۴- خصوصیات مقطع سپر

مدول الاستیسیته: $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

مقاومت تسلیم: 3600 kg/cm^2

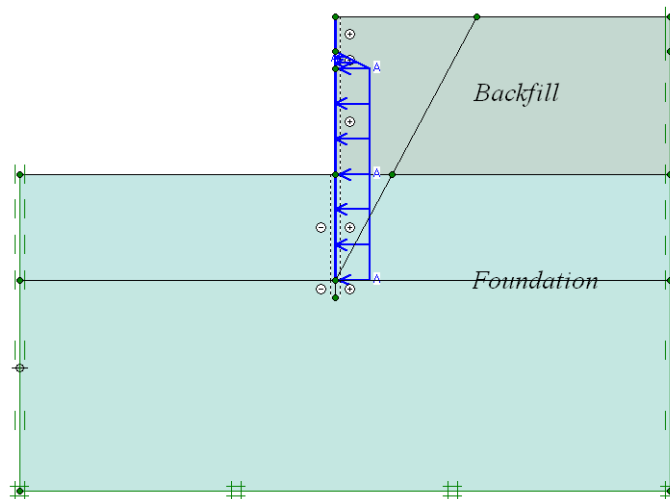
۳- خصوصیات میل مهار

قطر میل مهار: 75 mm

مدول الاستیسیته و مقاومت تسلیم میل مهارها مشابه سپر می باشد.

۵-۳- مدل ۱- مدل سازی سپر اولیه بدون میل مهار

تصویر سیستم خاک و سازه در شکل (۵-۵) دیده می شود. این حالت در ابتدای ساخت سپر به وجود می آید؛ در زمانی که نمی دانیم آیا سپر به تنهایی قادر به تحمل بارها می باشد یا باید از میل مهار هم استفاده شود. بنابراین مدل اولیه را با سپر فولادی اولیه با مقطع PU32 و بدون میل مهار می سازیم تا عملکرد آن بدون میل مهار را بررسی نماییم.



شکل ۵-۵- مدل ساده بدون مهار

محدوده مورد مطالعه تا جایی در مدل گسترش یافته است که تأثیر بارهای وارده بر مرزها ناچیز و قابل صرفنظر باشد و فرض جابجایی صفر برای مرزها منطقی باشد. سپس شرایط گیرداری برای مرزها تعریف می گردد.

ارتفاع کلی سپر ۱۵ متر و عمق نفوذ آن در خاک پی ۶ متر است و مقطع سپر نیز از نوع U شکل با نیمرخ PU32 می باشد. برای نگه داشتن سپرها از میل مهارهایی به قطر ۷۵ میلیمتر که به فاصله ۲/۴ متر از هم قرار گرفته اند، استفاده شده است. این میل مهارها در ارتفاع 1.5m از بالای سپر قرار می گیرند. برای رفتار سپر و مهار، مدل الاستیک در نظر گرفته شده است و پس از انجام تحلیل، فرض الاستیک بودن رفتار تیر و مهار کنترل می گردد. دو نوع خاک برای سیستم در نظر گرفته شده است: پی و خاکریز (در شکل (۵-۵) به ترتیب به صورت Backfill و Foundation نشان داده شده است). مدل مورد استفاده برای هر دو خاک، مدل موهر- کولمب است. خصوصیات این خاک ها در جدول (۱-۵) آمده است.

همان طور که در فصل سوم اشاره شد، می توان اندرکنش بین خاک و سازه را با استفاده از ابزار فصل مشترک مدل سازی نمود. به این ترتیب که در نقاطی که خاک در تماس با سپر است، فصل مشترکی رسم کرده و خصوصیات مقاومتی را برای آن تعریف نمود. با این حال در برخی شرایط لازم

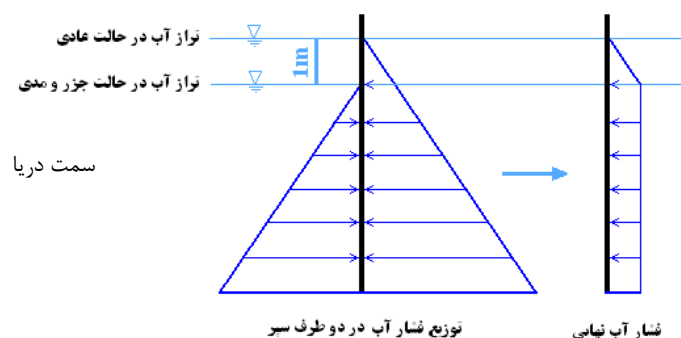
است المان های فصل مشترک برای نقاطی از خاک که در تماس با سازه نیستند نیز تعریف شود. برای مثال گوشه های سازه های سخت و نیز تغییر ناگهانی در شرایط مرزی ممکن است منجر به تغییرات زیاد در تنش ها و کرنش ها گردد. المان های گوشه ای قادر به بازتولید این مقادیر نیستند و در نتیجه تولید نوسان های غیر فیزیکی تنش خواهند نمود. این مشکل با استفاده از المان های گسترش یافته فصل مشترک قابل حل است. بنابراین در این مدل فصول مشترک اطراف سپر در زیر آن امتداد می یابند. خصوصیات فصل مشترک در این ناحیه با لایه بالایی خاک که سپر در آن کوبیده می شود، متفاوت است. با این حال دو لایه خاک مزبور دارای خصوصیات مکانیکی مشابهی هستند. از آنجا که خاک مورد استفاده برای پی از نوع ماسه ای می باشد و همان طور که در فصل ۳ نیز ذکر گردید، برای ضریب کاهنده مقاومت فصل مشترک از عدد $0/67$ استفاده می شود. به فصل مشترک گسترش یافته در زیر سپر نیز مطابق توضیحات فصل قبل گزینه Rigid نسبت داده می شود.

پس از تعریف هندسه مدل و خصوصیات خاک و اعضای سازه ای، لازم است که مدل جهت تحلیل به المان هایی تقسیم شود. گسسته سازی در نرم افزار PLAXIS به طور خودکار انجام می شود. تنها لازم است ابعاد مورد نظر برای شبکه به نرم افزار داده شود. در اینجا از گزینه ابعاد متوسط استفاده می شود. سپس در نقاطی که مشاهده نتایج در آنها ضروری است، گسسته سازی با گزینه اصلاح انجام می گیرد. این نقاط در این مدل در نزدیکی فصل مشترک خاک و سازه (هم در محل سپر و هم در فصل مشترک گسترش یافته) و نیز در داخل گوه گسیختگی هستند.

۵-۳-۱- بارگذاری

سازه های ساخته شده در محیط های دریایی باید در هنگام تحلیل و طراحی از نظر شرایط جزر و مدی دریا مورد بررسی قرار گیرند. جزر و مد باعث می شود که تراز سطح آب در دو سمت سازه های دریایی متفاوت شود و ایجاد تنش های اضافی کند. در حالت مد که آب در سمت دریا بالا می رود، ارتفاع آب در سمت دریا بالاتر از ارتفاع آن در سمت خاک (در اینجا پشت سپر) است. اختلاف فشار آب ایجاد شده - به علت اختلاف ارتفاع - در خلاف جهت نیروهای محرک خاک پشت سپر است و به پایداری سیستم کمک می کند. در هنگام جزر، آب در

سمت دریا پایین می رود، اما در سمت خاک فرصت نمی یابد تا به همان سرعت از لابلای ذرات خاک به سمت پایین حرکت کند و ارتفاع خود را به ارتفاع آب در سمت دیگر سپر برساند. به همین دلیل اختلافی بین تراز آب در دو سمت سپر به وجود می آید. این اختلاف تراز که در بدترین شرایط به 1m می رسد، باعث ایجاد اختلاف فشار در دو سمت سپر می گردد (شکل ۵-۶).



شکل ۵-۶- توزیع فشار آب در حالت بحرانی جزری

همان طور که مشاهده می شود اختلاف فشار ایجاد شده هم جهت با نیروهای محرک خاک است و باعث می شود که تنش های وارده بر روی سپر بیشتر شود (به افزایش لنگر واژگونی کمک می کند).

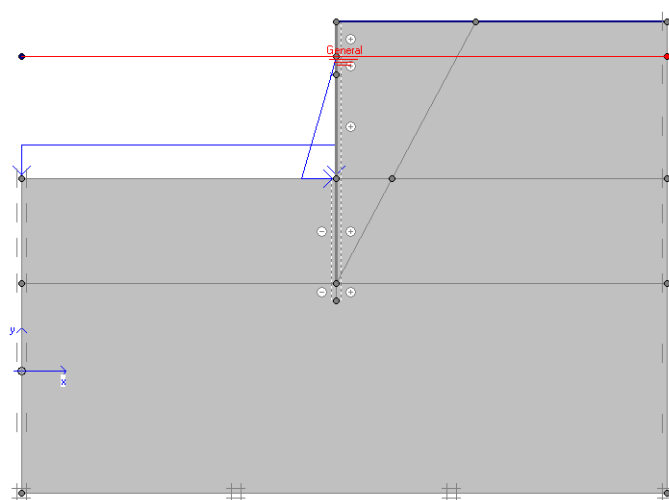
در هنگام مدل سازی لازم است این اختلاف فشار به برنامه معرفی شود. می توان در دو سمت سپر دو تراز مختلف برای آب معرفی نمود. با این حال PLAXIS در هنگام محاسبه فشارهای آب، میانگین این دو تراز را در نظر می گیرد و عملاً اختلاف فشاری ایجاد نمی نماید. به همین دلیل معرفی سطح تراز متفاوت در دو سمت سپر، راه حل مناسبی به نظر نمی رسد. به جای آن می توان اختلاف فشار ایجاد شده را به صورت یک نیروی گسترده بر روی سپر اعمال نمود. در این هنگام معرفی تراز آب یکسان در دو سمت سپر نیز منطقی نیست؛ زیرا فشارهای ناشی از آب یک بار توسط اختلاف فشار یاد شده به سپر اعمال شده اند. بنابراین به نظر می رسد بهترین روش آن باشد که یک بار تراز آب در حالت عادی (نه جزر و مدی) برای برنامه تعریف شود و تنش ها و

تغییر مکان های حاصله محاسبه گردند و یک بار نیز فشار آب توسط یک بار گسترده به سیستم معرفی گردد و سپس بین نتایج به دست آمده از این دو حالت، جهت یافتن شرایط بحرانی تر مقایسه ای انجام شود. هر یک از این دو روش که جواب های بحرانی تری به دست دهند، برای تحلیل های بعدی مورد استفاده قرار می گیرند.

۵-۳-۱-۱- روش های مدل سازی فشار آب در حالت جزر و مدی

الف- روش اول: معرفی تراز سطح آب

پس از مشخص بندی مدل باید برای معرفی تراز آب، وارد مود شرایط آب شد. تراز آب در این مدل در فاصله ۲ متر از بالای سپر قرار دارد (شکل (۷-۵)). پس از رسم تراز آب باید فشارهای آب را تولید نمود. سپس باید وارد مود شرایط اولیه شده و تنش های اولیه (در حال سکون) را تولید کرد. مدل سازی در اینجا به پایان رسیده و می توان تحلیل را انجام داد.



شکل ۷-۵- مدل سازی تراز سطح آب

ب- روش دوم

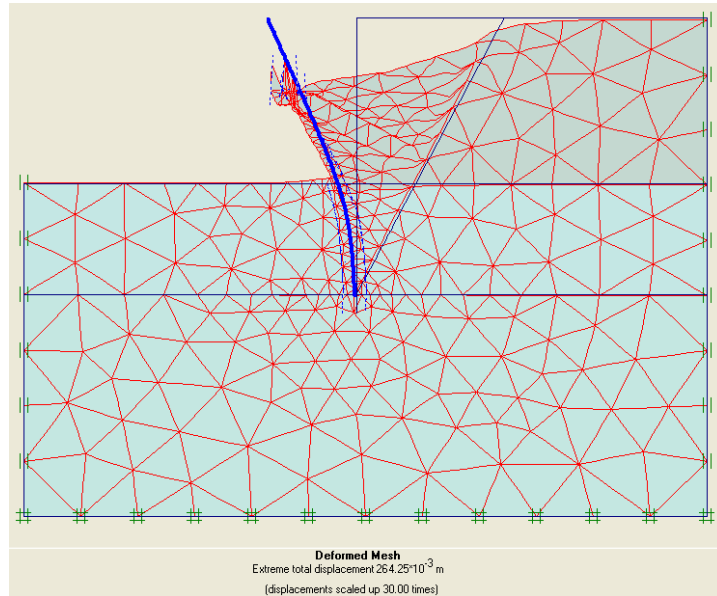
در این حالت بارگذاری نهایی فشار آب به صورت یک بارگذاری استاتیکی در سیستم بارگذاری A - که قبلاً به آن اشاره شد- به سپر اعمال می گردد. عموماً در هنگام تعیین میزان بار در PLAXIS به بار عدد 1kN/m^2 نسبت داده می شود و سپس مقدار واقعی بار در هنگام تحلیل و در صفحه محاسبات به صورت ضریب بار معرفی می گردد. بدین ترتیب PLAXIS میزان بار را از صفر شروع کرده و تا مقدار کامل ضریب (در اینجا ۱۰ که معادل است با $10 \times 1\text{kN/m}^2$) افزایش می دهد و شرایط بارگذاری تدریجی را فراهم می سازد تا بار یکباره و به طور ناگهانی به سپر اعمال نشود.

پس از معرفی بار بر روی سپر، عمل مش بندی صورت می گیرد و با وارد شدن به مد شرایط اولیه و تولید تنش های اولیه، مدل سازی به پایان می رسد و می توان کار تحلیل را آغاز نمود.

۵-۳-۱-۲- نتایج حاصل از تحلیل

الف- روش اول: معرفی تراز سطح آب

نتایج به دست آمده از این روش نشان می دهند که سیستم در برابر نیروهای وارده دچار شکست شده است. فشار محرک خاک، ایجاد یک بار گسترده روی سپر می کند که لنگرهای بزرگی در سیستم به وجود می آورد. این لنگرها تغییر مکان های بزرگی را در سیستم سبب می شوند. همان طور که در شکل (۵-۸) نیز دیده می شود، تغییر مکان های ایجاد شده در خاک و سپر مقادیر بالایی هستند. تغییر شکل ایجاد شده در سپر - که تقریباً مشابه تغییر شکل ایجاد شده در یک تیر طره ای است- منطقی به نظر می رسد زیرا سپر تنها در قسمت پایین دارای تکیه گاه می باشد.

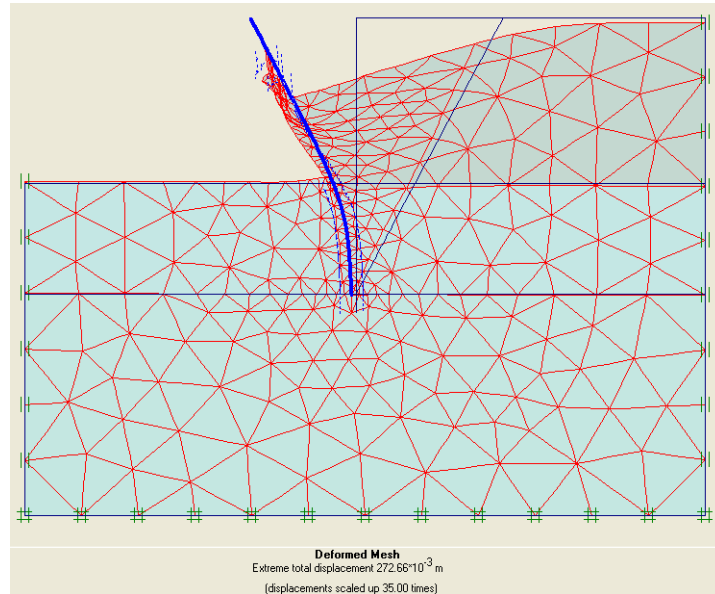


شکل ۵-۸- تغییر شکل سیستم ناشی از بارگذاری در روش اول

حداکثر تنش برشی متوسط برابر با 223.77 kN/m^2 می باشد.

ب- روش دوم: اعمال بار گسترده به سپر

نتایج به دست آمده از این روش نیز نشان می دهند که در این حالت هم سیستم جوابگوی نیروهای وارده نمی باشد. در این حالت پیش از آن که PLAXIS شروع به افزایش بار از مقدار صفر نماید، سیستم دچار شکست می شود. می توان چنین نتیجه گیری کرد که شکست سیستم پیش از اعمال بار افقی (فشار آب) اتفاق افتاده و نیروهای ناشی از فشار خاک به تنهایی برای ایجاد ناپایداری در سیستم کافی بوده است. بنابراین در صورتی که بار افقی نیز به سیستم وارد شده و نرم افزار کار تحلیل را ادامه دهد، تغییر شکل های سیستم مقادیر بسیار بالاتری به خود خواهند گرفت. شکل تغییر شکل یافته سیستم در زیر آمده است. در این حالت حداکثر تنش برشی متوسط برابر با 267.53 kN/m^2 می باشد که در مقایسه با حالت قبل عدد بزرگتری است.



شکل ۵-۹- تغییر شکل سیستم ناشی از بارگذاری در روش دوم

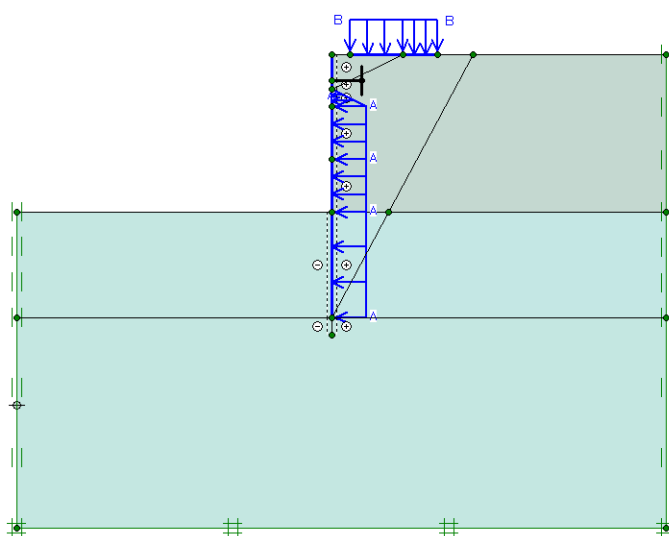
همان طور که از نتایج هر دو روش بر می آید، نتایج حالت دوم که در آن بار آب به صورت اختلاف فشار به سپر اعمال می شود، نتایج بحرانی تری را به دست می دهد. دلیل این امر نیز آن است که با معرفی تراز آب به مدل، PLAXIS برای محاسبه فشارهای محرک خاک (حاصلضرب وزن مخصوص در K_a) در قسمت های اشباع از وزن مخصوص غوطه وری (γ') که از وزن مخصوص طبیعی و اشباع خاک کوچک تر است، استفاده می کند. لذا بارهای وارده به سیستم بارهای کوچک تری می باشند. از طرف دیگر فشارهای ناشی از آب در هر دو سمت دیوار با هم برابر بوده و یکدیگر را خنثی می کنند. این مسئله باعث می شود که تنش ها و تغییر شکل های ایجاد شده در خاک مقادیر کمتری به خود بگیرند. به همین دلیل از این پس در تحلیل ها از روش دوم (اعمال اختلاف فشار آب در حالت جزر و مدی در سیستم بارگذاری A) استفاده می گردد.

نتایج به دست آمده در هر دو روش، فرض ضرورت وجود مهار برای پایداری سیستم را تأیید می کنند زیرا همان طور که از تغییر شکل های بالای سیستم بر می آید، برای کنترل و کاهش آنها نیاز به یک تکیه گاه دیگر می باشد.

۵-۴- مدل ۲- سپر اولیه با میل مهار

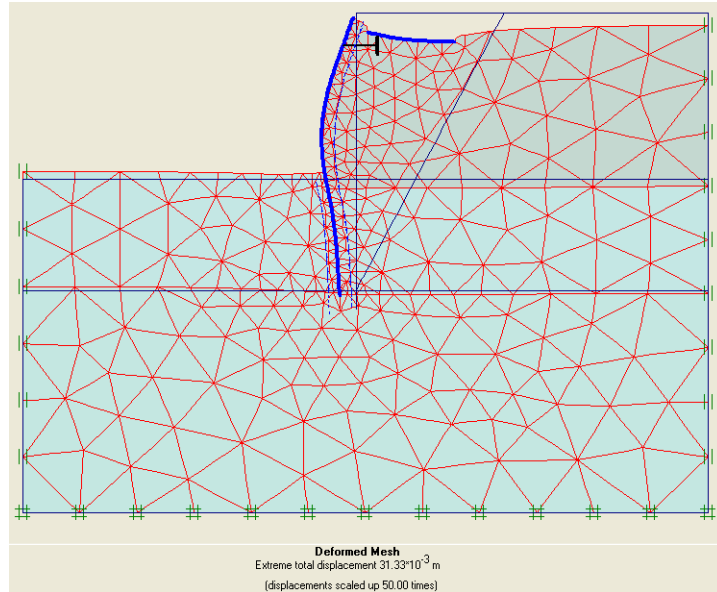
حال که مسلم شد سیستم بدون مهار نمی تواند بارهای وارده را تحمل کند و برای جلوگیری از تغییر مکان های بالا نیاز به یک تکیه گاه دیگر می باشد، مدل بعدی را با این فرض می سازیم که یک سیستم مهاری - که فاصله مهارها در آن ۲/۴ متر است - به بقیه اجزا اضافه شده است. در این حالت بار سرویس 5 t/m^2 نیز به سیستم اعمال می شود. برای وارد کردن بار سرویس به خاک پشت سپر از یک پی با سختی بالا و بدون وزن استفاده می شود.

فرض می شود که میلگرد، اتصال کاملی با سپر دارد. هدف از این مدل سازی بررسی شرایط اولیه سیستم است؛ شرایطی که در آن هنوز مدت زیادی از کوبیدن سپرها نگذشته و هیچگونه خوردگی در محل اتصال سپر با مهار ایجاد نشده است. تصویر سیستم خاک و سازه در شکل زیر دیده می شود.



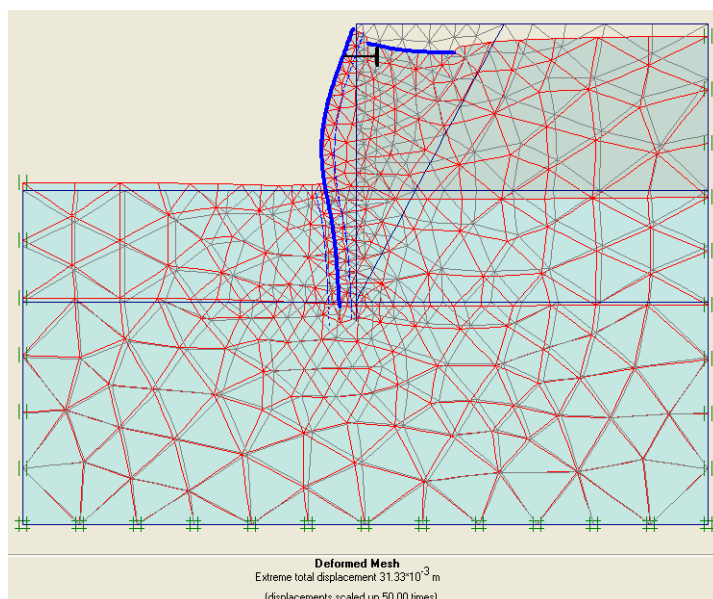
شکل ۵-۱۰- تصویر کلی سیستم به همراه مهار

نتایج به دست آمده از این روش نشان می دهند که در این حالت سیستم جوابگوی نیروهای وارده می باشد. شکل تغییر شکل یافته مدل در زیر آمده است.



شکل ۵-۱۱- شکل تغییر شکل یافته سیستم

همان طور که دیده می شود، سیستم تغییر شکل اندکی داده است و در برابر نیروهای وارده به خوبی مقاومت می کند. تغییر شکل سپر در این حالت مشابه تغییر شکل یک تیر با دو تکیه گاه است که یک بار گسترده بر روی آن قرار دارد و لنگر حداکثر و نیز تغییر مکان حداکثر در نزدیکی وسط آن اتفاق می افتد. در این حالت چون سختی سیستم به واسطه وجود مهارها افزایش یافته، تغییر مکان ها مقادیر کوچکتری به خود گرفته اند. برای آن که ببینیم گیردار معرفی کردن مرزها فرض درستی بوده است یا خیر، تغییر شکل سیستم را این بار در کنار شکل تغییر شکل نیافته آن بررسی می کنیم (شکل (۵-۱۱)).



شکل ۵-۱۱- المان های تغییر شکل یافته در کنار المان های تغییر شکل نیافته

خطوط مش بندی سبز رنگ مربوط به حالت اولیه و خطوط مش بندی قرمز رنگ مربوط به حالت تغییر شکل یافته هستند. در شکل دیده می شود که المان های نزدیک به مرز و دور از سطح بالایی خاک، تغییر شکلی تقریباً برابر با صفر دارند و بارهای وارده به سیستم تنها بر المان های نزدیک به سطح اثر می گذارد و فرض گیردار بودن مرزها با دقت خوبی قابل قبول است.

۵-۵- مدل ۳- بررسی اثر خوردگی با گذشت زمان و روش های مدل کردن خوردگی

خوردگی در محیط های دریایی امری کاملاً معمول است. این خوردگی ها همان طور که در فصل چهارم نیز به آن اشاره شد، غالباً بر اثر شرایط جوی و رژیم های جزر و مدی دریا پدید می آیند. قرار گرفتن سپر فولادی در

آب شرایط لازم برای انجام واکنش های شیمیایی خوردگی را فراهم می سازد. این خوردگی ها گاه بسیار شدید هستند. نمونه ای از این نوع خوردگی در شکل زیر دیده می شود^۱.



شکل ۵-۱۲- خوردگی کامل سپر در بعضی از نواحی پاشش آب

همان طور که قبلاً نیز گفته شد با افزایش میزان خوردگی، به تدریج اتصال میان مهار و سپر از بین می رود. می توان این مطلب را با کاهش سطح مقطع میل مهارها و یا افزایش فاصله بین آنها مدل سازی نمود که این دو حالت معادل هم هستند. روش مورد استفاده در اینجا، کاهش سطح مقطع میل مهار می باشد. هدف از انجام این مدل سازی ها آن است که ببینیم پس از چند سال از شروع فرایند خوردگی، این فرایند تا چه حد ایمنی سازه را با مشکل مواجه می سازد. به عبارت دیگر حداکثر مقدار مجاز خوردگی در محل اتصال مهار و سپر که ایمنی سازه را تهدید نمی کند، چه اندازه است. در این قسمت سطح مقطع های کاهش یافته مختلفی (به دلیل وجود خوردگی در محل اتصال مهار و سپر) به مهارها اعمال می گردد تا مشخص گردد حداکثر درصد مجاز کاهش سطح مقطع مهار چه اندازه است. برای این منظور در هر مدل سطح مقطعی به مهار نسبت می دهیم و در صورتی که با این مقدار سیستم قادر به تحمل بارها بود، در مرحله بعد سطح مقطع را باز هم کمتر می کنیم. این

^۱ برای اطلاعات بیشتر در زمینه خوردگی در محیط های دریایی به ضمیمه ۳ مراجعه شود.

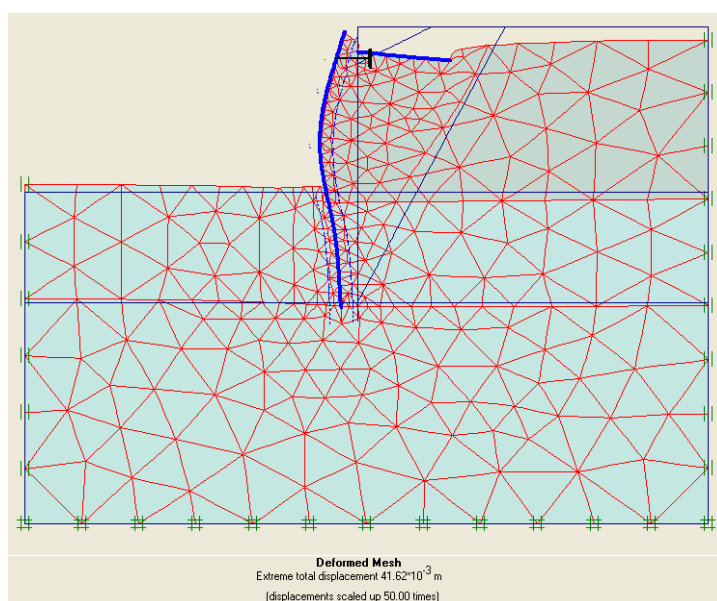
کار را تا جایی انجام می دهیم که سیستم دچار شکست شود. به این ترتیب کوچکترین مقدار سطح مقطع (بیشترین مقدار خوردگی) که پس از آن سیستم دیگر پایداری خود را حفظ نمی نماید، به دست می آید. این مقدار، مقدار بحرانی سطح مهارها (مقدار بحرانی خوردگی) می باشد.

۵-۵-۱- کاهش سطح مقطع مهار تا ۵۰٪ (سطح مقطعی برابر یک دوم سطح مقطع اولیه

مهار)

هندس مدل و خصوصیات مورد استفاده در این حالت دقیقاً مشابه مدل سپر با میل مهار است. تنها تفاوت در مختصه مساحت میل مهار می باشد که در این حالت نصف حالت قبل است.

نتایج حاصل از تحلیل در اشکال (۵-۱۳) و (۵-۱۴) و نیز جدول (۵-۲) آمده است. این نتایج نشان می دهند که کاهش ۵۰ درصدی مساحت مهارها، پایداری سیستم را با مشکلی مواجه نمی سازد و سازه قادر به تحمل بارهای وارده می باشد. این مطلب را می توان این گونه تعبیر کرد که نیروی محوری ایجاد شده در مهار از نصف ظرفیت آن در حالت مهار با مساحت کامل (خورده نشده) کمتر است. بنابراین وقتی سطح مقطع مهار به نصف کاهش می یابد باز هم قادر به تحمل نیروهای وارده می باشد. این مطلب در ادامه کنترل می گردد.



شکل ۵-۱۳- تغییر شکل سیستم- کاهش سطح مقطع مهار تا ۵۰٪



شکل ۵-۱۴- نمودار نیروی برشی و لنگر خمشی- تغییر شکل سیستم- کاهش سطح مقطع مهار تا ۵۰٪

جدول ۵-۲- نتایج حاصل از تحلیل- کاهش سطح مقطع مهار تا ۵۰٪

| | | | |
|--------------------------------------|-------|--------------------------|---------------------------|
| نیروی ایجاد شده به نیروی مجاز (%) | | 40.49mm | حداکثر تغییر مکان سپر |
| | | 401.55 kN/m ² | حداکثر تنش برشی متوسط خاک |
| | 4.8 | 167.03 kN/m | حداکثر نیروی برشی سپر |
| | 41.88 | 289.55 kNm/m | حداکثر لنگر خمشی سپر |
| | 35.01 | 167.10 kN/m | حداکثر نیروی مهار |

در شکل (۵-۱۳) حداکثر تغییر مکان سیستم برابر با 41.62mm ذکر شده است در حالی که مقدار حداکثر تغییر مکان در جدول (۵-۲) برابر با 40.49mm است. دلیل این امر نیز آن است که در کل سیستم حداکثر تغییر مکان در پی با سختی بالای تعریف شده برای بار سرویس اتفاق می افتد. اما با مشاهده تغییر شکل ها برای سپر مشاهده می شود که حداکثر مقدار آن مقداری کمتر از این پی بوده است.

نمودار نیروی برشی و لنگر خمشی سپر در شکل (۵-۱۴) دیده می شود. این نمودارها مشابه نمودارهای شکل (۲-۲-ب) در فصل دوم است. همان طور که در این شکل نیز دیده می شود، حداکثر مقدار لنگر در فاصله بین مهار و سطح زمین در سمت دریا اتفاق می افتد. خاک زیر سپر که سپر در آن کوبیده شده است، نوعی تکیه گاه جانبی برای سپر به شمار می رود. البته نمی توان از اصطلاح تکیه گاه - به همان معنایی که در دیگر سازه ها به کار می رود- برای سپرها استفاده کرد. تکیه گاه سپر در این حالت خاکی است که سپر را در خود نگه داشته است. این خاک در پایین ترین نقطه سپر قابلیت جابجا شدن را دارد و نیز همانند تکیه گاه مفصلی قادر به تحمل لنگر نیست. با این حال به خاطر آنکه اطراف سپر را احاطه کرده است، مانند تکیه گاه گیردار تغییر شکل سپر را کنترل می کند. همان طور که در شکل (۵-۱۳) نیز دیده می شود، شکل تغییر شکل یافته سپر در پایین آن دارای شیبی تقریباً برابر با صفر می باشد. در نمودار برش در شکل (۵-۱۴) نیز دیده می شود که در محل میل مهار، پرشی در نمودار ایجاد شده که نشان دهنده آن است که مهار مانند یک تکیه گاه میله ای عمل می کند و برش بالایی را در مقطع تحمل می کند.

برای این که بدانیم نیروهای ایجاد شده در مهار و سپر در محدوده الاستیک هستند یا نه در این قسمت به بررسی حداکثر مقادیر مجاز نیروهای آنها (ظرفیت سپر و مهار) می پردازیم. این مقادیر به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$F_y = 3600 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow F_b = 0.6F_y = 2160 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_v = 0.4F_y = 1440 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_N = 0.6F_y = 2160 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_{\max} = F_b \cdot S = 2160 \times 3200 = 690 \text{ kN.m/m}$$

$$V_{\max} = F_v \cdot A_{\text{Sheetpile}} = 1440 \times 242 = 3485 \text{ kN/m}$$

$$N_{\max} = F_N \cdot A_{\text{Anchor}} = 2160 \times (\pi/4 \times 7.5^2) = 954 \text{ kN/m} \quad (1-5)$$

در روابط بالا، S مدول مقطع سپر PU32 و $A_{\text{Sheetpile}}$ مساحت آن می باشد. در مدل بالا که از یک دوم مقطع

میل مهار استفاده می شود، مقدار مجاز نیروی محوری به یک دوم 954 kN/m یا 477 kN/m می رسد.

در جدول (۲-۵) مقایسه ای درصدی به صورت نسبت نیروی ایجاد شده و نیروی مجاز انجام گرفته است.

عدد قرار گرفته در ستون سوم جدول نشان دهنده درصدی از ظرفیت مقطع است که در تحمل بار نقش داشته

است. در صورتی که این درصد برابر با یک باشد به این معنی است که مقطع از تمام ظرفیت خود برای تحمل بار

استفاده نموده و اگر اندکی به نیروی ایجاد شده در مقطع اضافه گردد، مقطع از حالت الاستیک خارج می گردد.

همان طور که از جدول فوق مشاهده می گردد مقادیر مجاز (محاسبه شده در بالا) از مقادیر به دست آمده از

تحلیل بزرگ ترند و در نتیجه درصدهای به دست آمده با عدد یک (استفاده کامل از ظرفیت) فاصله زیادی دارند

و نشان دهنده این مطلب هستند که سپر و میل مهار در محدوده الاستیک قرار دارند و فرض رفتار الاستیک

برای آنها فرض درستی بوده است. علاوه بر آن نیروی ایجاد شده در مهار از نصف ظرفیت آن بسیار کمتر بوده و

تعبیر بالا - درباره مقاومت سیستم در حالت نصف سطح مقطع مهار - را توجیه می کند.

۵-۲-۵ - کاهش سطح مقطع مهار تا ۶۷٪ (سطح مقطعی برابر یک سوم سطح مقطع

اولیه مهار)

دیدیم که کاهش ۵۰ درصدی مساحت مهارها ایمنی سیستم را تهدید نمی کند. در این مدل مقدار کاهش

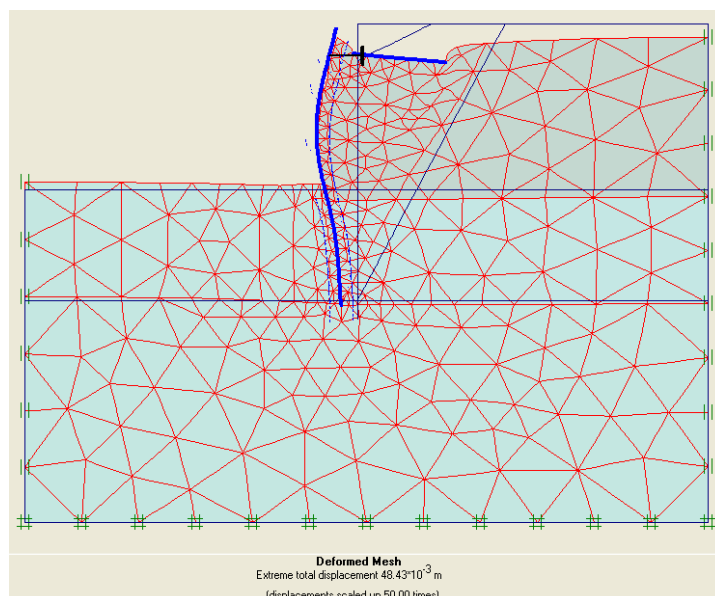
سطح مقطع را افزایش می دهیم. سیستم در این حالت نیز در برابر نیروهای وارده مقاومت می نماید. می توان

چنین نتیجه گیری کرد که کاهش ۶۷ درصدی سطح مقطع مهار از نظر تحمل نیرو اشکالی در سیستم ایجاد نمی کند. نتایج تحلیل در جدول زیر آمده است.

جدول ۵-۳- نتایج حاصل از تحلیل- کاهش مقطع مهار تا ۶۷٪

| | | | |
|-------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | | 44.16 mm | حداکثر تغییر مکان سپر |
| | | 401.64 kN/m ² | حداکثر تنش برشی متوسط خاک |
| | نیروی ایجاد شده به نیروی مجاز (٪) | 4.82 | 168.10 kN/m | حداکثر نیروی برشی سپر |
| 41.01 | | 283.44 kNm/m | حداکثر لنگر خمشی سپر |
| 23.42 | | 149.50 kN/m | حداکثر نیروی مهار |

مقادیر به دست آمده برای نیروها در جدول بالا در مقایسه با روابط (۵-۱) رضایت بخش هستند. شکل تغییر شکل یافته سیستم در شکل (۵-۱۵) دیده می شود.



شکل ۵-۱۵- تغییر شکل سیستم- کاهش مقطع مهار تا ۶۷٪

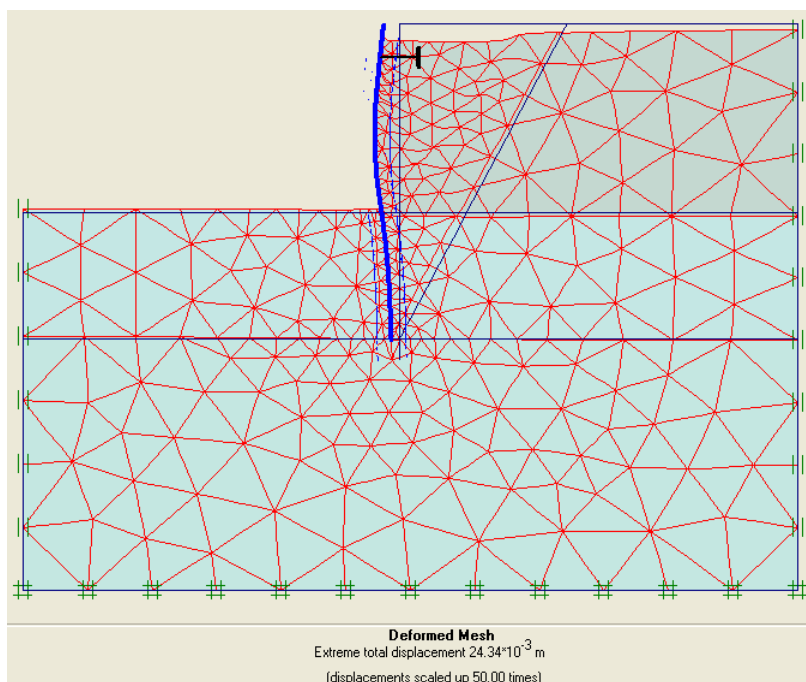
۵-۵-۳ - کاهش سطح مقطع مهار تا ۷۵٪ (سطح مقطعی برابر یک چهارم سطح مقطع

اولیه مهار)

در این حالت سیستم دچار شکست می شود. نتایج تحلیل در جدول (۴-۵) و شکل تغییر شکل یافته مدل در شکل (۱۶-۵) آمده است.

جدول ۴-۵ - نتایج حاصل از تحلیل - کاهش مقطع مهار تا ۷۵٪

| | | | |
|--------------------------------------|-------|-------------------------|---------------------------|
| | | 24.34 mm | حداکثر تغییر مکان سپر |
| | | 263.94kN/m ² | حداکثر تنش برشی متوسط خاک |
| نیروی ایجاد شده به نیروی مجاز (٪) | 2.67 | 92.65kN/m | حداکثر نیروی برشی سپر |
| | 21.04 | 145.17kNm/m | حداکثر لنگر خمشی سپر |
| | 26.48 | 67.92 kN/m | حداکثر نیروی مهار |



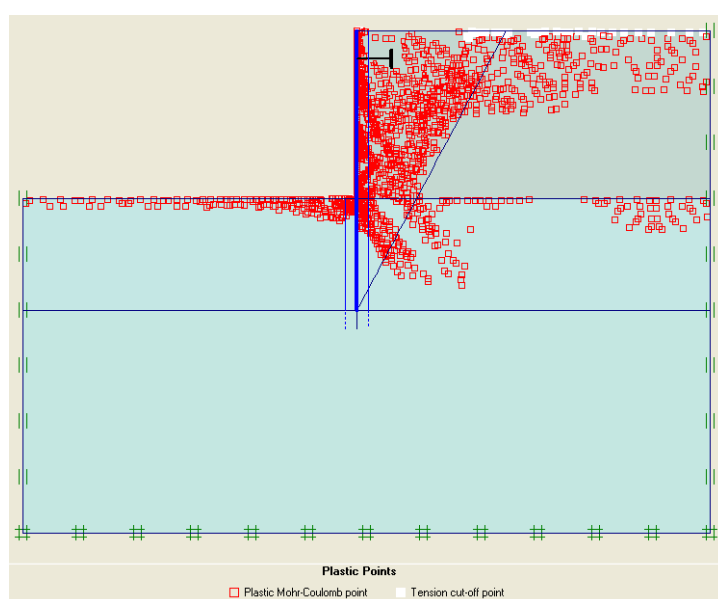
شکل ۵-۱۶- تغییر شکل سیستم- کاهش مقطع مهار تا ۷۵٪

مقدار نیروی ایجاد شده در سپر در جدول (۴-۵) آمده است که مقدار بسیار پایینی است. بنابراین نمی توان مطابق تعبیر قبلی از نیروی ایجاد شده در مهار به عنوان یک معیار استفاده کرد زیرا همان گونه که از جدول (۴-۵) پیداست، نیروی محوری ایجاد شده در این حالت از حالت های قبل با ۵۰٪ و ۶۷٪ کاهش در سطح مقطع مهار هم کمتر است. مقادیر مجاز نیروهای مهار و سپر از مقادیر به دست آمده از تحلیل بزرگ ترند و علاوه بر آن که نشان می دهند سپر و میل مهار در محدوده الاستیک هستند، نشان دهنده این مطلب نیز هستند که شکست سیستم ناشی از شکست خاک بوده نه مهار یا سپر.

البته شکست خاک از روی نمودارها و مقادیر تنش و تغییر شکل مشخص نمی شود. همان گونه که در فصل سوم نیز گفته شد نرم افزار PLAXIS یک نرم افزار اجزای محدود است و با محاسبه ماتریس سختی سازه به تحلیل می پردازد. وقتی مقدار بار به مقدار بحرانی (در اینجا کمتر از یک بیستم بار نهایی) می رسد، خاک دچار گسیختگی شده و ماتریس سختی سیستم، معکوس ناپذیر می گردد. از اینجا به بعد PLAXIS دیگر قادر به انجام

ادامه محاسبات نمی باشد هر چند تغییر مکان ها و تنش های به وجود آمده مقادیر ناچیزی هستند. در این لحظه است که محاسبات متوقف می گردد و برنامه اعلام می کند که مدل دچار شکست شده است.

در اینجا برای آنکه معیاری از شکست را داشته باشیم از نمودار نقاط پلاستیک خاک استفاده می کنیم. نقاط پلاستیک خاک نقاطی هستند که معیار برش موهر- کولمب را برآورده نمی سازند. این نقاط در شکل (۵-۱۷) دیده می شوند.

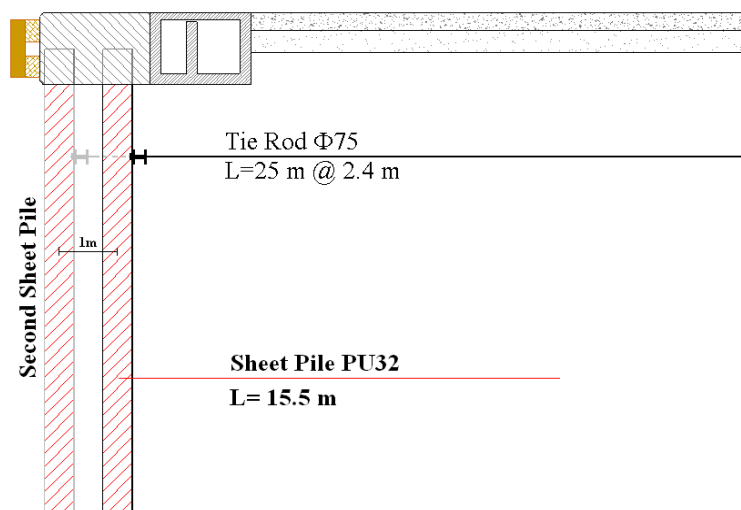


شکل ۵-۱۷- نقاط پلاستیک

همان طور که در شکل (۵-۱۷) دیده می شود، تمام نقاط در ناحیه گوه گسیختگی پلاستیک شده اند. از نتایج تحلیل های بالا دریافته می شود که خوردگی بیش از ۶۷٪ در اتصال مهار و سپر ایجاد گسیختگی در خاک پشت سپر می کند و ایمنی سیستم را با خطر مواجه می سازد.

۵-۶- مدل ۴- مدل کامل (شامل سپر اول و دوم و بارهای وارده)

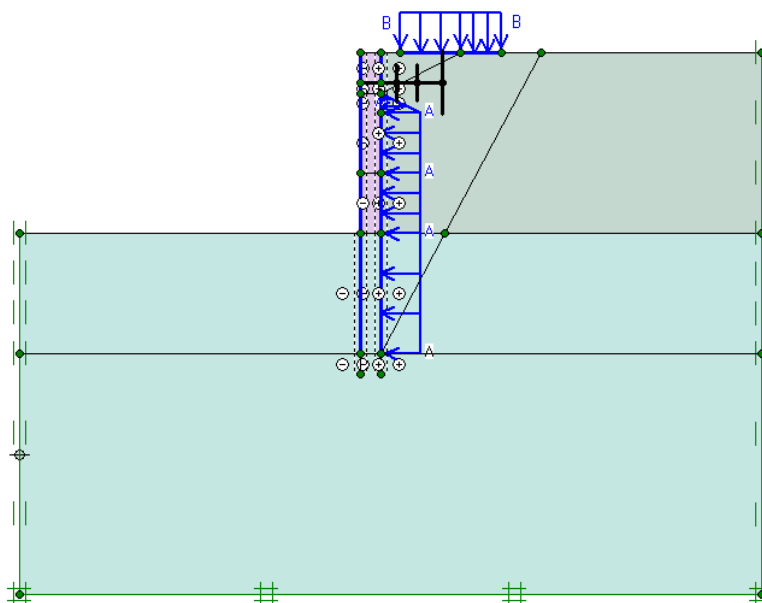
در فصل چهارم و نیز بخش ۵-۴ درباره خوردگی صحبت شد. این خوردگی ها همان طور که در شکل (۵-۱۲) دیده می شود، گاه بسیار شدید هستند و امکان ترمیم سپر با مواد ترمیم کننده وجود ندارد. از طرف دیگر به علت آنکه کابل های مهاری و سپرهای نگهدارنده آنها دچار هیچ نوع خوردگی ای نشده و تمامیت خود را حفظ کرده اند و علاوه بر آن سپرهای اصلی تنها در ناحیه پاشش آب دچار خوردگی شدید شده اند و در دیگر نواحی نقش سازه ای خود را به طور نسبی انجام می دهند و همچنان می توان از بخشی از مقاومت سازه ای آنها بهره گرفت، تخریب سیستم و خنثی فرض کردن سپرهای اصلی اولیه و جایگزین نمودن آنها با یک ردیف سپر جدید با خصوصیات سپرهای اولیه مقرون به صرفه به نظر نمی رسد. لذا اولین گزینه برای حل این مشکل استفاده از یک ردیف سپر با خصوصیات مقطع ضعیف تر (PU22) است. این سپر به فاصله یک متر از سپر دوم کوبیده می شود تا فاصله کافی برای امتداد دادن مهار سپر اول تا سپر دوم تأمین گردد. شکل شماتیک قرار گیری سپرها نسبت به هم در فاصله یک متر در زیر دیده می شود.



شکل ۵-۱۸- مهار، سپر اولیه و سپر دوم (کمکی)

پس از بررسی شرایط اتصال مهار و سپر با مقادیر متفاوت خوردگی فرض را بر آن می گذاریم که اتصال سپر و مهار در شرایطی است که حداکثر مقدار خوردگی مجاز (۶۷ درصد) در آن رخ داده و با افزایش این میزان، سیستم وارد شرایط بحرانی می شود. همان طور که در بالا نیز اشاره شد راه حل

مورد مطالعه در این مورد، کوبیدن یک ردیف سپر جدید با خصوصیات مقطع ضعیف تر می باشد. مدل سازی های بعدی به شبیه سازی این مطلب می پردازد. شکل کلی سیستم در شکل (۵-۱۹) دیده می شود.



شکل ۵-۱۹- شکل کلی سیستم- مهار، سپر اولیه و سپر دوم (کمکی)

در این حالت نیز برای مدل سازی نیاز به خصوصیات اجزای تشکیل دهنده مدل داریم. این خصوصیات در زیر آمده اند.

الف- خصوصیات خاک

جدول ۵-۵- خصوصیات خاک ها

| خاک | γ_d | γ_{wet} | k_x | k_y | E | ν | c | ϕ | Interface |
|------------|------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-----|--------|-----------|
| Backfill | 17 | 17 | 1.0 | 1.0 | 1.5E4 | 0.35 | 1.0 | 35 | 0.67 |
| Foundation | 18 | 18 | 1.0 | 1.0 | 5E4 | 0.4 | 1.0 | 37 | 0.67 |
| Concrete | 24 | 25 | 0 | 0 | 1.4E7 | 0.18 | --- | --- | 0.50 |

مدول الاستیسیته بتن بر اساس رابطه زیر و با فرض مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه ای 250kg/cm^2 محاسبه می گردد:

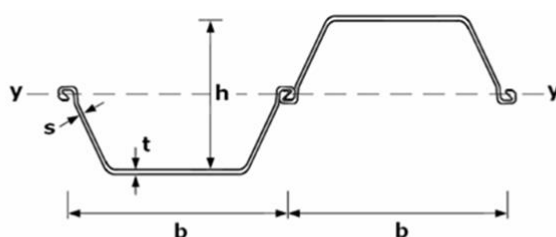
$$E_c = 15100 \sqrt{f'_c} = 15100 \times \sqrt{250} \cong 240000 \text{ kg/cm}^2 \quad (1-4)$$

علاوه بر آن فرض می شود که در طی فرایند اعمال بارها و تحلیل مدل، بتن ترک نمی خورد و در ناحیه الاستیک قرار دارد. لذا به جهت اطمینان، مدول الاستیسیته بتن در حالت ترک خوردگی برای برنامه تعریف می گردد. در اینجا فرض شده است که این مقدار تقریباً نصف مدول الاستیسیته بتن در حالت عادی باشد. در نتیجه داریم:

$$E_c = 140000 \text{ kg/cm}^2 = 14 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

پس از تحلیل فرض رفتار خطی برای بتن کنترل می گردد.

ب- خصوصیات سپرها



| Section | Width Height | | Thickness | | Sectional area cm ² /m | Mass | | Moment of inertia cm ⁴ /m | Elastic section modulus cm ³ /m | Static moment cm ³ /m | Plastic section modulus cm ³ /m | Class* |
|-----------------------|--------------|---------|-----------|---------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------|---|---|-------------------------------------|---|-------------|
| | b mm | h mm | t mm | s mm | | kg/m of single pile | kg/m ² of wall | | | | | |
| PU 22 ^{-1.0} | 600 | 450 | 11.1 | 9.0 | 174 | 81.9 | 137 | 46380 | 2060 | 1195 | 2422 | 2 2 2 2 2 2 |
| PU 32 | 600 | 452 | 19.5 | 11.0 | 242 | 114.1 | 190 | 72320 | 3200 | 1825 | 3687 | 2 2 2 2 2 2 |

مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته فولاد مانند قبل است.

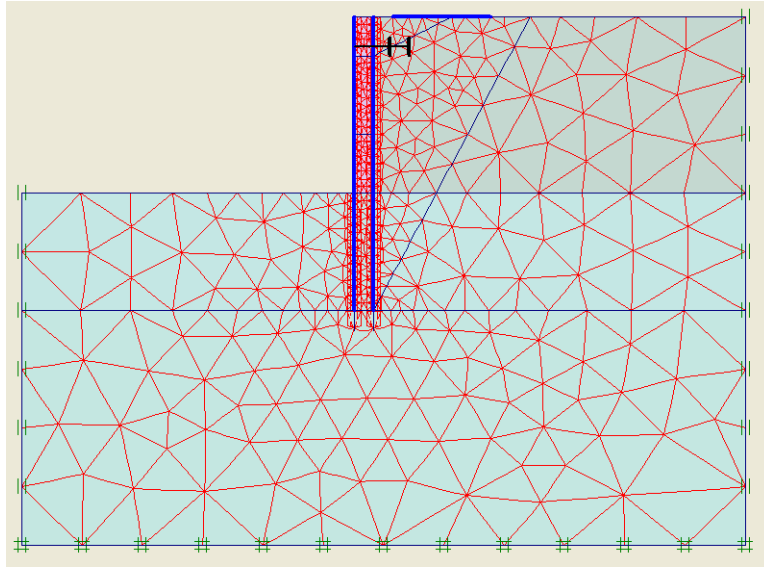
ج- خصوصیات مهارها

خصوصیات مهارها مانند قبل است.

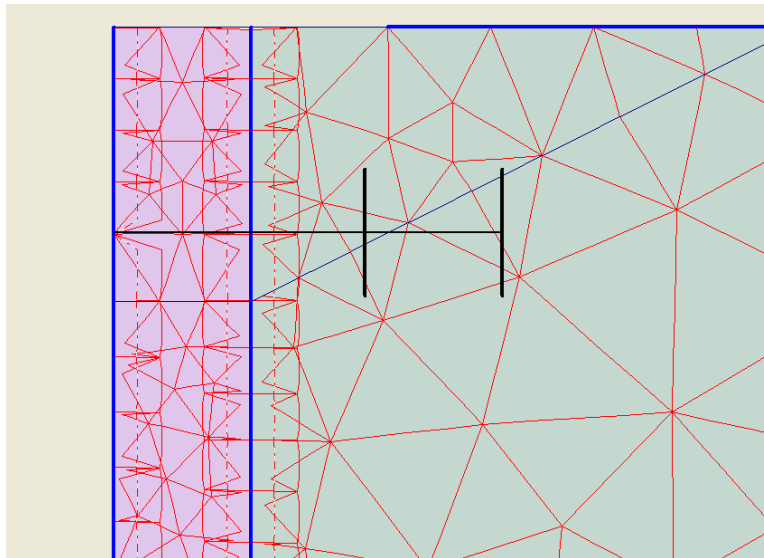
۵-۶-۱- نحوه مدل سازی

PLAXIS از یک ابزار ساخت مرحله به مرحله (Staged Construction) برای تحلیل بهره می برد که با استفاده از آن می توان مؤلفه های مدل را مطابق با ترتیب زمانی ساخت به برنامه معرفی نمود. با این حال قبل از این کار لازم است تمام مؤلفه های هندسه به طریقی که در فصل پیش بیان شد، در برنامه ساخته شوند. مدل اخیر که در این قسمت به آن پرداخته می شود، شامل اجزایی علاوه بر اجزای ذکر شده در مدل های پیشین است. این اجزا عبارتند از سپر با مقطع PU22 به عنوان سپر کمکی، لایه های بتن به عنوان پر کننده بین دو سپر و یک مهار متصل به سپر دوم. سپر دوم (PU22) دارای ارتفاع و عمق نفوذی برابر با سپر اولیه است. این سپر به فاصله 1m از سپر اول اجرا می شود. بین این دو سپر در سه مرحله با بتن پر می شود. پس از رسم و معرفی این مؤلفه ها و اعمال فشار آب در سیستم بارگذاری A و بار سرویس در سیستم بارگذاری B باید عمل گسسته سازی را انجام داد.

گسسته سازی با استفاده از گزینه اندازه متوسط برای مش بندی انجام می شود. مش بندی تولید شده سپس در لایه های بتن، ناحیه گوه گسیختگی و نواحی اطراف فصل مشترک گسترش یافته دو بار تصحیح می شود تا اندازه مناسب برای مشاهده نتایج به دست آید. ریز کردن بیش از حد مش بندی نه تنها دقت محاسبات را افزایش قابل توجهی نمی دهد، بلکه باعث افزایش زمان تحلیل و حجیم شدن فایل اطلاعات نیز می گردد. نحوه مش بندی در شکل های (۵-۲۰) و (۵-۲۱) دیده می شود.



شکل ۵-۲۰- مش بندی سیستم - نمای کلی



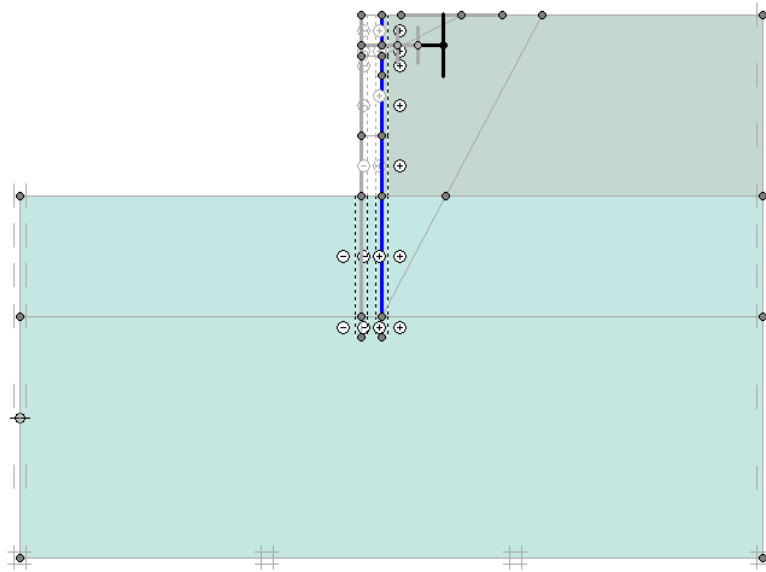
شکل ۵-۲۱- مش بندی سیستم - محدوده بین دو سپر

۵-۶-۲- شبیه سازی مراحل تحلیل

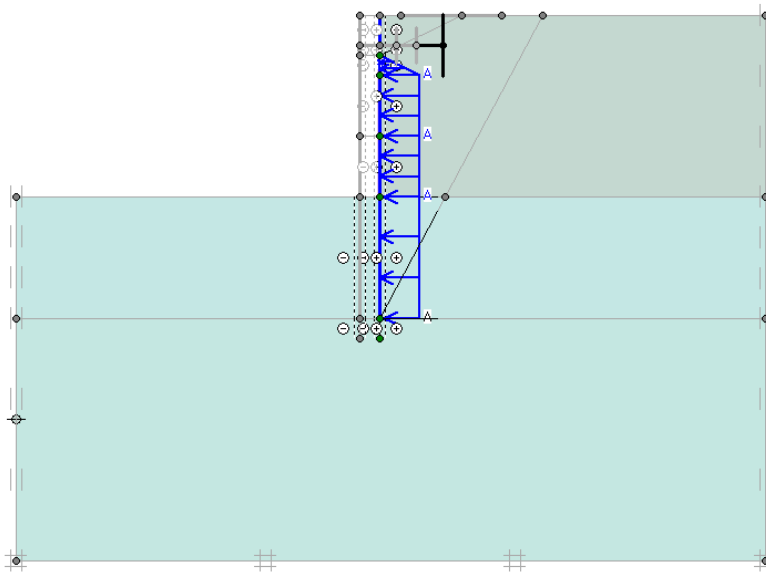
مدل سازی در ۹ مرحله انجام می شود. از گزینه ساخت مرحله به مرحله برای تعریف مراحل استفاده شده است. در مرحله اول سیستم با یک ردیف سپر و مهارهای متصل به آن به همراه خاکریز پشت سپر و خاک پی که سپر در آن کوبیده شده، معرفی می گردد. در مرحله دوم بار افقی فشار آب به سپر اعمال می گردد. در مرحله سوم سپر دوم یا کمکی وارد سیستم می گردد. مراحل چهارم و پنجم به پر کردن فاصله بین دو سپر با بتن اختصاص داده شده است. لایه اولیه دارای ارتفاع ۳ متر و دومین لایه دارای ارتفاع ۴ متر می باشد. هدف از مرحله ای کردن بتن ریزی آن است که بتوان وضعیت کل سیستم را در طی این فرایند بررسی نمود. پس از معرفی دو لایه بتن، در مرحله ششم قسمتی از خاک پشت سپر اول برداشته می شود تا امکان انتقال مهار از سپر اول به دوم فراهم گردد. در مرحله هفتم مهار از سپر اول به سپر دوم انتقال می یابد. مرحله هشتم نیز مرحله پر کردن باقیمانده فاصله بین سپرها با بتن، ریختن مجدد خاک پشت سپر که در مرحله ششم برداشته شده است و معرفی پی صلب برای بار سرویس می باشد. بالاخره در مرحله نهم و آخر بار سرویس به پشت سپر و روی پی صلب اعمال می گردد و مدل کامل می شود. جزئیات مربوط به این مراحل در ادامه آمده است.

۵-۶-۲-۱۰ - مرحله اول

این مرحله (شکل (۵-۲۲))، مرحله ای است که سیستم در شرایط کنونی قرار دارد. تنها سپر اول با مقطع PU32 در خاک کوبیده شده و در محل اتصال آن با مهار، خوردگی ایجاد شده است. میزان این خوردگی همان ۶۷٪ که میزان بحرانی خوردگی است در نظر گرفته شده است. این مرحله با غیر فعال کردن سپر دوم و میل مهار متصل به آن و لایه های بتن بین سپرها تعریف می شود. نیروهای وارد به سپر در این حالت تنها فشارهای اعمالی از طرف خاک می باشند.



شکل ۵-۲۲ - مرحله اول: سپر اولیه به همراه میل مهار



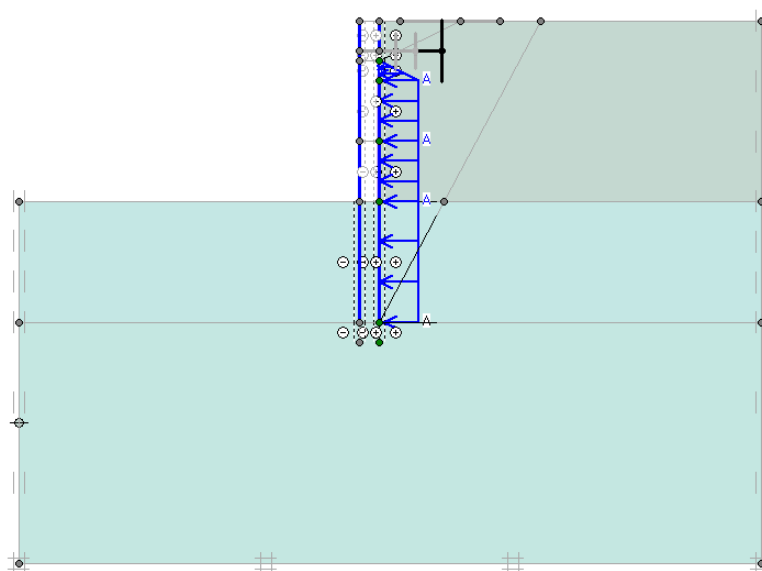
شکل ۵-۲۳ - مرحله دوم: مرحله اعمال بار افقی به سپر اول

۵-۶-۲-۱۱ - مرحله دوم

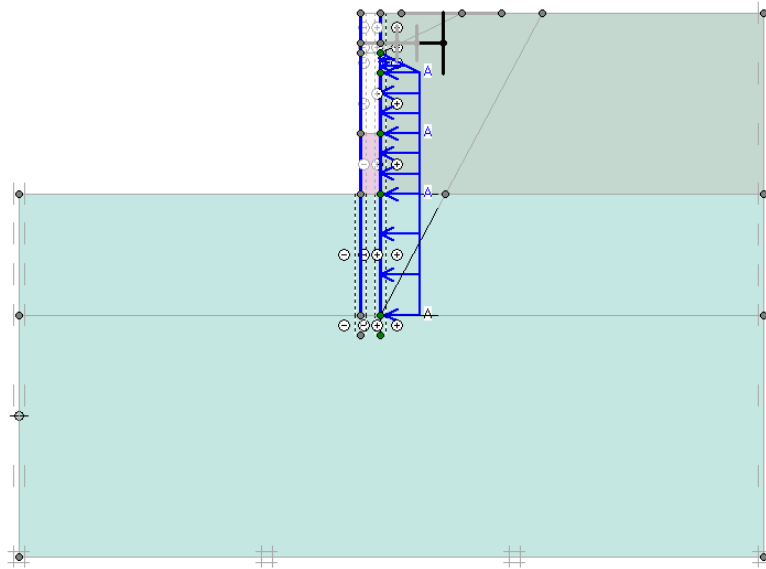
مرحله دوم که تصویر آن در شکل (۵-۲۳) دیده می شود، مرحله اعمال بار افقی فشار آب به سپر اول است. در اینجا فرض می شود که ابتدا سیستم در حال تعادل (به لحاظ ارتفاع ایستابی) بوده و سپس به علت جزر و مد، یک بار بحرانی به صورت اختلاف فشار آب در دو طرف سپر بر آن وارد می گردد. در این مرحله هنوز سپر دوم به سیستم اضافه نشده است و بارگذاری سیستم با افزودن بار آب کامل می گردد. تحمل بارهای وارده تا پایان این مرحله به عهده سپر اول می باشد.

۵-۶-۲-۱۲ - مرحله سوم

مرحله سوم (شکل (۵-۲۴)) مرحله ای است که سپر دوم با مقطع PU22 و به فاصله یک متر از سپر اول برای جلوگیری از تغییر شکل های بیشتر به سیستم اضافه می شود؛ زیرا خوردگی در محل اتصال مهار و سپر اول در حالت بحرانی است و با افزایش اندکی در آن، تغییر شکل های سیستم به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابند و باعث شکست آن می شوند. البته در این مرحله هنوز سپر دوم نمی تواند در زمینه کاهش تغییر شکل کمکی به سپر اول بکند زیرا هنوز این دو با هم اتصالی ندارند و جدا از هم کار می کنند.



شکل ۵-۲۴- مرحله سوم: اضافه شدن سپر دوم



شکل ۵-۲۵- مرحله چهارم: اولین مرحله پر کردن فاصله بین دو سپر با بتن

۵-۶-۲-۱۳- مرحله چهارم

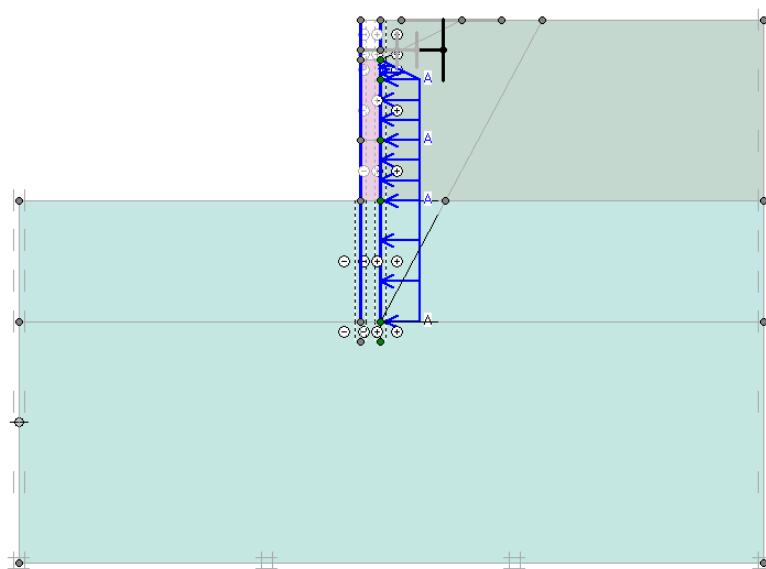
مرحله چهارم (شکل (۵-۲۵)) اولین مرحله ای است که در آن سعی می شود تدریجاً بین سپر اول و دوم به گونه ای اتصال ایجاد گردد تا در نهایت این دو به صورت یکپارچه با هم عمل کنند. وقتی سپر اول و دوم به صورت یکپارچه - یک عضو سازه ای واحد- عمل می کنند، سختی تیر حاصله افزایش یافته و در نتیجه تغییر شکل های ایجاد شده در آن کاهش می یابد.

در مرحله چهارم اولین گام برای یکپارچه کردن دو سپر برداشته می شود به این ترتیب که بین این دو تا ارتفاع سه متر بتن ریزی می شود. این بتن پس از سخت شدن به همراه دو سپر مجاور خود تشکیل یک مقطع مرکب می دهد.

۵-۶-۲-۱۴- مرحله پنجم

مرحله پنجم (شکل (۵-۲۶)) دومین مرحله از یکپارچه سازی دو سپر است. در این مرحله ارتفاع بتن ریزی باز هم بیشتر می شود.

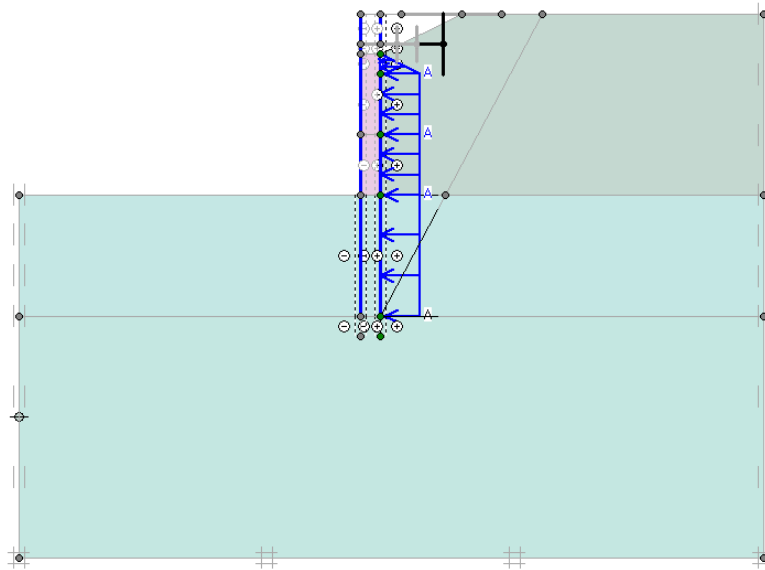
در مرحله پنجم بتن ریزی تا جایی انجام می شود که از ایمن بودن فرایند انتقال مهار از سپر اول به سپر دوم اطمینان حاصل گردد؛ به این معنی که در اثر این انتقال حداقل تنش های ممکن در سیستم و به خصوص در بتن بین دو سپر ایجاد شود؛ زیرا پیش بینی می شود که وقتی مهار از سپر اول به دوم منتقل شود، بیشترین فشارها و تنش های ایجاد شده متوجه سپر دوم و لایه بتنی گردد. در اینجا این بتن ریزی به میزان ۴ متر در نظر گرفته می شود که در کل فرایند بتن ریزی به ارتفاع ۷ متر می رسد (در مرحله چهارم ۳ متر بتن ریزی شده است). بنابراین از کل ارتفاع آزاد سپرها تنها ۲ متر باقی می ماند که باید در یک مرحله دیگر بتن ریزی شود.



شکل ۵-۲۶- مرحله پنجم: دومین مرحله پر کردن فاصله بین دو سپر با بتن

مرحله ششم ۵-۶-۲-۱۵

در مرحله ششم که ارتفاع بتن ریزی به میزان مناسب رسیده است، باید شرایط جهت انتقال مهار از سپر اول به دوم آماده گردد. به این منظور لازم است تا مقداری خاکبرداری در خاک پشت سپر انجام شود تا دسترسی به محل اتصال مهار و سپر اول و نیز مقدمات لازم برای امتداد دادن مهار تا سپر دوم و اجرای اتصال این دو فراهم گردد. این خاکبرداری تا نیم متر زیر محل اتصال ادامه می یابد.

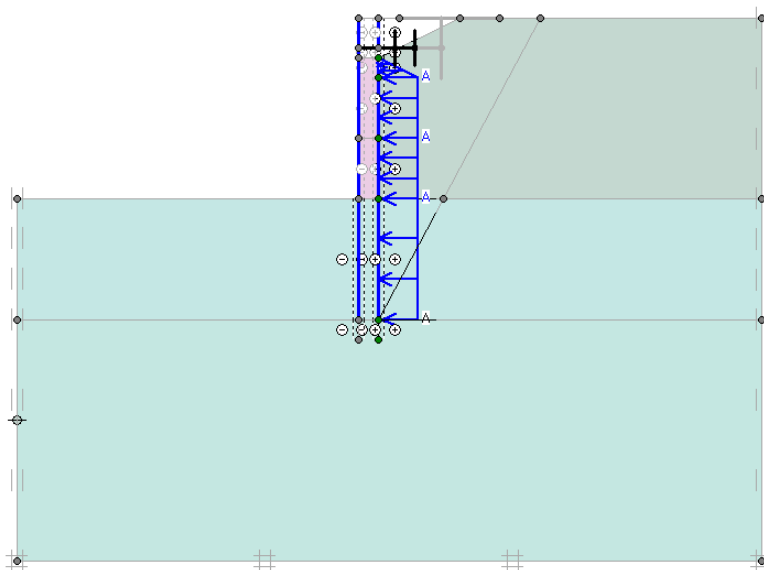


شکل ۵-۲۷- مرحله ششم: خاکبرداری به جهت تسهیل فرایند انتقال مهار از سپر اول به سپر دوم

۵-۶-۲-۱۶- مرحله هفتم

در این مرحله مهار از سپر اول به سپر دوم منتقل می شود زیرا در صورتی که شرایط همچنان با وجود خوردگی های محل اتصال ادامه یابد، کم کم اتصال سپر اول و مهار قطع می گردد و سیستم را دچار شکست می نماید. در شکل (۵-۲۸) تصویر مرحله هفتم به چشم می خورد. همان طور که دیده می شود مهار سپر اول غیر فعال گردیده و به جای آن دو مهار دیگر فعال شده اند. همان گونه که پیش از این به آن اشاره شد، دیوارهای سپری دیوارهای ممتدی هستند و برای مدل سازی آنها از گزینه کرنش مسطح استفاده می گردد. این دیوارها با مهارهایی در خاک نگه داشته می شوند که فاصله آنها در این حالت ۲/۴ متر است. بنابراین در ساخت یک دیوار سپری تنها از یک سپر استفاده نمی شود و گروهی از سپرها برای پایداری یک دیوار مورد استفاده قرار می گیرند. از آنجا که در هنگام انتقال، تمامی مهارها در یک لحظه از سپر اول، جدا و به سپر دوم منتقل نمی شوند و مهارهای کناری در تحمل نیرو در هنگام جدا شدن یک میل مهار نقش دارند، مهار دیگری با یک سیستم سطح مقطع مهار اولیه بر روی سپر اول معرفی می شود. این مهار از این پس، مهار مجازی نامیده می شود. در مرحله

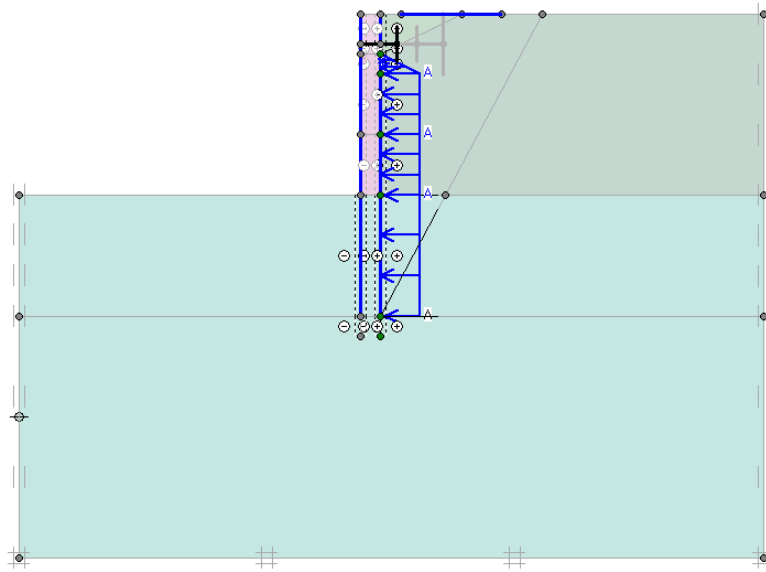
بعدی مهار مجازی از روی سیستم برداشته می شود زیرا مهارها به تمامی از روی سپر اول برداشته شده و به سپر دوم منتقل شده اند. در صورتی که این مهار به مدل معرفی نشود، ناگهان تنش های برشی بزرگ نادرستی در مدل تولید می شوند زیرا نقش سپرهای کناری در تحمل نیروها نادیده گرفته شده است و تمام فشارها و نیروهای وارده ناگهان به لایه های بتن و سپر دوم منتقل گردیده است.



شکل ۵-۲۸- مرحله هفتم: انتقال مهار از سپر اول به دوم

۵-۶-۲-۱۷- مرحله هشتم

مرحله هشتم (شکل (۵-۲۹)) مرحله تکمیل هندسه سیستم است. در این مرحله با انتقال تمامی مهارها به سپر دوم، سپرهای مجازی از روی سپر اول برداشته می شوند، خاک برداشته شده از پشت سپر به جای خود باز می گردد (پشت سپر مجدداً خاکریزی می گردد) و برای بار سرویس $5t/m^2$ یک پی صلب تعریف می شود تا در مرحله بعدی به آن اعمال گردد.

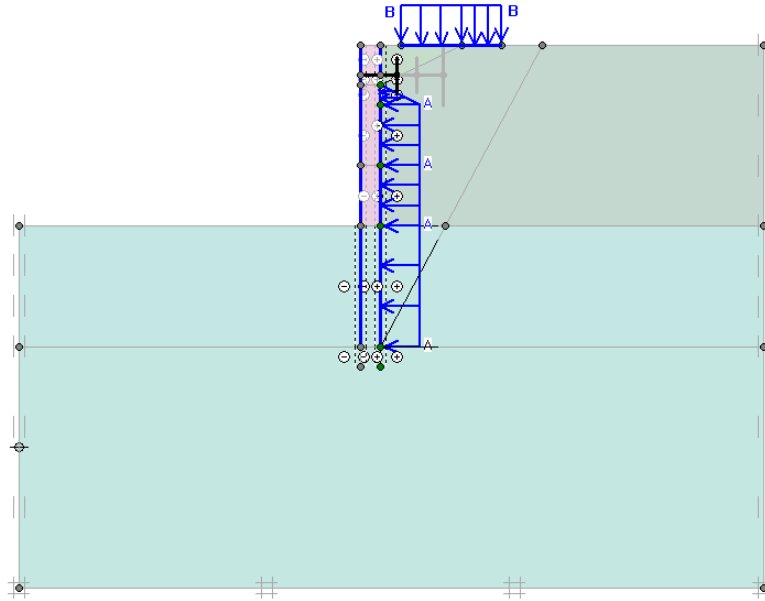


شکل ۵-۲۹ - مرحله هشتم: برداشته شدن مهار مجازی، خاکریزی پشت سپر و

پر کردن فاصله باقیمانده بین دو سپر

۵-۶-۲-۱۸ - مرحله نهم

مرحله نهم (شکل ۵-۳۰) آخرین مرحله از مدل سازی است و بار سرویس به پی صلب معرفی شده در مرحله قبل وارد می شود.



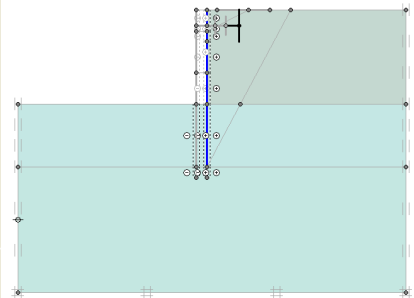
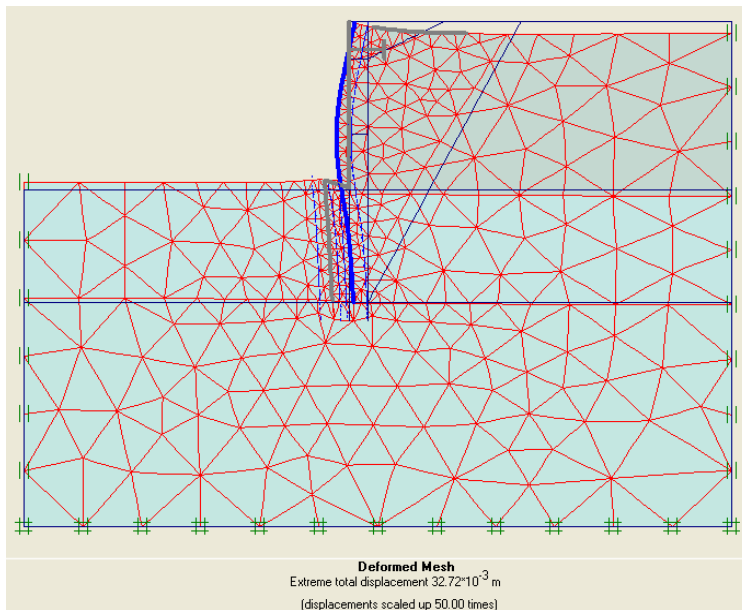
شکل ۵-۳۰- مرحله نهم: مرحله اعمال بار سرویس

۵-۶-۳- نتایج حاصل از تحلیل

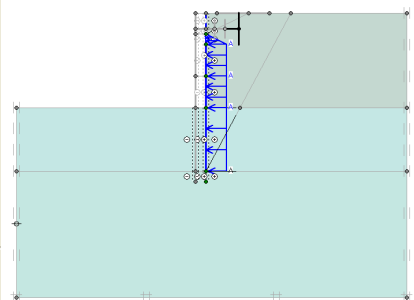
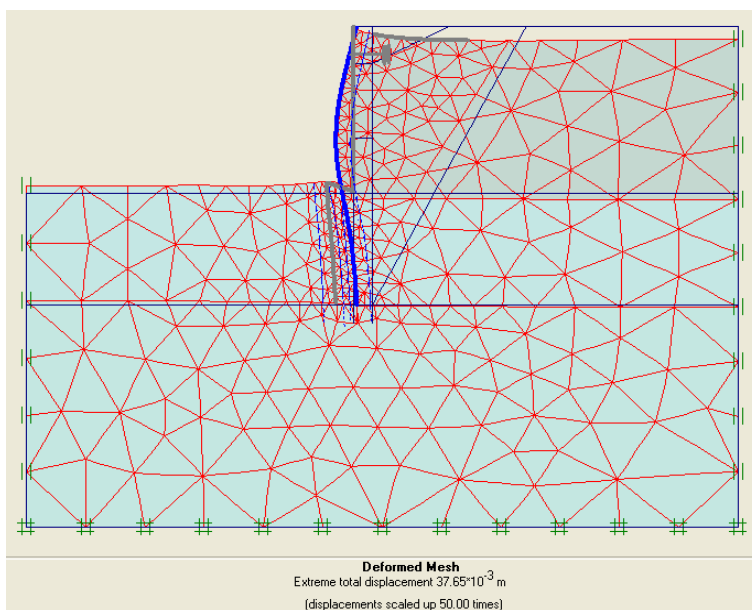
شکل تغییر شکل یافته مدل در مراحل مختلف تحلیل در اشکال (۵-۳۱) تا (۵-۳۹) نشان داده شده است. با مشاهده این اشکال می توان سیر ایجاد تغییر شکل در مراحل مختلف تحلیل را دنبال نمود. در کنار هر شکل برای سهولت تحلیل، شکل مرحله مربوطه در مدل سازی نیز آمده است. نتایج عددی حاصل از تحلیل نیز در جدول (۵-۶) آمده است.

۵-۶-۳-۱- مرحله اول

این مرحله وضعیت کنونی سیستم را نشان می دهد (شکل (۵-۳۱)). در این مرحله تنها سپر اول کوبیده شده است. نیروهای وارد به سیستم در این مرحله نیروهای ناشی از فشار خاک می باشند که در پشت سپر به صورت نیروی محرک ظاهر می گردند. این نیروها به صورت بار گسترده و به طور جانبی به سپر وارد می شوند و در آن ایجاد تغییر شکل نمایند. حداکثر تغییر مکان سپر در نزدیکی وسط ارتفاع سپر اتفاق می افتد. این تغییر شکل مشابه تغییر شکل تیری با دو تکیه گاه در دو انتها می باشد.



شکل ۵-۳۱- تغییر شکل سیستم- مرحله اول

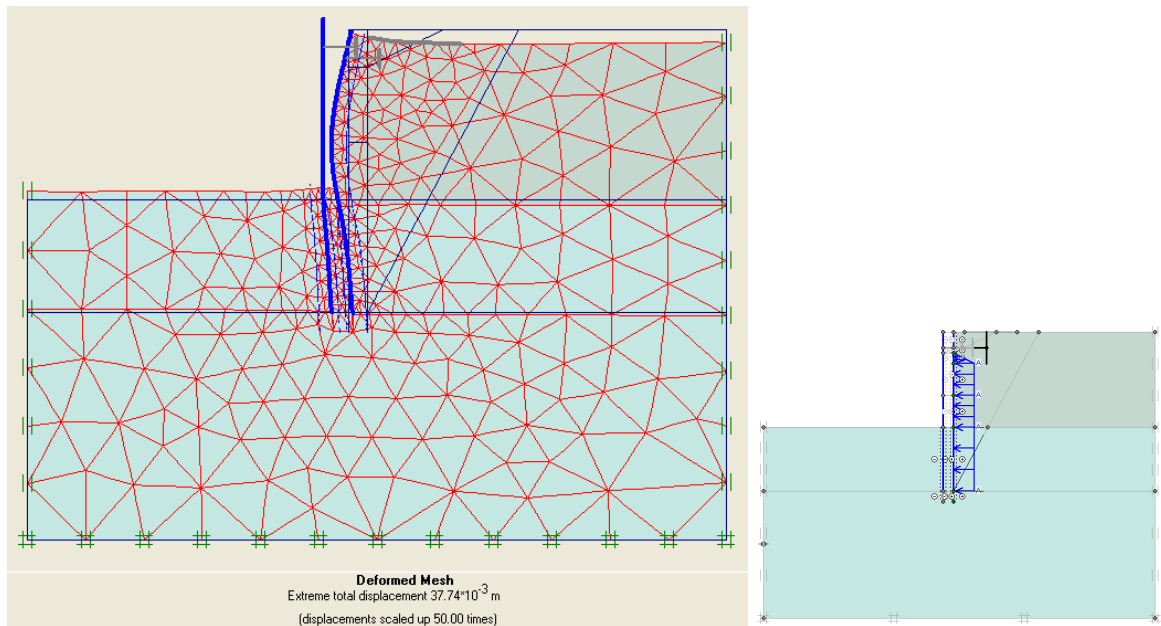


شکل ۵-۳۲- تغییر شکل سیستم- مرحله دوم

۵-۶-۳-۱۱- مرحله دوم

مرحله دوم مرحله اعمال بار افقی فشار آب به سپر اول است. در این مرحله هنوز سپر دوم به سیستم اضافه نشده است. به علت اضافه شدن بارهای افقی، تغییر شکل سپر (شکل (۵-۳۲)) در این حالت از مرحله قبل بیشتر است. همچنین نیروهای ایجاد شده در سپر و مهار از حالت قبل بیشتر هستند (جدول (۵-۶)). البته اختلاف بین نیروهای ایجاد شده در سپر (برش و لنگر) در این مرحله و مرحله قبل مقدار قابل توجهی نیست. می توان این موضوع را این گونه توجیه نمود که رفتار سپر اول مشابه رفتار تیری با دو تکیه گاه در دو انتهاست اما همان طور که قبلاً نیز گفته شد، یکی از این تکیه گاه ها (خاکی که سپر در آن کوبیده شده) ماهیتی دقیقاً شبیه به یک تکیه گاه ایده آل مفصلی یا گیردار ندارد چون می تواند به راحتی جابجا شود. وقتی بار به سپر وارد می شود، چون سیستم نرم است و سپر می تواند تا حدودی آزادانه حرکت کند، به جای آنکه نیروی قابل توجهی جذب کند و تنش های آن متناسب با بار وارده افزایش یابند، تغییر شکل بیشتری می دهد. به همین دلیل است که افزایش در مقادیر برش و لنگر سپر مقادیر چشمگیری نیستند.

حداکثر تنش برشی متوسط خاک در پایین ترین لایه خاک (چسبیده به مرز) اتفاق می افتد زیرا این تنش رابطه مستقیمی با وزن خاک دارد. بنابراین هر چه - در سمت پشت سپر اول که ارتفاع لایه ها بیشتر است- در عمق خاک پایین تر برویم، این وزن افزایش می یابد و در نتیجه تنش برشی در لایه های خاک افزایش می یابد.



شکل ۵-۳۳- تغییر شکل سیستم- مرحله سوم

۵-۶-۳-۱۲- مرحله سوم

مرحله سوم مرحله ای است که سپر دوم برای جلوگیری از تغییر شکل های بیشتر به سیستم اضافه می شود. از آنجا که در این مرحله تنها تغییر اعمال شده در سیستم، کوبیدن سپر دوم است و هیچ بار اضافه ای در مدل معرفی نگردیده، مقادیر به دست آمده برای نیروها و تنش ها تا حد زیادی برابر با نتایج مرحله قبل هستند. نیروهای ایجاد شده در سپر دوم در این مرحله تقریباً برابر با صفر می باشند.

در شکل (۵-۳۳) دیده می شود که بخش پایینی سپر دوم - با آنکه تنها در خاک کوبیده شده و هیچ باری به آن وارد نشده است- در داخل خاک تغییر شکل داده است (در بیرون از خاک، سپر دوم کاملاً شکل اولیه خطی خود را حفظ نموده است). دلیل این مطلب نیز آن است که در مراحل قبل به واسطه اعمال بارها، در سپر اول و خاک تغییر شکلی ایجاد می شود. تغییر شکل های ایجاد شده به صورت تغییر شکل در المان های خاک ظاهر می شوند که به دلیل این تغییر شکل ها، محل گره های هر المان در خاک مقداری از موقعیت اولیه خود جابجا می شود. وقتی در مرحله سوم، سپر دوم به خاک وارد می شود، این المان ها همچنان در حالت تغییر شکل یافته خود هستند و چون هر المان در سپر دوم به المان هایی در خاک متصل است، المان های سپر دوم

نیز متناسب با تغییر شکل ایجاد شده، به همراه المان های خاک جابجا می شوند و ایجاد تغییر شکل در بخش پایینی سپر دوم می نمایند.

در این مرحله نیز حداکثر تنش برشی لایه های خاک در پایین ترین لایه خاک در سمت پشت سپر اتفاق می افتد.

۵-۶-۳-۱۳- مرحله چهارم

مرحله چهارم مرحله شروع یکپارچه سازی دو سپر است. وقتی سپر اول و دوم به صورت یکپارچه - یک عضو سازه ای واحد- عمل می کنند، سختی تیر حاصله افزایش یافته و در نتیجه تغییر شکل های ایجاد شده در آن کاهش می یابد. البته مقصود از یکپارچه کردن دو سپر، به صفر رساندن تغییر شکل های ایجاد شده نمی باشد چون قبلاً در سپر اول و خاک تغییر شکل هایی ایجاد شده است و از طرفی به دلیل آنکه این تغییر شکل ها مقادیر اندکی هستند (حداکثر $37.65mm$) و قابل قبول می باشند، نیازی به حذف آنها نیست.

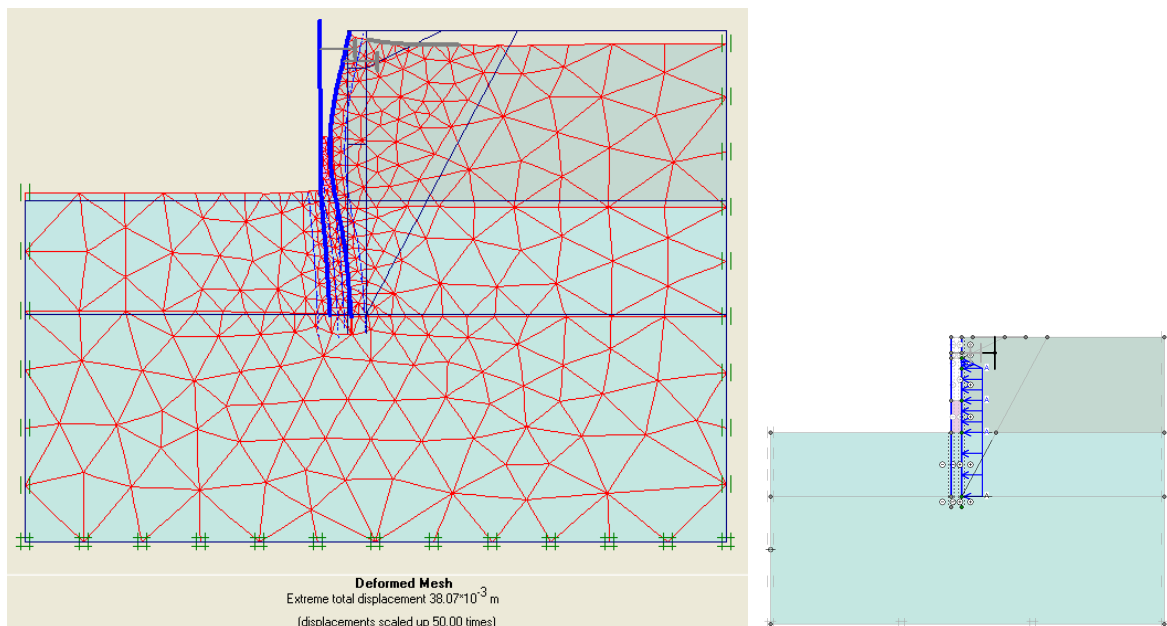
پس از آنکه در مرحله چهارم اولین لایه بتن ریخته شد، در سیستم تغییر شکل هایی ایجاد می شود (شکل ۵-۳۴). البته این تغییر شکل ها قابل ملاحظه نیستند و با دقت 0.08% برابر با تغییر شکل مرحله سومند. در مرحله چهارم نیز در مقادیر ایجاد شده تنش های سپر و مهار تغییر چندانی رخ نداده و می توان گفت مقادیر این تنش ها بدون تغییر مانده است و بتن ریزی انجام گرفته تأثیری در کاهش یا افزایش نیروها و تغییر شکل ها نداشته است دلیل این امر نیز آن است که لایه بتنی ریخته شده در بین دو سپر برای سپر دوم، نیروی محرک و برای سپر اول، نیروی مقاوم ایجاد می کند و به همین دلیل تأثیر بیشتری بر سپر دوم دارد و افزایش اندک ایجاد شده در تغییر شکل این مرحله نسبت به مرحله سوم به دلیل تغییر شکل جزئی ای است که در سپر دوم ایجاد می نماید که به دلیل پیوسته بودن المان های خاک و اعضای سازه ای، به سپر اول منتقل می گردد.

نیروی محرک یاد شده در بالا به دلیل بتن ریزی، ایجاد نیروهای اندکی در سپر دوم می نماید که مقدار آنها در جدول (۵-۶) آمده است. این نیروها مقادیر بسیار ناچیزی هستند (تنها از 0.02% ظرفیت برشی و 0.061% ظرفیت خمشی استفاده شده است) و هنوز هم عملاً تنها سپر اول است که تمام نیروهای اعمال شده در سیستم را تحمل می کند.

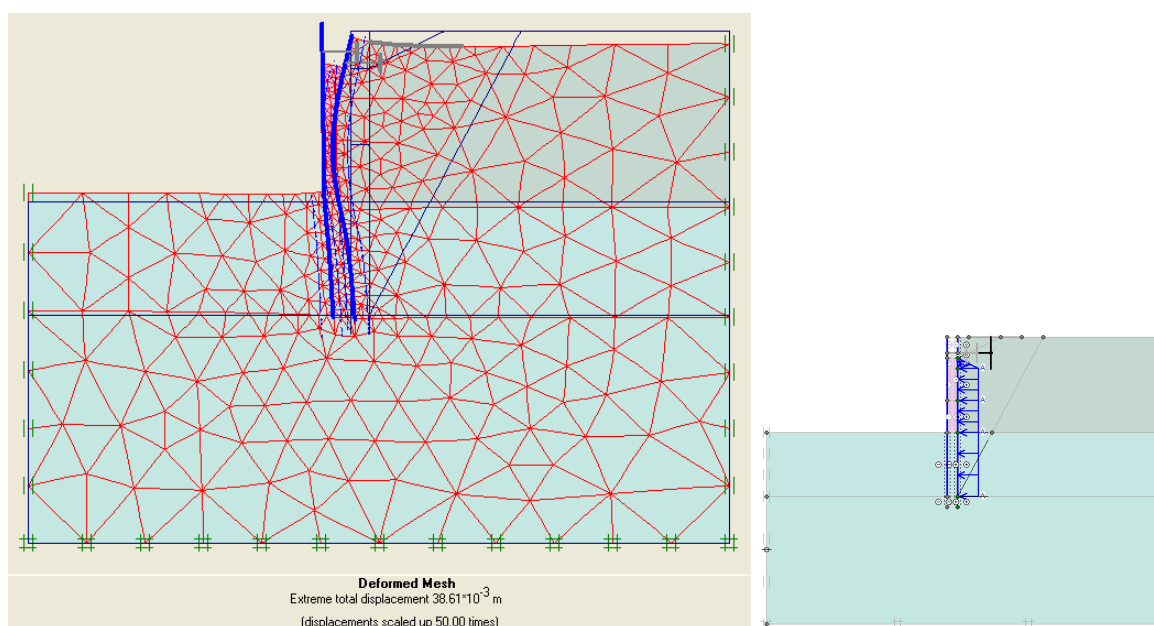
از آن جا که در سیستم بارگذاری تغییری ایجاد نشده است، حداکثر تنش برشی خاک در این حالت نیز کماکان در پایین ترین لایه اتفاق می افتد.

۵-۶-۳-۱۴- مرحله پنجم

این مرحله، دومین مرحله از یکپارچه سازی دو سپر است. دومین لایه بتنی در این مرحله بین دو سپر ریخته شده است. این بتن ریزی ایجاد نیروهای اندکی در سپر دوم می کند که البته نسبت به مرحله قبل بیشتر است اما باز هم مقادیر ناچیزی می باشند (۰/۴۹٪ ظرفیت برشی و ۱/۴۳٪ ظرفیت خمشی). در این مرحله نیز بار دیگری به مدل وارد نشده و تغییری در سیستم رخ نداده است به جز آن که لایه جدید بتنی ایجاد نیروهای محرک و مقاوم به ترتیب در سپر دوم و اول می نماید اما همچنان نیروهای ایجاد شده در سپر اول برابر با مقادیر مرحله قبل هستند. حداکثر تغییر شکل ایجاد شده در سپر اول نیز با همان توجیه قبلی درباره حرکت توأم گره های المان های خاک و سپر، افزایش یافته است.



شکل ۵-۳۴- تغییر شکل سیستم- مرحله چهارم

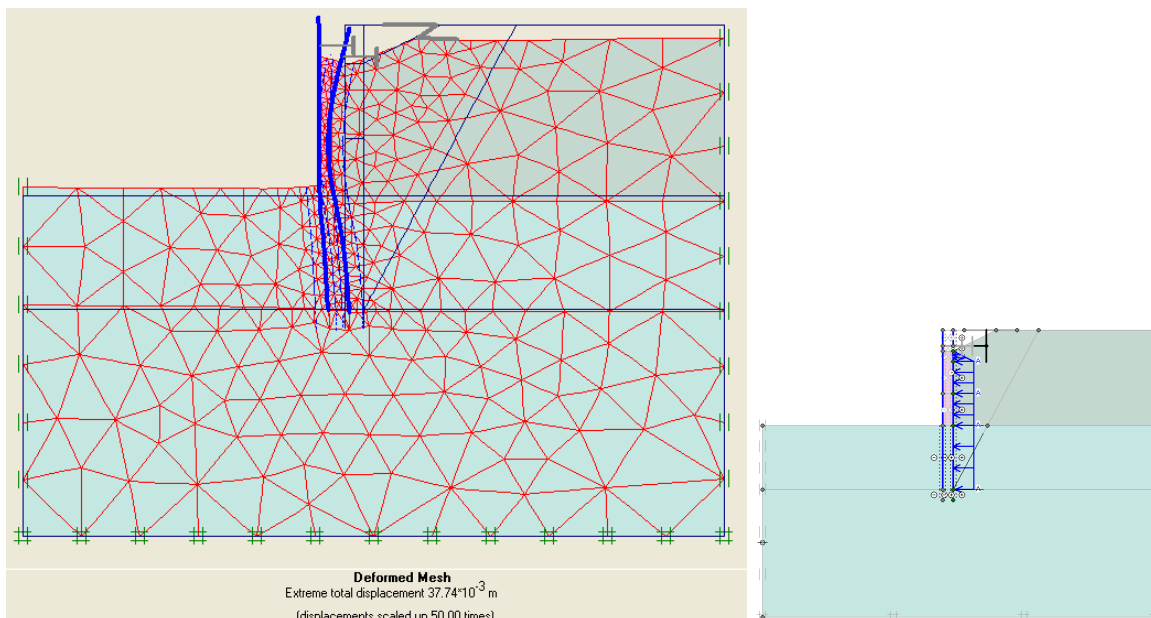


شکل ۵-۳۵- تغییر شکل سیستم- مرحله پنجم

۵-۳-۶-۱۵- مرحله ششم

در این مرحله برای تسهیل در فرایند انتقال مهار از سپر اول به سپر دوم، در پشت سپر اول خاکبرداری صورت می گیرد. گرچه میزان این خاکبرداری ناچیز است اما باعث می شود که نیروی برشی و لنگر خمشی سپر اول و دوم و تغییر شکل آنها و نیز نیروی محوری مهار اندکی کاهش یابد. دلیل این امر را می توان کاهش نیروی محرک وارد بر سپر دانست. تغییر شکل سیستم در شکل (۵-۳۶) نشان داده شده است. در این مرحله نیز مشابه مراحل قبل، حداکثر تنش برشی خاک در پایین ترین لایه خاک در سمت پشت سپر اتفاق می افتد.

مرحله ششم آخرین مرحله ای است که در آن سپر دوم نقشی در باربری سیستم ایفا نمی کند.



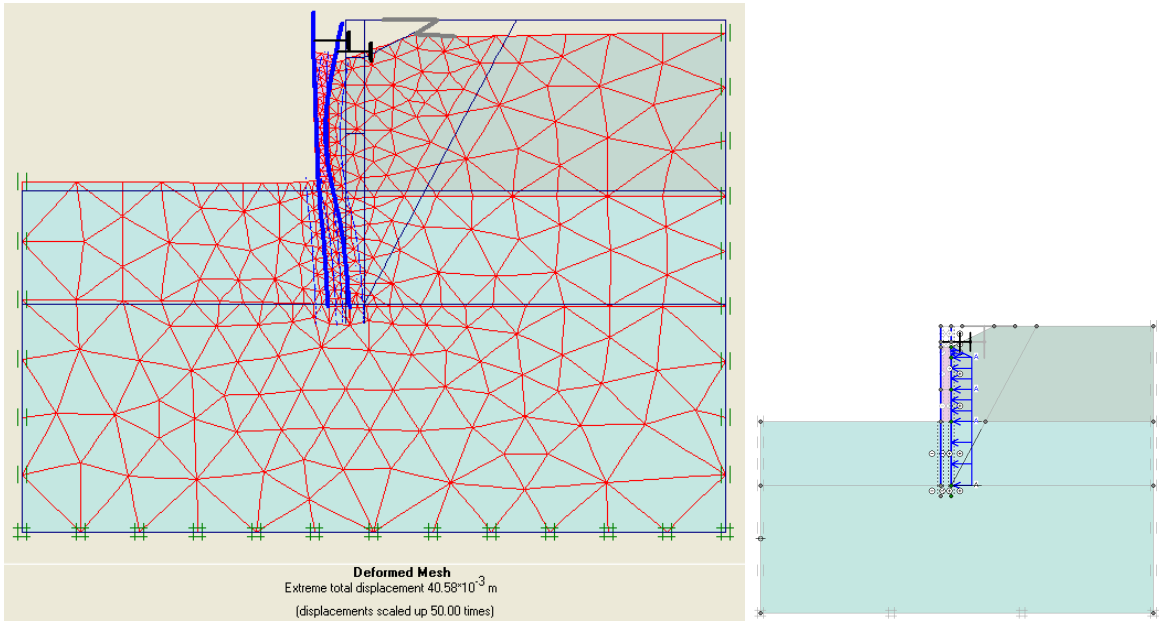
شکل ۵-۳۶- تغییر شکل سیستم- مرحله ششم

۵-۶-۳-۱۶- مرحله هفتم

در این مرحله مهار از سپر اول به سپر دوم منتقل می شود. در نمودار تغییر شکل سیستم (شکل ۵-۳۷) دو مهار دیده می شود که یکی متصل به سپر اول و دیگری متصل به سپر دوم می باشد. مهار متصل به سپر دوم مهاری است که از سپر اول منتقل شده است و مهار متصل به سپر اول همان گونه که در زیر بخش (۵-۵-۲-۷) گفته شد، برای مدل سازی نقش باربری مهارهای کناری در نظر گرفته شده است. با حضور این مهار که سطح مقطع ناچیزی دارد- سپر اول به علت قطع اتصال با مهار، دچار تغییر شکل های ناگهانی نمی شود.

در مراحل قبل حداکثر تنش برشی متوسط لایه های خاک در پایین ترین لایه خاک اتفاق می افتاد. در مرحله هفتم که مرحله انتقال مهار می باشد، با قطع مهار از سپر اول و اتصال آن به سپر دوم، ناگهان چون نیروی محوری ای که میل مهار در مراحل قبل تحمل می کرده ناگهان برداشته می شود، این نیرو به بتن ریخته شده در پشت سپر اول منتقل می شود و ایجاد تنش های بالایی در آن می نماید. این تنش ها که از دو مؤلفه قائم و برشی تشکیل یافته است، موجب ایجاد تنش های برشی بالایی در بتن می گردد. بنابراین در این مرحله حداکثر تنش برشی موجود در سیستم در بالاترین لایه بتن موجود بین سپرها اتفاق می افتد.

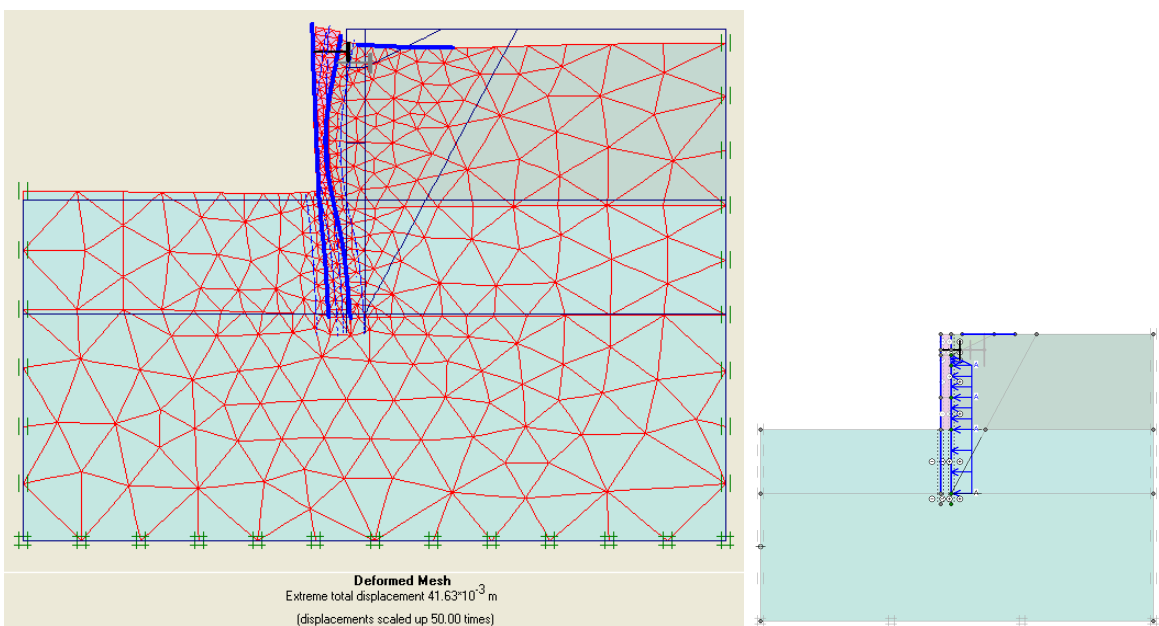
با انتقال مهار از سپر اول به دوم، بخشی از نیروی محوری که قبلاً مهار تحمل می کرده به سپر اول منتقل می گردد و نیروی برشی سپر مقداری افزایش می یابد (در حدود ۰.۷٪). بخش دیگری از این نیرو را سپر دوم تحمل می کند. در این مرحله نیروی برشی سپر دوم از 8.5 kN/m^2 در مرحله ششم به 79.78 kN/m^2 در مرحله هفتم (بیش از ۹ برابر) و لنگر خمشی آن از 5.84 kN.m/m به 43.36 kN.m/m (بیش از ۷ برابر) افزایش می یابد. علاوه بر آن دیده می شود که سپر دوم هیچ کمکی به کاهش نیروهای سپر اول نمی نماید و تنها تنش های ایجاد شده در بتن (که به علت تماس با سپر دوم به آن منتقل می شود) را تحمل می کند. این نیروها (برش و لنگر) نسبت به نیروهای ایجاد شده در سپر اول بسیار کمترند و به ترتیب برابر با ۵۲٪ و ۱۸٪ برش و لنگر سپر اول می باشند. می توان این مطلب را این گونه توجیه نمود که پیش از وارد شدن سپر دوم به مدل، نیروهای موجود در سیستم تماماً به سپر اول وارد و توسط آن جذب شده اند. وقتی سپر دوم به مدل اضافه می گردد و سپس اتصال آن به وسیله بتن ریزی با سپر اول برقرار می شود، این اتصال در ابتدا هیچ گونه تنش اضافه ای به سیستم تحمیل نمی نماید به عبارت دیگر اتصال سپر اول به دوم به واسطه اعمال نیرو صورت نمی گیرد و بتن تنها نقش یکپارچه کننده سیستم را به عهده دارد. بنابراین سپر دوم تنها وقتی وارد عمل می شود که نیرویی علاوه بر نیروهای ایجاد شده در سپر اول بر سیستم اعمال گردد (که در این حالت این نیرو ناشی از قطع میل مهار می باشد). این نیروی ایجاد شده ناشی از رها شدن بخشی از نیروهای سیستم - به دلیل قطع میل مهار- است و بنابراین از کل نیروهای سیستم کمتر می باشد و ایجاد نیروهای خفیف تری (نسبت به سپر اول) در سپر دوم می نماید. به همین دلیل است که نیروی محوری مهار دوم نیز از مهار اول کمتر است. بخش کوچکی از نیروی برشی را نیز مهار مجازی تحمل می کند.



شکل ۵-۳۷- تغییر شکل سیستم- مرحله هفتم

۵-۶-۳-۱۷- مرحله هشتم

مرحله هشتم مرحله تکمیل سیستم با خاکریزی مجدد پشت سپر، حذف مهار مجازی و ریختن آخرین لایه بتن می باشد. در این مرحله نیروهای ایجاد شده در سیستم تفاوت چندانی با مرحله قبل نمی کنند به جز آنکه با حذف مهار مجازی، نیروی محوری مهار دوم افزایش یافته است.

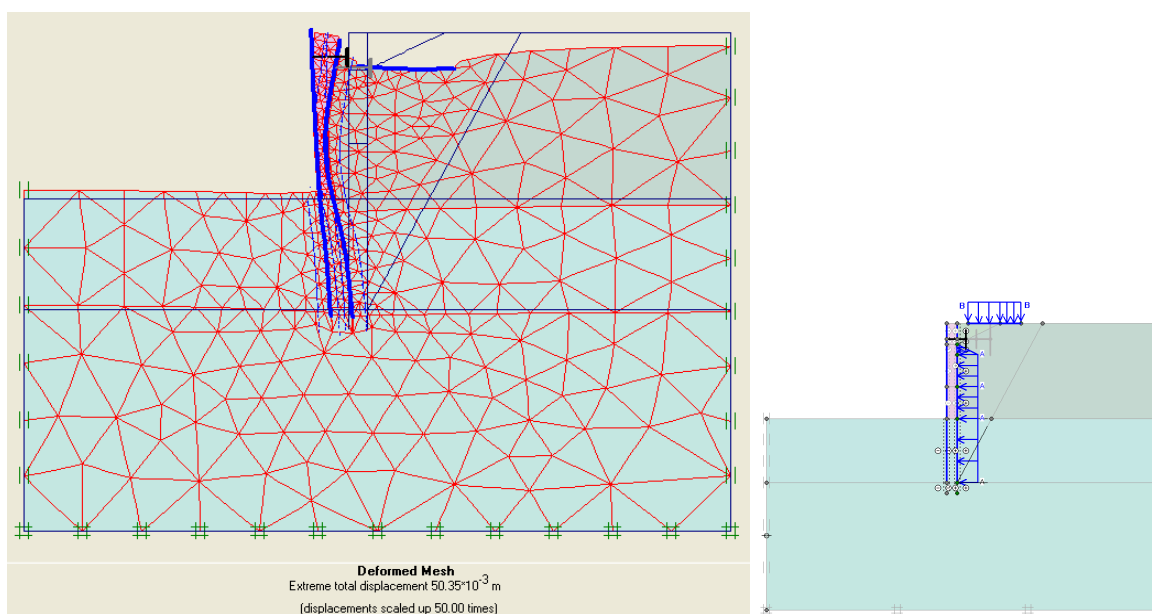


شکل ۵-۳۸- تغییر شکل سیستم- مرحله هشتم

۵-۶-۳-۱۸- مرحله نهم

در مرحله نهم بار سرویس نیز به بارهای سیستم اضافه می گردد. اضافه شدن این بار باعث افزایش تغییر شکل ها (شکل (۵-۳۹)) و نیروهای ایجاد شده در سیستم می گردد.

همان طور که از جدول (۵-۶) پیداست، حداکثر تغییر مکان سیستم در این حالت برابر با 44.59mm می باشد. این تغییر شکل از تغییر شکل سیستم در حالت بدون مهار که برابر با 272.66 mm است، بسیار کمتر می باشد. نتایج حاصل از تحلیل در جدول زیر آمده است.



شکل ۵-۳۹- تغییر شکل سیستم- مرحله نهم

جدول ۵-۶- نتایج حاصل از تحلیل- مدل کامل

| | | | | | | | | | |
|-------|-------------|-----|-----|-------|------|-----|------|------|-----|
| مرحله | اول | دوم | سوم | چهارم | پنجم | ششم | هفتم | هشتم | نهم |
| | نتایج تحلیل | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|-------------------|
| 44.59 | 41.57 | 40.58 | 37.74 | 38.61 | 38.07 | 37.74 | 37.65 | 32.72 | حداکثر تغییر مکان سپر (mm) | |
| 420.83 | 413.90 | 414.07 | 409.29 | 411.48 | 407.69 | 404.88 | 404.06 | 403.65 | حداکثر تنش برشی متوسط خاک یا بتن (kN/m ²) | |
| 149.15 | 153.75 | 152.85 | 142.48 | 142.59 | 141.01 | 143.20 | 142.58 | 133.94 | حداکثر نیروی برشی سپر (kN/m ²) | سپر اول |
| 242.63 | 239.46 | 239.07 | 242.08 | 243.01 | 240.89 | 240.67 | 240.2 | 212.42 | حداکثر لنگر خمشی سپر (kNm/m) | |
| 98.04 | 84.20 | 79.87 | 8.50 | 12.46 | 6.03 | ≈0.00 | --- | --- | حداکثر نیروی برشی سپر (kN/m ²) | سپر دوم |
| 44.34 | 43.48 | 43.36 | 5.84 | 6.33 | 2.72 | ≈0.00 | --- | --- | حداکثر لنگر خمشی سپر (kNm/m) | |
| --- | --- | --- | 113.90 | 123.10 | 119.51 | 116.90 | 116.30 | 97.93 | مهار اول | پیروی مهار (kN/m) |
| --- | --- | 4.54 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | مهار مجازی | |
| 144.90 | 97.04 | 79.87 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | مهار دوم | |

۵-۴-۵- تحلیل نتایج به روش بررسی پارامترها

در قسمت (۵-۵-۳) نتایج به دست آمده از تحلیل به صورت مرحله به مرحله تحلیل گردید. در این قسمت این نتایج به شکل اجمالی تر و به صورت تحلیل هر یک از پارامترهای تحلیل ارائه می گردد.

الف- حداکثر تغییر مکان سپر اول: حداکثر تغییر مکان سپر که در مرحله نهم اتفاق می افتد از میزان تغییر شکل سیستم در حالت بدون مهار که برابر با 272.66 mm است، بسیار کمتر می باشد.

از مرحله اول تا ششم که بارگذاری سیستم ثابت است، تغییر مکان ایجاد شده در سپر اول مقدار تقریباً ثابتی است. پس از آن در مرحله هفتم که مهار به سپر دوم منتقل می شود، افزایش اندکی در تغییر مکان سپر اول ایجاد می

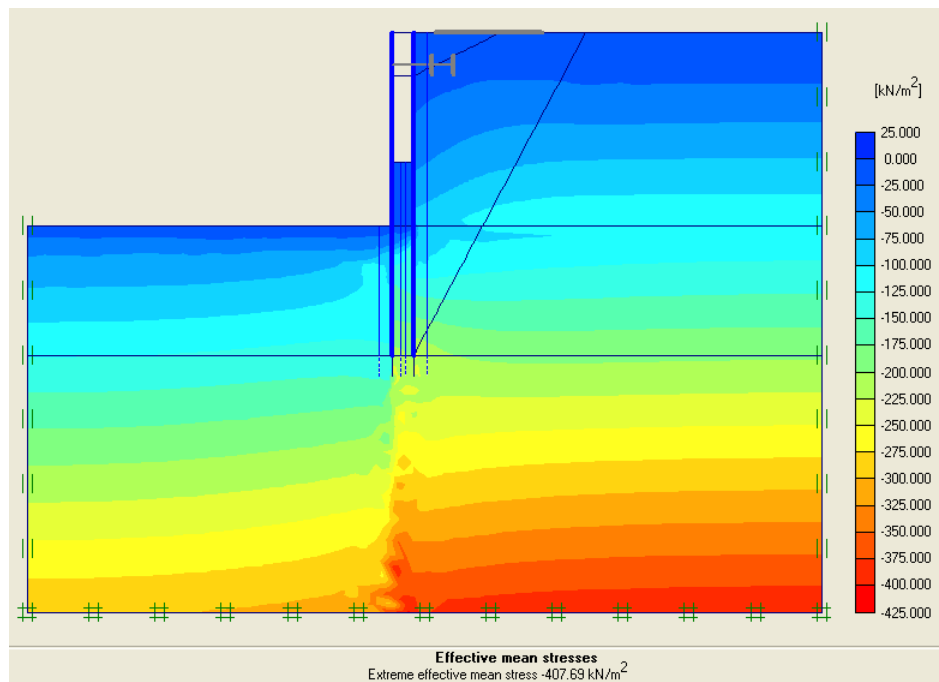
شود. از این پس نیز تا مرحله نهم که با وارد شدن بار سرویس، تغییر مکان افزایش می یابد، تغییر شکل سپر تقریباً ثابت است.

ب- حداکثر تنش برشی: تا مرحله هفتم حداکثر تنش برشی در پایین ترین لایه خاک اتفاق می افتد زیرا در این لایه تنش قائم لایه های خاک (که حاصلضرب وزن مخصوص خاک در عمق لایه مورد نظر می باشد) بیشترین مقدار را داراست. در شکل (۵-۴۰) حداکثر تنش برشی متوسط لایه در یکی از مراحل میانی آمده است. از مرحله هفتم به بعد حداکثر تنش برشی متوسط در بالاترین لایه بتنی بین دو سپر اتفاق می افتد که دلیل آن انتقال مهار از سپر اول به دوم و اعمال ناگهانی نیروی ایجاد شده در آن به مصالح پر کننده (بتن) می باشد (شکل (۵-۴۱)).

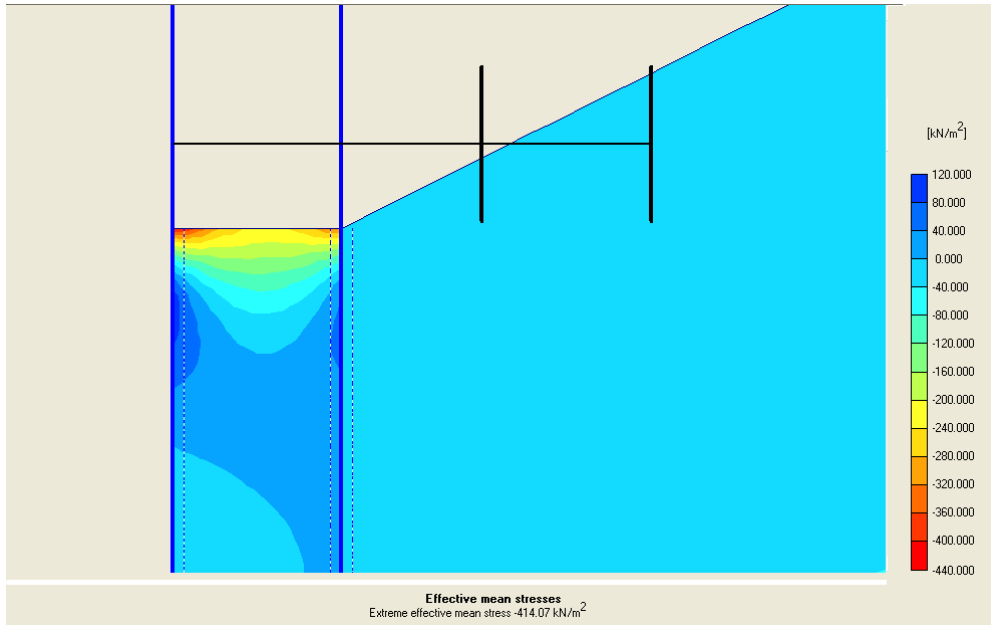
در اینجا لازم است برای بتن فرض رفتار الاستیک (ترک نخوردن بتن) نیز کنترل شود. مطابق با جدول (۵-۶) حداکثر مقدار تنش برشی ایجاد شده در بتن برابر با 414.07 kN/m^2 می باشد. حداکثر تنش برشی مجاز بتن برابر با رابطه زیر می باشد:

$$V_{cr} = 0.53 \sqrt{f'_c} b.d = 0.53 \times \sqrt{250} \times 1 \times 1 = 8.38 \text{ kg/cm}^2 = 838 \text{ kN/m}^2$$

مقدار تنش ایجاد شده بسیار کمتر از مقدار مجاز است و لذا می توان نتیجه گیری کرد که بتن ترک نخورده است.



شکل ۵-۴۰- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک



شکل ۵-۴۱- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی

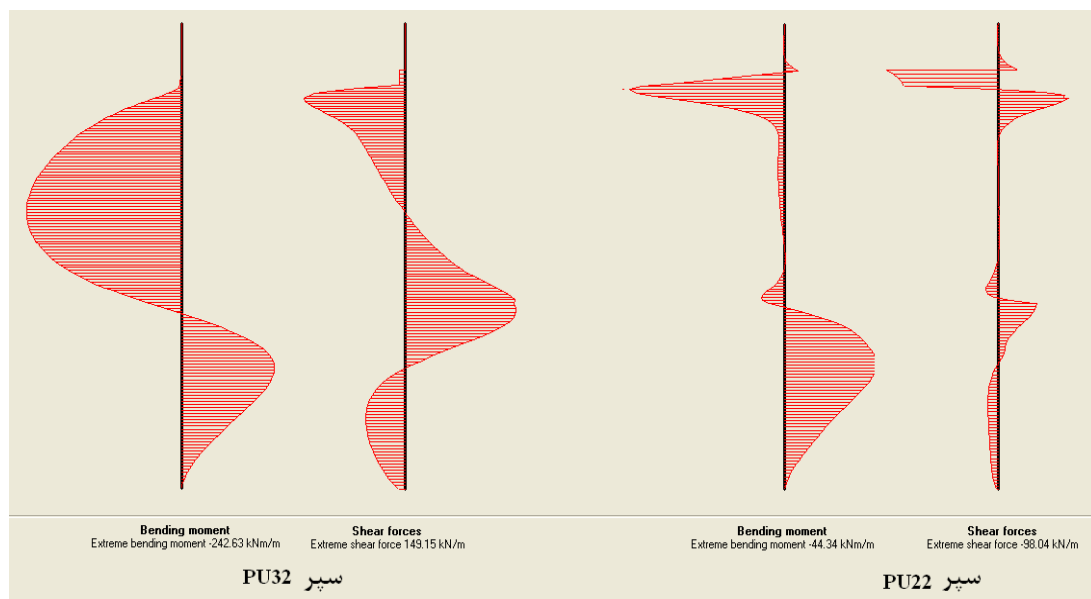
ج- مهار: نیروی محوری مهار از مرحله اول به مرحله دوم که بار آب وارد می شود، افزایش می یابد. این نیرو با ثابت بودن سیستم نیروها تا پایان مرحله ششم، تقریباً ثابت باقی می ماند. سپس در مرحله هفتم که مهار از سپر اول به سپر دوم منتقل می شود، نیرو از مهار سپر اول برداشته شده و بین مهار مجازی و مهار سپر دوم تقسیم می گردد. البته بخشی از این نیرو نیز به بتن منتقل می شود. در مرحله نهم با وارد شدن بار قائم، نیروی محوری مهار دوم افزایش می یابد. نیروهای ایجاد شده در مهارها که حداکثر مقدار آنها برابر با 119.51 kN/m می باشد (جدول (۵-۶))، مطابق با آخرین رابطه در روابط (۵-۱) در ناحیه الاستیک قرار دارند.

د- سپر اول: نیروهای وارد به سپر اول شامل بارهای جانبی خاک و آب (اختلاف فشار) می باشد که نیروی آب در مرحله سوم به سپر اول وارد می شود. پس از این مرحله و تا مرحله ششم، نیروهای ایجاد شده در سپر

(نیروی برشی و لنگر خمشی) تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. در مرحله هفتم که مرحله انتقال مهار از سپر اول به سپر دوم است، ناگهان افزایش اندکی در نیروی برشی درون سپر اول ایجاد می شود. دلیل این امر نیز آن است که اتصال مهار با سپر اول قطع می گردد و بخشی از نیروی داخلی مهار به سپر اول منتقل می گردد. بخش دیگر این نیرو را مهار مجازی و مهار منتقل شده به سپر دوم تحمل می کنند.

تمام نیروها در محدوده الاستیک هستند.

۵- سپر دوم: تا مرحله ششم نیروهای ایجاد شده در سپر دوم ناچیزند و عملاً این سپر هیچ نقشی در تحمل بار ندارد. گذشته از آن قبل از معرفی سپر دوم، تمامی بارهای وارده از طرف خاک و آب توسط سپر اول جذب شده است. از مرحله هفتم که مهار از سپر اول به سپر دوم منتقل می شود، سپر دوم نیز در تحمل بارهای جانبی وارد به سیستم شرکت می نماید. مقدار نیروهای برشی سپر دوم و نیروی محوری ایجاد شده در مهار تا مرحله آخر بدون تغییر باقی می ماند. این نیروها تماماً در ناحیه الاستیک هستند.



شکل ۵-۴۲- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم

همان طور که از بررسی نتایج نیروهای برشی و لنگرهای خمشی سپر اول و دوم در جدول (۵-۶) و نیز نتایج مربوط به آخرین مرحله در شکل (۵-۴۲) بر می آید، در طی مراحل مختلف تحلیل،

نیروهای داخلی سپر اول تقریباً بدون تغییر باقی مانده و سپر دوم نیز سهم ناچیزی از بار را تحمل نموده است. می توان چنین نتیجه گیری کرد که سپر اول با مهار مربوطه (یک سوم سطح مقطع اولیه مهار) پیش از معرفی سپر دوم، به تنهایی قادر به تحمل نیروهای وارده بوده است و سپر دوم تنها مانع از تغییر شکل بیشتر سپر اول می شود و پایداری سیستم را تضمین می نماید. بنابراین احتیاجی به مقطع بزرگی برای سپر دوم نمی باشد و می توان با مقطعی کوچک تر از آن نیز تحلیل را انجام داد. علاوه بر آن می توان عمق نفوذ سپر دوم را نیز کاهش داد. به جز آن ممکن است استفاده از مصالحی مانند ماسه نیز در بین دو سپر به عنوان پر کننده امکان پذیر باشد. مدل های بعدی به آزمایش این موارد می پردازد.

۵-۷- بررسی سایر پارامترهای ممکن در مدل سازی

در این قسمت به بررسی سایر پارامترهایی که ممکن است در مدل سازی مؤثر باشند، پرداخته می شود. این پارامترها شامل سطح مقطع سپر دوم، عمق نفوذ سپر دوم و نیز تغییر نوع خاک پی و مصالح پر کننده می باشد.

۵-۷-۱- استفاده از مقطع کوچک تر برای سپر دوم

در این مدل بررسی می شود که آیا استفاده از یک سپر کمکی با سطح مقطع کمتر جوابگوی نیروهای وارده به سیستم می باشد یا خیر. همانند قبل مدل در ۹ مرحله ساخته می شود با این تفاوت که در این مدل به جای مقطع $PU22$ برای سپر دوم (کمکی) از پروفیل $PU12\ 10/10$

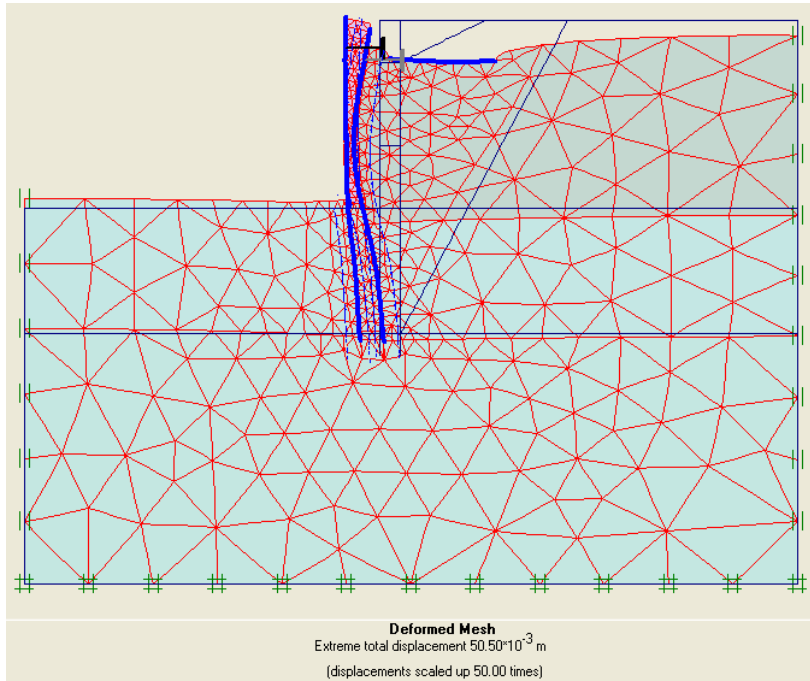
جدول ۵-۷- نتایج تحلیل - استفاده از مقطع کوچک تر برای سپر دوم

| | | | | | | |
|-------------|-------|------|-----|------|------|-----|
| مرحله | چهارم | پنجم | ششم | هفتم | هشتم | نهم |
| نتایج تحلیل | | | | | | |

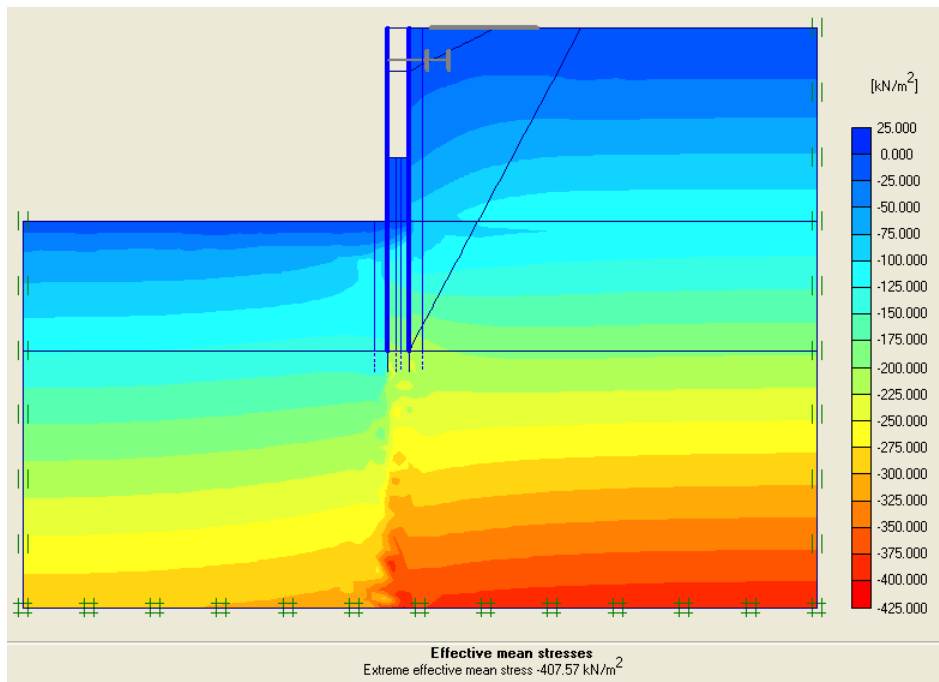
| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|-------------------|
| 44.68 | 41.70 | 40.62 | 37.74 | 38.61 | 38.07 | حداکثر تغییر مکان سپر اول (mm) | |
| 420.71 | 413.78 | 542.27 | 409.14 | 411.35 | 407.57 | حداکثر تنش مؤثر متوسط خاک یا بتن (kN/m ²) | |
| 152.52 | 156.60 | 154.74 | 143.17 | 139.54 | 141.20 | حداکثر نیروی برشی (kN/m ²) | سپر اول |
| 242.88 | 239.55 | 239.28 | 242.34 | 240.97 | 241.15 | حداکثر لنگر خمشی (kNm/m) | |
| 98.60 | 85.07 | 79.83 | 8.13 | 11.38 | 5.43 | حداکثر نیروی برشی (kN/m ²) | سپر دوم |
| 42.74 | 42.15 | 42.02 | 4.23 | 4.00 | 1.72 | حداکثر لنگر خمشی (kNm/m) | |
| --- | --- | --- | 113.70 | 123.20 | 119.50 | مهار اول | نیروی مهار (kN/m) |
| --- | --- | 4.64 | --- | --- | --- | مهار مجازی | |
| 145.50 | 97.46 | 79.83 | --- | --- | --- | مهار دوم | |

استفاده شده است. نتایج محاسبات تنها برای مراحل چهارم به بعد می آید زیرا تا مرحله سوم عملاً سپر دوم نقشی در تحمل بارهای سیستم نداشته است.

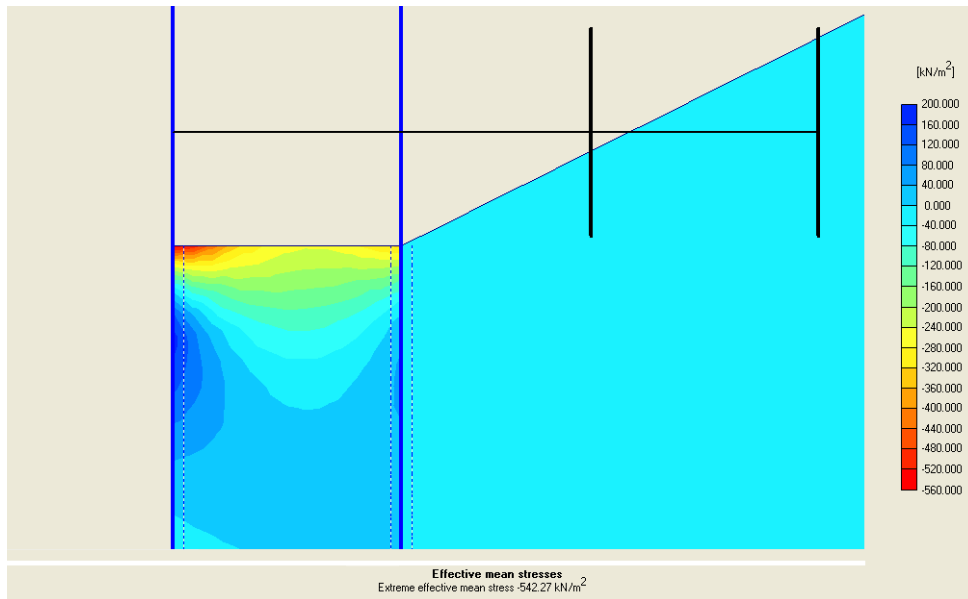
از داده های جدول (۵-۷) می توان نتیجه گرفت که این مدل نیز جوابگوی بارهای وارده به سیستم بوده است. همچنین مشاهده می شود که نتایج به دست آمده روندی مشابه مدل حالت قبل (مدل با سپر PU22) دارند و لذا تحلیل نتایج در این حالت دقیقاً شبیه حالت قبل است. در زیر اشکال مربوط به تحلیل این مدل (همانند مدل قبل) آمده است (اشکال (۵-۴۳) تا (۵-۴۶)). سعی شده است نمودارها از همان مراحل مدل قبل انتخاب شوند تا مقایسه این دو حالت امکان پذیر باشد.



شکل ۴۳-۵- شکل تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم



شکل ۴۴-۵- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک



شکل ۵-۴۵- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی

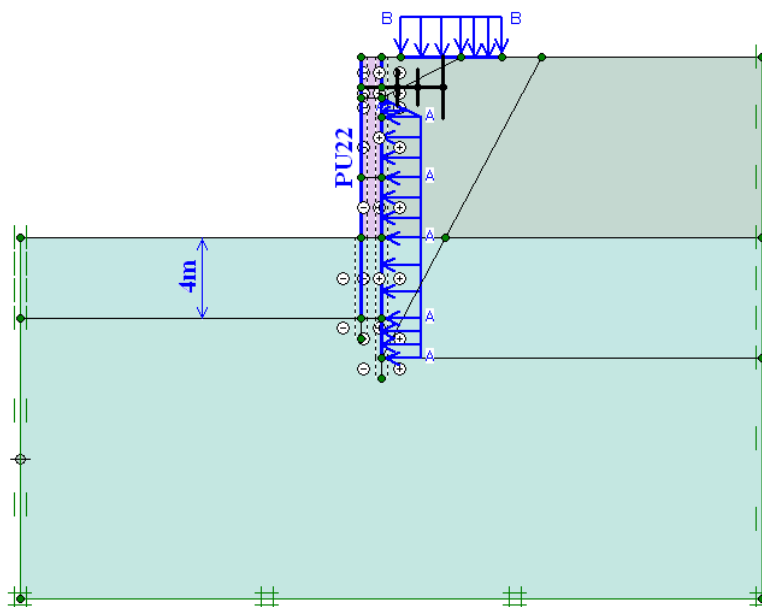


شکل ۵-۴۶- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم

همان طور که از نمودارها و نیز نتایج جدولی در این حالت و حالت قبل بر می آید، این دو مدل دارای نتایج تقریباً یکسان می باشند. دلیل این امر نیز آن است که فشارهای محرک و مقاوم خاک و فشار آب، در مراحل اولیه و پیش از معرفی سپر دوم به مدل وارد می شوند و در این هنگام نیز مدل قادر به تحمل این نیروها بوده است. پس از آن که سپر دوم به عنوان سپر کمکی وارد سیستم می شود، نیروی قابل توجهی به آن وارد نمی شود زیرا تمامی این نیروها توسط سپر اول جذب شده اند و تنها بار بتن پر کننده است که به سپر دوم وارد می شود. پس از آن که مهار در مرحله هفتم از سپر اول به دوم منتقل شد، بخشی از بار سیستم به سپر دوم وارد می شود.

۵-۷-۲- استفاده از عمق نفوذ کمتر برای سپر دوم

در این مدل که تصویر آن در شکل (۵-۴۷) آمده است، بررسی می شود که آیا استفاده از عمق نفوذ کمتر برای سپر دوم (PU22)، جوابگوی نیروهای وارده به سیستم می باشد یا خیر. در این حالت نیز مدل در ۹ مرحله ساخته می شود با این تفاوت که در این مدل به جای عمق نفوذ ۶ متر برای سپر دوم (کمکی) از عمق نفوذ ۴ متر استفاده شده است. در اینجا نیز نتایج محاسبات تنها برای مراحل چهارم به بعد می آید.



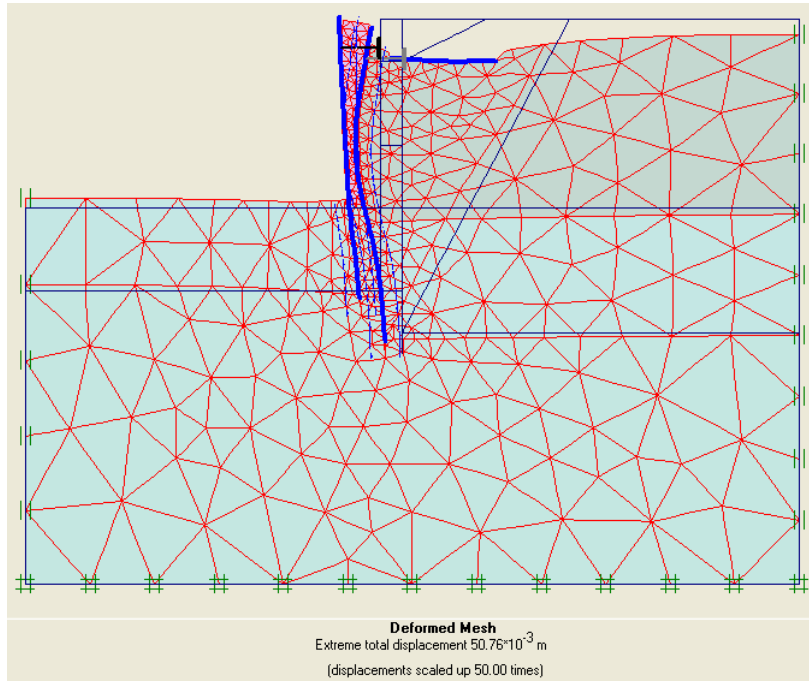
شکل ۵-۴۷- تصویر مدل - کاهش عمق نفوذ سپر دوم تا ۴ متر

جدول ۵-۸- نتایج حاصل از تحلیل - سپر دوم با عمق نفوذ ۴ متر

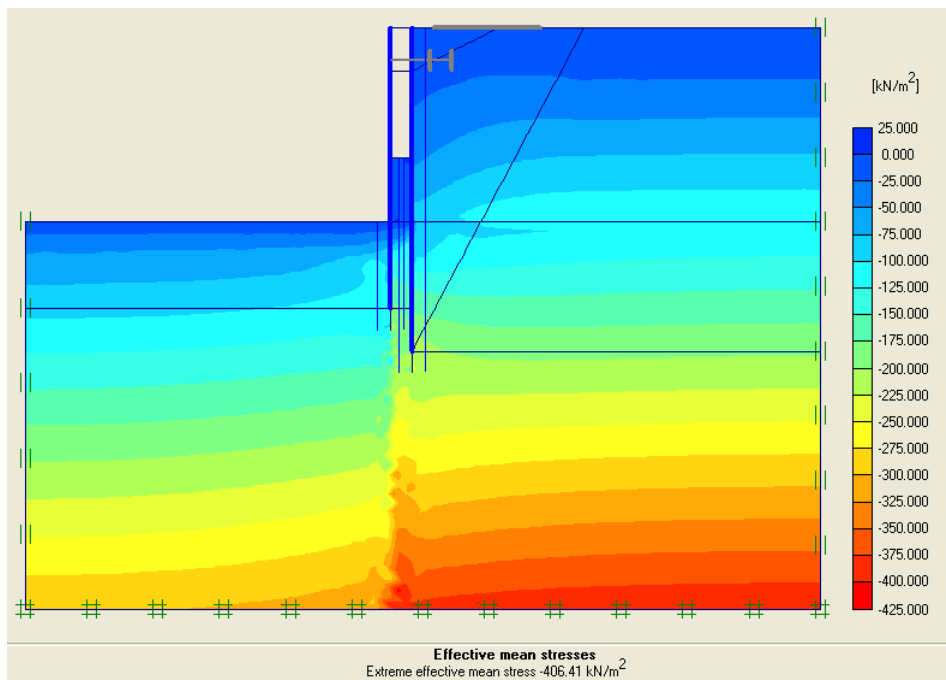
از داده های جدول (۵-۸) می توان نتیجه گرفت که این مدل نیز جوابگوی بارهای وارده به سیستم بوده است. این بار نیز نتایج به دست آمده روندی مشابه مدل حالت قبل (مدل با سپر PU22) دارند و لذا تحلیل نتایج در این حالت دقیقاً شبیه حالت قبل است.

| مرحله / نتایج تحلیل | چهارم | پنجم | ششم | هفتم | هشتم | نهم |
|---|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| حداکثر تغییر مکان سپر اول (mm) | 37.95 | 38.54 | 37.64 | 40.55 | 41.73 | 44.65 |
| حداکثر تنش مؤثر متوسط خاک یا بتن (kN/m^2) | 406.41 | 409.96 | 407.90 | 420.81 | 412.21 | 418.82 |
| سپر اول | حداکثر نیروی برشی (kN/m^2) | 141.07 | 139.05 | 142.46 | 159.90 | 156.18 |
| | حداکثر لنگر خمشی (kNm/m) | 243.51 | 243.57 | 244.78 | 241.84 | 245.99 |
| سپر دوم | حداکثر نیروی برشی (kN/m^2) | 5.38 | 11.27 | 6.86 | 81.10 | 100.58 |
| | حداکثر لنگر خمشی (kNm/m) | 2.75 | 5.76 | 2.65 | 42.69 | 43.44 |
| نیروی مهار (kN/m) | مهار اول | 118.91 | 121.80 | 113.53 | --- | --- |
| | مهار مجازی | --- | --- | --- | 4.18 | --- |
| | مهار دوم | --- | --- | --- | 79.23 | 144.36 |

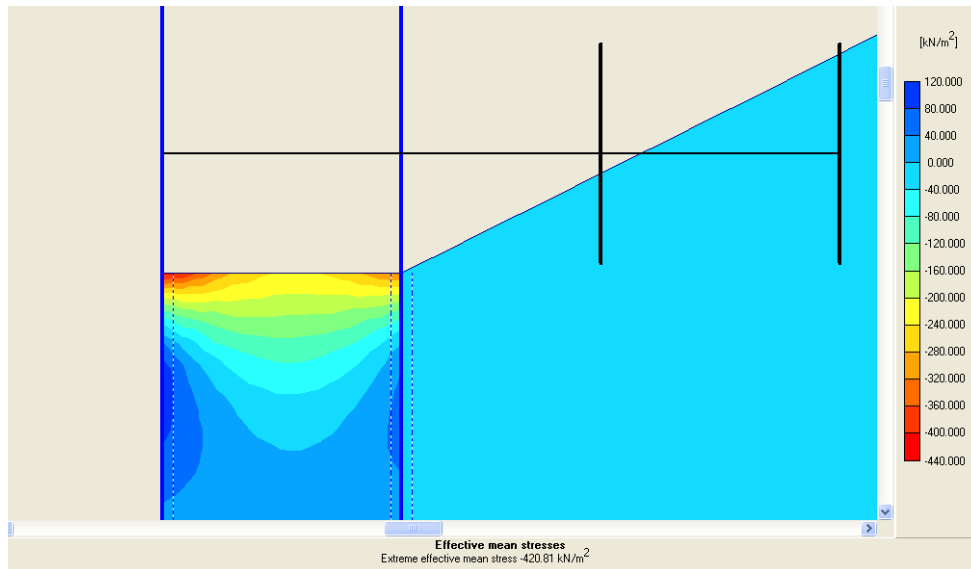
در زیر اشکال مربوط به تحلیل این مدل (اشکال (۵-۴۸) تا (۵-۵۱)) آمده است. موضوع و مراحل مربوط به نمودارها مانند قبل است.



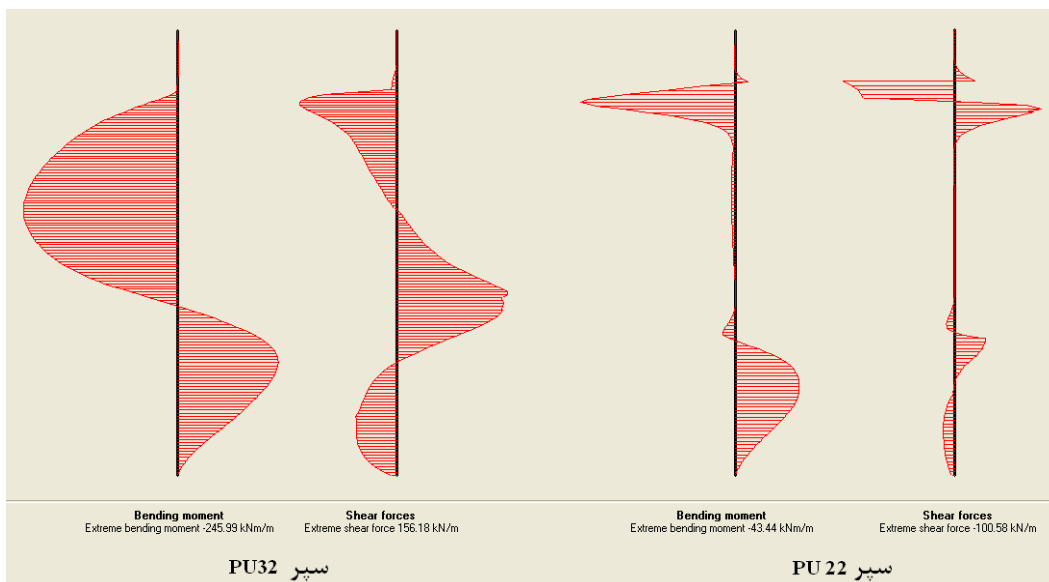
شکل ۴۸-۵- شکل تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم



شکل ۴۹-۵- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک



شکل ۵-۵-۵- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی

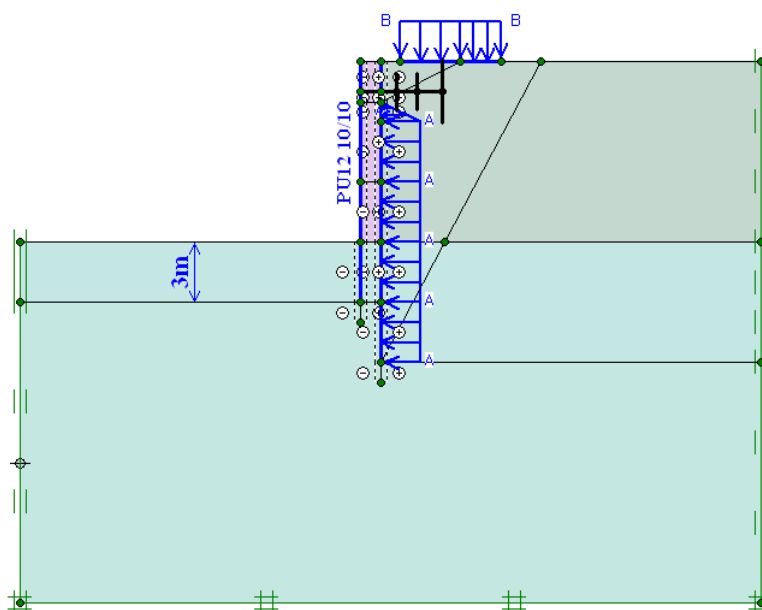


شکل ۵-۵-۵- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم

از آنجا که پاسخ های به دست آمده از تحلیل در اینجا نیز مشابه مدل های قبلی است، می توان از تحلیل های انجام شده در آنها در این حالت نیز بهره گرفت.

۵-۷-۳- تلفیق سپر با مقطع کوچکتر و عمق نفوذ کمتر

در این مدل (شکل (۴-۵۲)) بررسی می شود که آیا مدلی با مقطع کمتر برای سپر دوم و نیز عمق نفوذ کمتر برای آن جوابگوی نیروهای وارده می باشد یا خیر. در این مورد دو مدل بررسی شده است. در هر دو مدل سپر دوم دارای نیمرخ PU12 10/10 می باشد با این تفاوت که عمق نفوذ سپر دوم در اولی ۴ متر و در دومی ۳ متر می باشد. از آن جا که نتایج مربوط به هر دو مدل رضایت بخش می باشند، در اینجا تنها به ذکر نتایج مربوط به مدل دوم (عمق نفوذ ۳ متر) از مرحله چهارم به بعد پرداخته می شود.

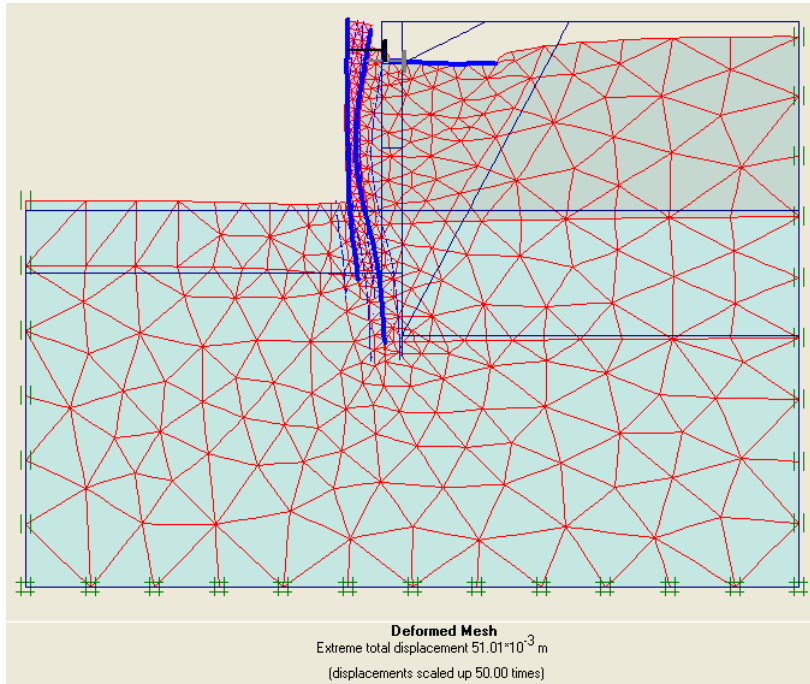


شکل ۵-۵۲- سپر دوم با مقطع PU12 10/10 و عمق نفوذ ۳ متر

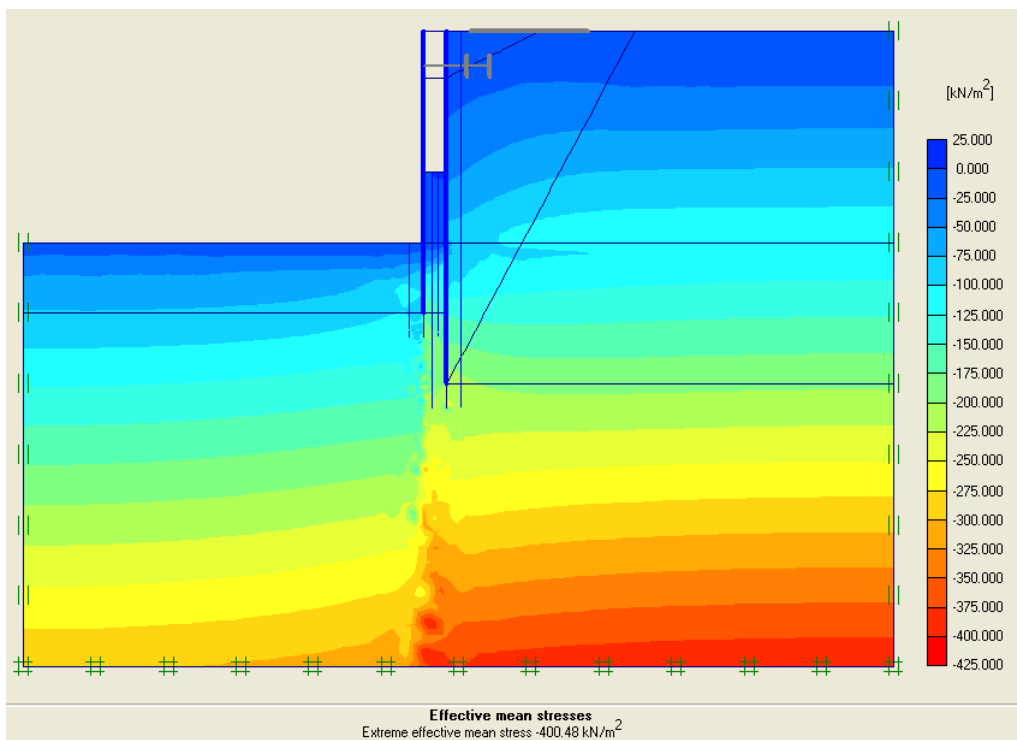
جدول ۵-۹- نتایج تحلیل- مدل تلفیقی سپر با مقطع کوچک تر و عمق نفوذ ۳ متر

| مرحله | | نتایج تحلیل | | | | | |
|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|---|--------------------|
| چهارم | پنجم | ششم | هفتم | هشتم | نهم | | |
| 37.88 | 38.47 | 37.56 | 40.55 | 41.80 | 44.69 | حداکثر تغییر مکان سپر اول (mm) | |
| 400.48 | 403.89 | 401.89 | 555.15 | 406.02 | 412.46 | حداکثر تنش مؤثر متوسط خاک یا بتن (kN/m ²) | |
| 140.80 | 135.85 | 141.94 | 162.93 | 167.40 | 160.79 | حداکثر نیروی برشی (kN/m ²) | سپر اول |
| 244.51 | 243.21 | 244.41 | 242.95 | 243.67 | 247.49 | حداکثر لنگر خمشی (kNm/m) | |
| 5.03 | 11.63 | 7.49 | 81.68 | 87.55 | 101.61 | حداکثر نیروی برشی (kN/m ²) | سپر دوم |
| 3.17 | 8.81 | 3.05 | 43.00 | 43.14 | 43.76 | حداکثر لنگر خمشی (kNm/m) | |
| --- | --- | --- | 114.30 | --- | --- | مهاری اول | نیروی مهاری (kN/m) |
| --- | --- | --- | --- | 4.75 | --- | مهاری مجازی | |
| --- | --- | --- | --- | 101.60 | 151.60 | مهاری دوم | |

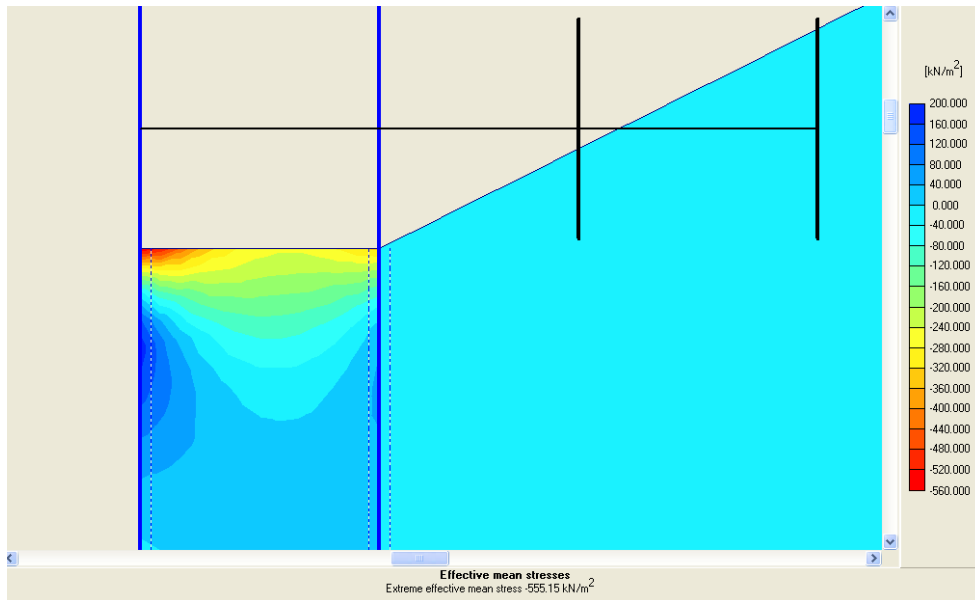
نتایج به دست آمده (جدول (۵-۹) و اشکال (۵-۳) تا (۵-۵)) نشان دهنده آن است که سیستم در برابر بارهای وارده مقاومت می کند.



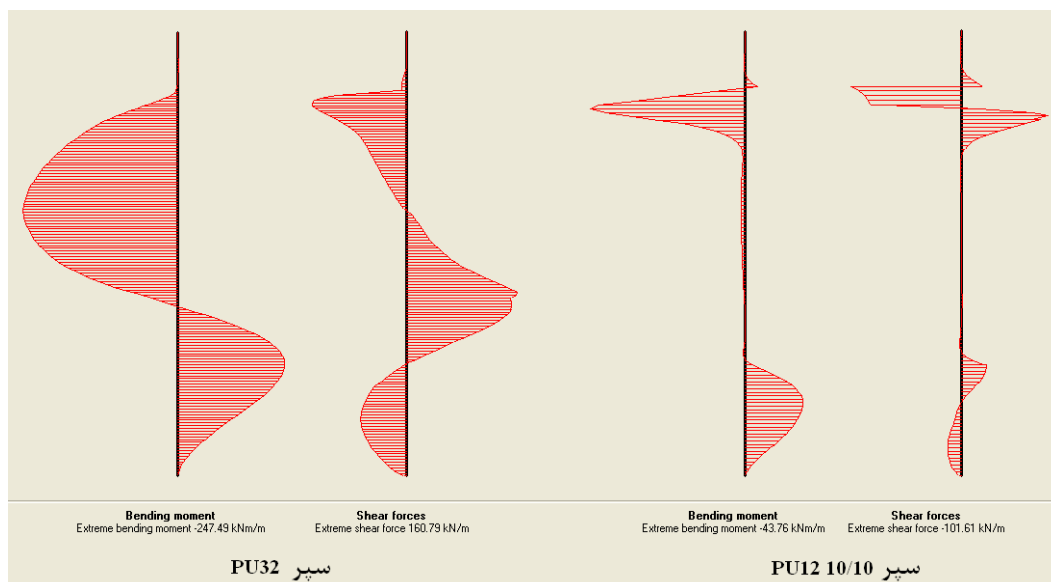
شکل ۵-۵۳- شکل تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم



شکل ۵-۵۴- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک



شکل ۵-۵۵- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی



شکل ۵-۵۶- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم

۵-۷-۴- استفاده از ماسه به عنوان پر کننده بین دو سپر

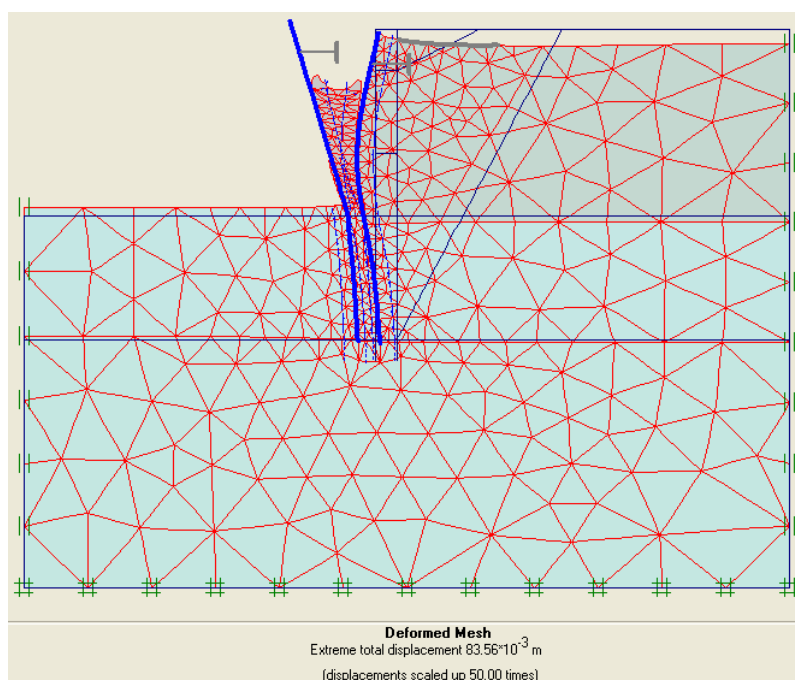
در این مدل امکان استفاده از مصالحی به جز بتن به عنوان پر کننده بین دو سپر بررسی می شود. مصالح مورد استفاده در این حالت ماسه می باشد که خصوصیات آن در جدول (۵-۱۰) آمده است.

جدول ۵-۱۰- خصوصیات ماسه پر کننده

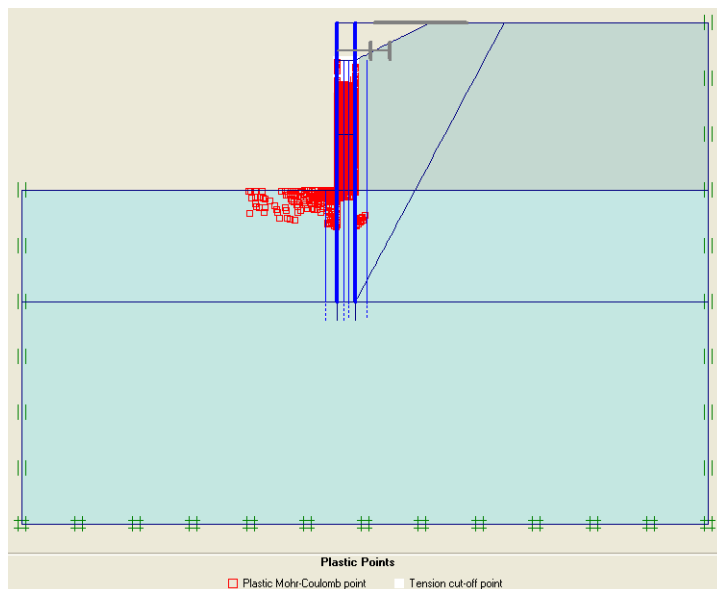
| خاک | γ_d | γ_{wet} | k_x | k_y | E | ν | c | ϕ | Interface |
|--------|------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-----|--------|-----------|
| Filler | 17 | 17 | 1.0 | 1.0 | 1.5E4 | 0.35 | 1.0 | 35 | 0.67 |

نتایج تحلیل (که در اشکال (۵-۵۷) و (۵-۵۸) آمده است) نشان می دهد که ماسه پر کننده فاصله دو سپر جوابگوی نیروهای وارده نمی باشد و سیستم در مرحله پنجم (مرحله دوم پر کردن فاصله دو سپر با ماسه) دچار شکست می شود. این نتایج در زیر آمده است.

حداکثر نیروی ایجاد شده در مهار در این حالت 118 kN/m می باشد که در ناحیه الاستیک است.



شکل ۵-۵۷- تغییر شکل سیستم



شکل ۵-۵۸- نقاط پلاستیک

همان طور که در شکل (۵۸-۵) دیده می شود، تمام نقاط ماسه پر کننده پلاستیک شده اند.

۵-۷-۵- استفاده از خاک های دیگر در مدل سازی

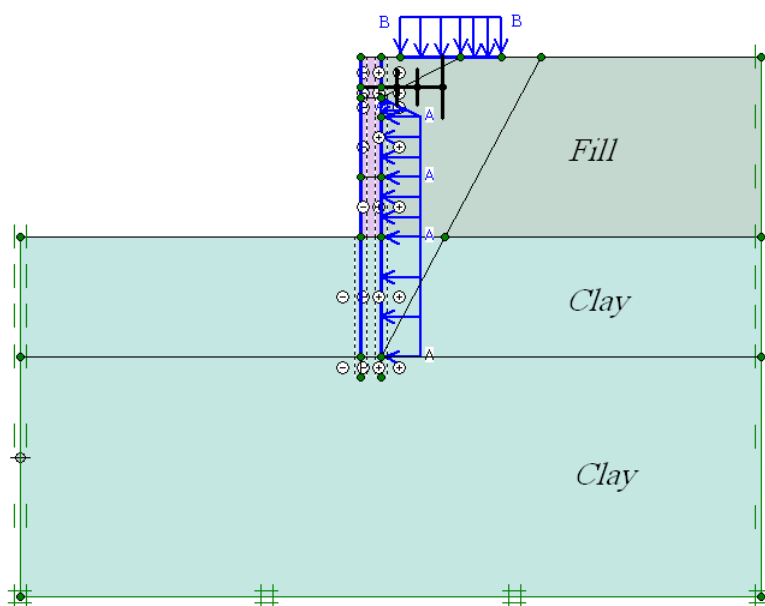
در این قسمت بررسی می گردد که آیا مدل مورد مطالعه برای دیگر شرایط خاک نیز قابل کاربرد می باشد یا خیر. عموماً خاک استفاده شده برای پشت سپر، ماسه است. بنابراین تنها تغییر اعمالی در خاک پی می باشد. مدل اولیه در خاکی با پی ماسه ای انجام شد. در ادامه از خاک رس برای پی استفاده می شود تا عملی بودن طرح در دیگر شرایط زمین بررسی گردد. مدل سازی ها کماکان در ۹ مرحله و با استفاده از بتن به عنوان پر کننده بین دو سپر ساخته می شوند.

۵-۷-۳- پی رسی

خصوصیات خاک مورد استفاده در جدول (۵-۱۱) و نیز تصویر مدل در شکل (۵-۵۹) آمده است.

جدول ۵-۱۱- خصوصیات خاک رسی

| خاک | γ_d | γ_{wet} | k_x | k_y | E | ν | c | φ | Interface |
|------|------------|----------------|-------|-------|-----|-------|-----|-----------|-----------|
| Clay | 17 | 17 | 1E-5 | 1E-5 | 5E4 | 0.33 | 12 | 22 | 0.5 |



شکل ۵-۵۹- تصویر مدل با پی رسی

نتایج تحلیل:

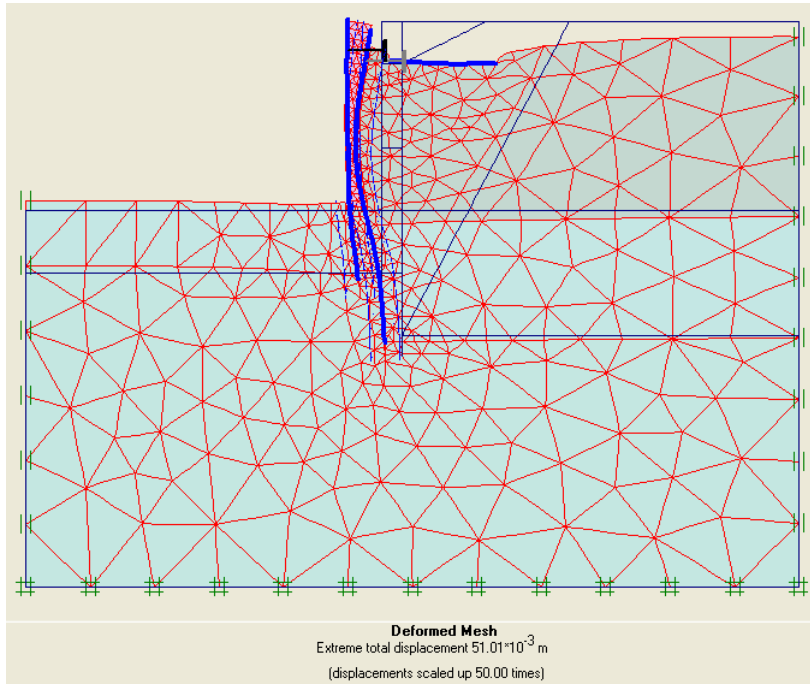
چون شرایط خاک پی تغییر کرده است، در اینجا نتایج تحلیل به صورت کامل و از مرحله اول آورده شده است.

جدول ۵-۱۲- نتایج حاصل از تحلیل- استفاده از خاک رس برای پی

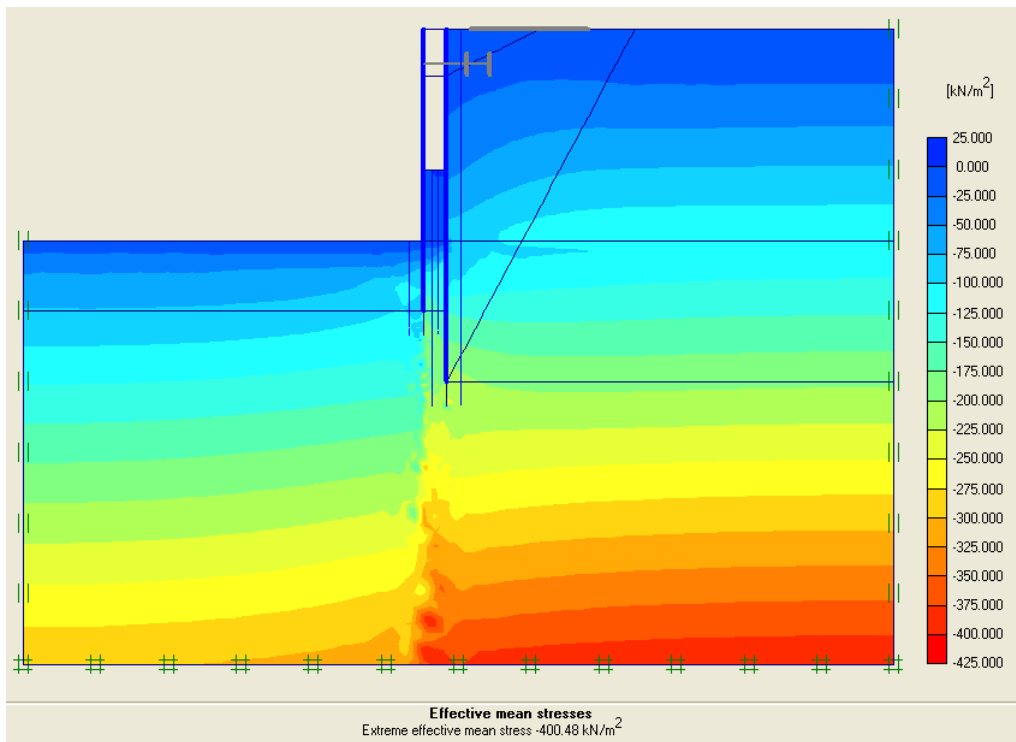
| مرحله | | | | | | | | | نتایج تحلیل |
|-------|-----|-----|-------|------|-----|------|------|-----|-------------|
| اول | دوم | سوم | چهارم | پنجم | ششم | هفتم | هشتم | نهم | |
| | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---|-------------------|
| 47.16 | 44.78 | 43.72 | 40.78 | 41.60 | 39.86 | 39.50 | 39.42 | 33.46 | حداکثر تغییر مکان سپر (mm) | |
| 413.55 | 407.79 | 436.94 | 404.0 ₉ | 405.88 | 402.76 | 404.84 | 404.03 | 403.72 | حداکثر تنش مؤثر متوسط خاک یا بتن (kN/m ²) | |
| 136.25 | 139.10 | 138.86 | 126.1 ₄ | 123.55 | 126.26 | 128.74 | 128.33 | 126.63 | حداکثر نیروی برشی سپر (kN/m ²) | سپر اول |
| 247.68 | 243.92 | 243.47 | 246.4 ₇ | 244.99 | 245.12 | 244.80 | 244.38 | 213.56 | حداکثر لنگر خمشی سپر (kNm/m) | |
| 104.09 | 88.19 | 82.36 | 9.43 | 7.56 | 6.03 | ≈0.00 | --- | --- | حداکثر نیروی برشی سپر (kN/m ²) | سپر دوم |
| 45.78 | 44.88 | 44.71 | 6.46 | 3.14 | 2.72 | ≈0.00 | --- | --- | حداکثر لنگر خمشی سپر (kNm/m) | |
| --- | --- | --- | 116.20 | 126.20 | 121.20 | 118.00 | 117.41 | 96.82 | مهار اول | نیروی مهار (kN/m) |
| --- | --- | 4.81 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | مهار مجازی | |
| 156.10 | 103.10 | 82.69 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | مهار دوم | |

نتایج به دست آمده رضایت بخش است و سیستم قادر به تحمل بارهای وارده می باشد. با مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از مدل های قبلی مشاهده می شود که روند نتایج در اینجا نیز مشابه حالات قبل بوده است. در زیر به ذکر چند نمودار (اشکال (۵-۶۰) تا (۵-۶۳)) مانند حالت های قبل پرداخته می شود.



شکل ۵-۶۰- تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم

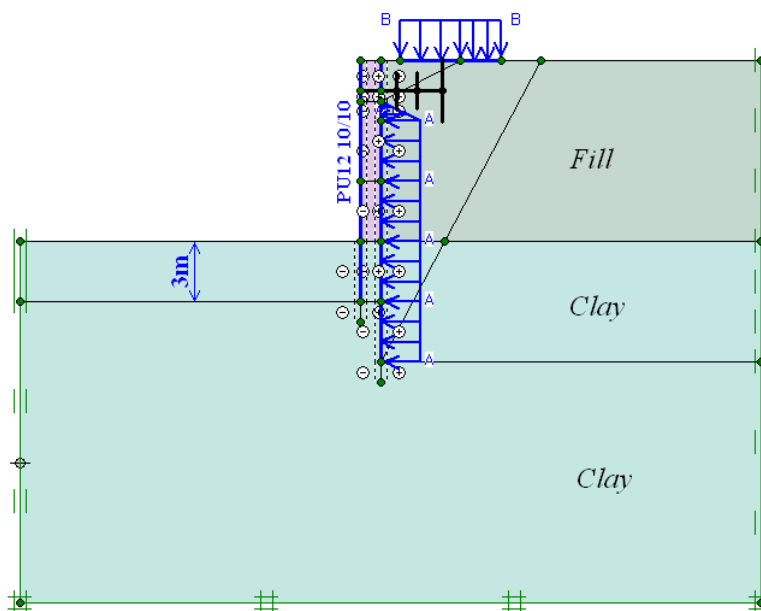


شکل ۵-۶۱- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک

مانند حالت قبل (پی ماسه ای) مشاهده می شود که همچنان تنها سپر اول است که بخش قابل توجه بار را تحمل می کند و سپر دوم نقش نگهدارنده و پایدار کننده سیستم را به عهده دارد. ایده استفاده از مقطع کوچکتر و عمق نفوذ کمتر برای این مورد نیز امتحان می شود.

۵-۷-۴- پی رسی: استفاده از مقطع کوچک تر و عمق نفوذ کمتر برای سپر دوم

در این مدل بررسی می شود که آیا استفاده از سپری با مقطع کوچک تر و عمق نفوذ کمتر در یک پی رسی امکان پذیر می باشد یا خیر. تصویر مدل در شکل (۵-۶۴) دیده می شود.



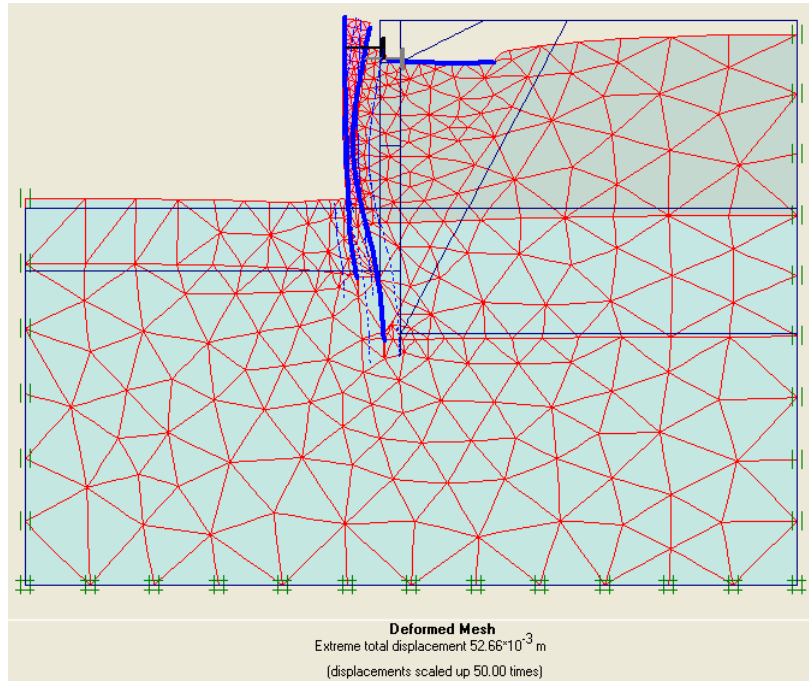
شکل ۵-۶۴- مدل پی رسی با مقطع PU12 10/10 و عمق نفوذ ۳ متر

روند مدل سازی مشابه حالات قبل است. نتایج حاصل از تحلیل در زیر آمده است.

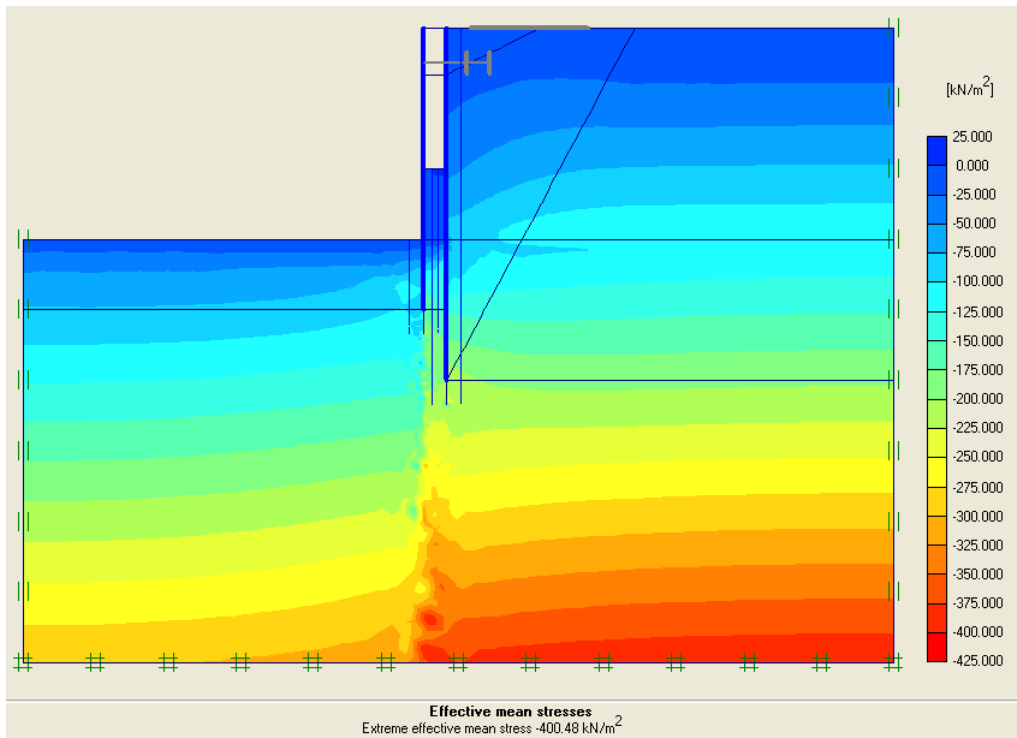
نتایج تحلیل

جدول ۵-۱۳- نتایج حاصل از تحلیل- استفاده از پی رسی با مقطع و عمق نفوذ کمتر

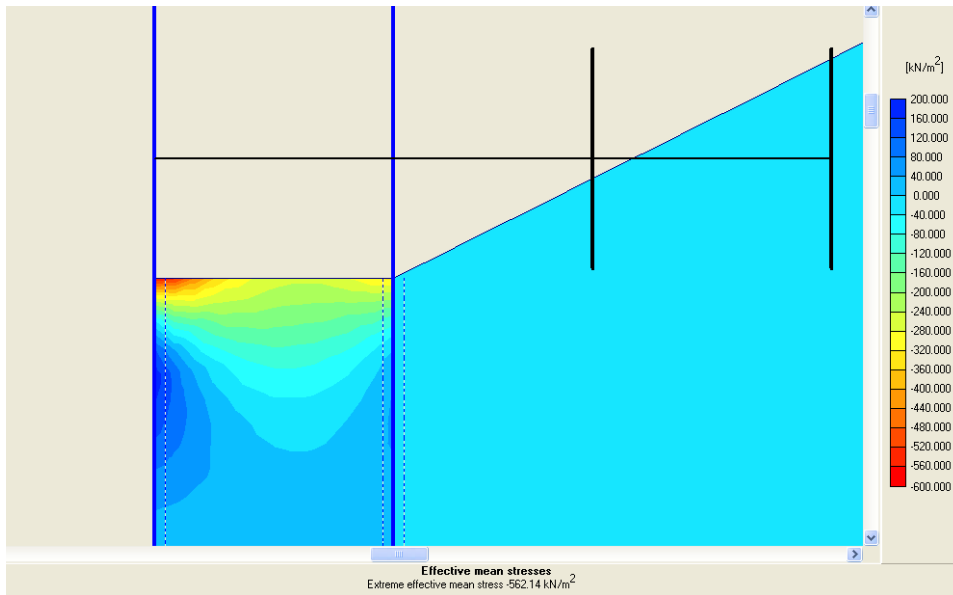
| مرحله | | نتایج تحلیل | | | | |
|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|--|
| چهارم | پنجم | ششم | هفتم | هشتم | نهم | |
| 38.82 | 39.40 | 38.51 | 41.52 | 43.05 | 46.05 | حداکثر تغییر مکان سپر اول (mm) |
| 407.62 | 406.02 | 404.04 | 562.14 | 408.18 | 414.49 | حداکثر تنش مؤثر متوسط خاک (kN/m ²) |
| 132.26 | 133.14 | 132.67 | 244.31 | 153.90 | 145.26 | حداکثر نیروی برشی (kN/m ²) |
| 245.73 | 245.91 | 247.16 | 151.29 | 245.10 | 249.29 | حداکثر لنگر خمشی (kNm/m) |
| 4.41 | 4.41 | 4.73 | 82.69 | 88.69 | 103.39 | حداکثر نیروی برشی (kN/m ²) |
| 3.05 | 3.05 | 1.88 | 43.53 | 43.67 | 44.31 | حداکثر لنگر خمشی (kNm/m) |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | مهار اول |
| --- | --- | --- | 4.80 | --- | --- | مهار مجازی |
| --- | --- | --- | --- | 103.10 | 156.10 | مهار دوم |



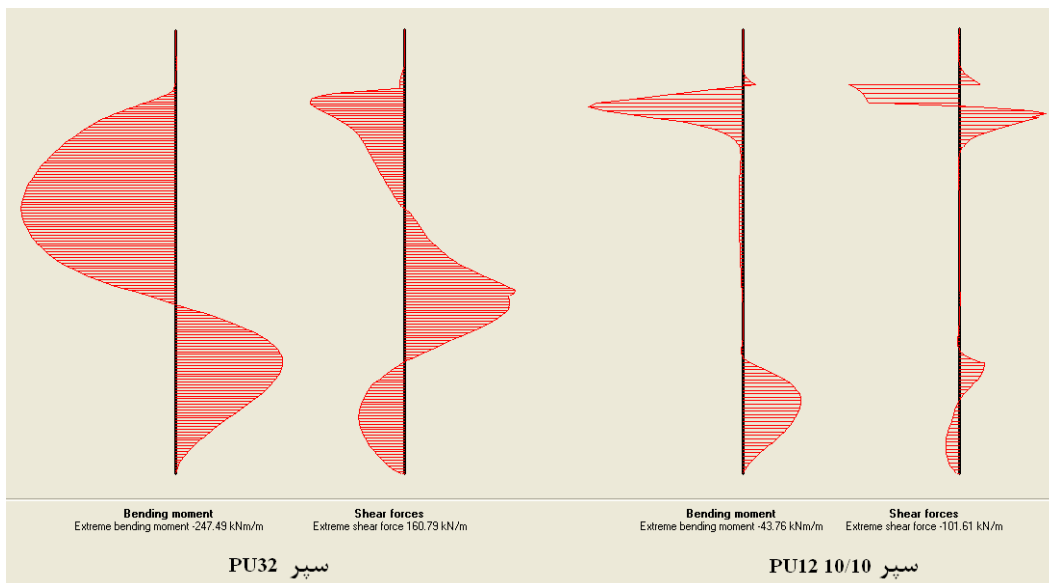
شکل ۵-۶۵- شکل تغییر شکل یافته سیستم- مرحله نهم



شکل ۵-۶۶- تنش برشی متوسط- مرحله چهارم- وقوع حداکثر در پایین ترین لایه خاک



شکل ۵-۶۷- تنش برشی متوسط بین دو سپر- مرحله هفتم- وقوع حداکثر در لایه بتنی



شکل ۵-۶۸- نمودار لنگر خمشی و نیروی برشی سپر اول و دوم- مرحله نهم

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها

در فصول گذشته رفتار سپرهای فولادی در محیط های دریایی بررسی شد. قرار گرفتن سپرهای فولادی در محیط های دریایی و ایجاد شرایط جزر و مد در دریا شرایط لازم برای ایجاد واکنش های خوردگی را به وجود می آورد. این خوردگی ها گاه آن قدر شدید هستند که ایمنی سازه را از بین می برند. در سازه های سپری که توسط میل مهار در خاک نگهداشته داشته شده اند، در مواردی که محل اتصال سپر و مهار در ناحیه پاشش آب قرار می گیرد خوردگی ایجاد شده ممکن است باعث از بین رفتن اتصال میان مهار و سپر گردد و ایجاد تغییر شکل های بزرگ و تنش های بالایی در سیستم کند. در مواردی از این دست که میزان خوردگی ها بالا است، ترمیم کردن محل های خورده شده کمکی به پایداری سیستم نمی کند و راه حل مناسبی نیست.

به طور متداول در سازه های سپری، دیواره اصلی سپر آسیب می بیند در حالی که کابل ها و سپرهای مهاری قابل استفاده مجدد می باشند. با کوبش سپر جدید از کابل ها و سپرهای مهاری به طور کامل و از دیواره سپر اصلی به طور نسبی استفاده می گردد. در این روش که به عنوان راه حلی برای رفع مشکل خوردگی به کار می رود جنبه اقتصادی طرح نیز در نظر گرفته می شود. به همین دلیل مدل سازی های انجام شده در این پایان نامه به بررسی همین راه حل می پردازد.

در مدل سازی های انجام شده ابتدا سیستم خاک و سپر بدون میل مهار و سپس با میل مهار مورد بررسی قرار می گیرد. سپس حداکثر میزان مجاز خوردگی که تمامیت سیستم را با خطر مواجه نمی سازد محاسبه شده است. در مدل های بعدی که در آن رفتار ترکیبی سپرها بررسی می شود فرض بر این بوده است که حداکثر میزان خوردگی که حالت بحرانی برای پایداری سیستم ایجاد می کند در محل اتصال سپر و مهار ایجاد شده است. علاوه بر آن از یک ردیف سپر کمکی با سطح مقطع کوچک تر از سپرهای اصلی استفاده شده است.

نتایج حاصل از تحلیل نشان می دهند که سیستم ترکیبی سپرها قادر به تحمل نیروهای وارده بوده است و تغییر مکان های ایجاد شده در سیستم نیز قابل قبول هستند. با مقایسه نیروهای ایجاد شده در سپر اولیه و مهار با نیروهای مجاز آنها می توان نتیجه گیری کرد که این اعضا همواره در طی تحلیل دارای رفتار الاستیک

هستند و در مواردی که شکست اتفاق افتاده ناشی از گسیختگی خاک بوده است. همچنین با مقایسه نیروهای ایجاد شده در سپر اولیه و کمکی می توان نتیجه گرفت که سپر اولیه تمامی نیروهای وارده به سیستم را قبل از تعریف سپر دوم جذب کرده است و نیروهای ایجاد شده در سپر دوم مقادیر بسیار کمی هستند. بنابراین نقش سپرهای کمکی تحمل بارهای وارده نمی باشد و تنها برای جلوگیری از تغییر مکان بیشتر سپر اول در سیستم قرار گرفته اند. لذا می توان خصوصیات مقطع سپر دوم و نیز عمق نفوذ آن را در خاک کاهش داد. با انجام این تحلیل ها می توان پی برد که برای ترمیم سیستم و ایجاد پایداری مجدد در آن استفاده از یک ردیف سپر با خصوصیات نیمرخی قبلی ضرورت ندارد و تنها باعث افزایش هزینه های طرح می گردد. به جای آن می توان تنها یک ردیف سپر جدید با مقطع ضعیف تر در خاک کوبید و از میل مهارهای فعلی نیز استفاده کرد.

تحلیل های دیگری نیز می توان در باره خصوصیات خاک پرکننده بین دو سپر انجام داد. با تعویض بتن بین دو سپر با ماسه، سیستم قادر به تحمل بارهای وارده نمی باشد و در تمام لایه های ماسه، نقاط پلاستیک ایجاد می شود. مدل سازی های بعدی را می توان با تغییر شرایط خاک پی انجام داد. با قرار دادن خاک رس در پی به خصوصیات ذکر شده، سیستم در برابر نیروهای ایجاد شده مقاومت می نماید.

پیشنهادها:

در این پایان نامه به بررسی برخی پارامترها پرداخته شده است. با این حال پارامترهای دیگری نیز وجود دارند که می توان آنها را نیز مورد بررسی قرار داد که در زیر به چند نمونه از آنها اشاره می شود:

- بررسی استفاده از لوله و شمع به جای سپر
- استفاده از نرم افزارهای Geo5، Z-Soil و یا GeoStudio به جای نرم افزار PLAXIS و مقایسه نتایج
- بررسی استفاده از مصالح پرکننده ب غیر از بتن و ماسه
- بررسی استفاده از خاک های دیگر به جز رس و ماسه
- بررسی محیط های دریایی با شرایط متفاوت جزر و مدی

Effect of New Sheet Piling On Behavior of Highly-Corroded Steel Sheet Pile Structures

Abstract

Steel sheet piles driven in harsh marine environments, in some cases are undergone high corrosion in such a way it's not effective to repair them through coating them with retrofitting materials since due to high corrosion rates –commonly happens in splash/tidal zones- the connection between the rod and sheet pile gradually becomes disjointed. It endangers structural safety and causes big displacements in the overall soil- structure system. These displacements in turn cause failure in the soil behind sheet pile wall. In this condition –in which the sheet pile has lost one of its supports and its stiffness had been reduced significantly- application of convenient retrofitting methods for rehabilitation of structural sheet pile performance is not considered to be a suitable procedure.

Generally in sheet pile structures, the main sheet pile wall is highly damaged while the anchorage sheet piles and rods are steel reusable. Driving new sheet piles, it is possible to exploit the advantage of anchorage system completely and main sheet pile wall relatively and therefore the economic considerations could be taken into account. New innovation aspect of this research is to consider the joint (simultaneous) behavior of existing and new sheet piles in bearing applied loads and also behavior of the soil behind wall.

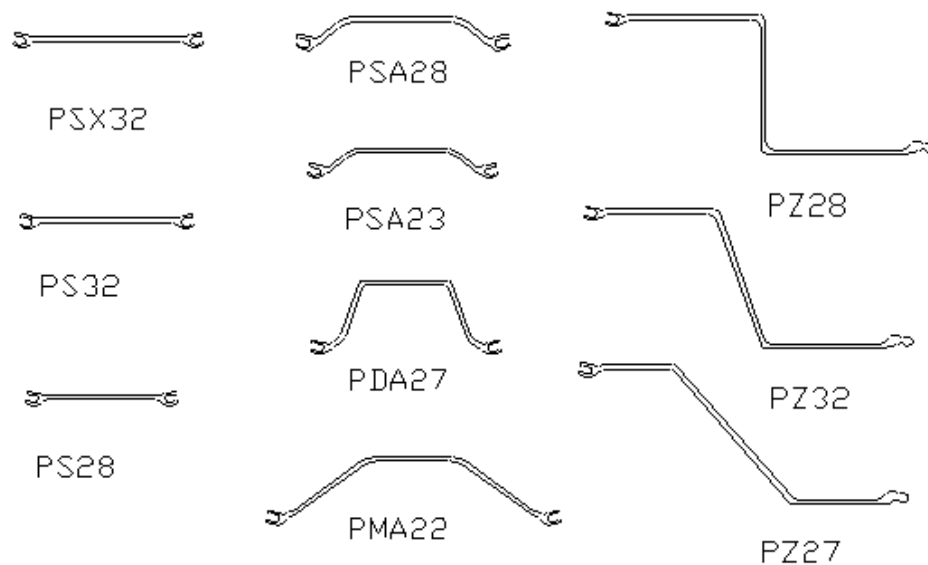
In this research, PLAXIS is used as modeling software. The primary models are created with a row of existing (corroded) sheet piles anchored with tie rods of different reduced cross sections in the location of connection due to corroding ambient. It gives the critical amount of corrosion in tie rod cross section. The next model is created with the previous existing sheet piles, tie rods of critical reduced cross section and a row of new (auxiliary) sheet piles –having two-thirds of cross sectional strength properties of the existing sheet piles. In this case it is examined if new sheet piling can limit displacements and stresses in existing soil- sheet pile system.

Keywords: corrosion, steel sheet pile, soil, anchor, displacement

ضمیمه ۱- برخی مشخصات سپرها

ض ۱-۱- فهرست اصطلاحات فنی و شناسایی سپرها

تولید کنندگان ایالات متحده، خصوصیات مقاطع سپر را استاندارد کرده اند به طوری که بتوانند بدون مراجعه به محصول یک تولید کننده خاص، آن را مشخص کنند. این شناسایی شامل "P" (شمع) و "Z" (نوع یا شکل) و "27" (وزن) یا PZ-27 می شود. اشکال قوسی یا مسطح به شیوه مشابهی تشریح شده اند. تولید کنندگان غیر امریکایی و پرداخت سرد، سیستم شناسایی متعلق به خودشان را دارند [۱].



شکل ض ۱-۱ [۱۹]

در حال حاضر سیستم جهانی ای برای اصطلاحات فنی سپرها وجود ندارد. اخیراً معمول شده است که ممان خمشی لازم مشخص شود تا دست پیمانکار در انتخاب مقطع و تهیه کننده، باز باشد. این خصوصیت ممان خمشی نباید نا آگاهانه استفاده شود زیرا در بسیاری از طراحی های سپر، اساساً خیز حاکم است [۱].

ض ۱-۲ - سفارش دادن سپر

سپرهای فولادی نیز مانند دیگر محصولات فولادی با مراجعه به یک مشخصات استاندارد سفارش داده می شوند. در ایالات متحده این استاندارد توسط جامعه امریکایی آزمایش مواد (*ASTM*) منتشر می شود [۱].

این مشخصات، فرایند تولید فولاد، الزامات شیمیایی و حداقل مقاومت تسلیم و نهایی را پوشش می دهد. تحویل سپرها بر مبنای مشخصات *ASTM A-6* انجام می گیرد. مشخصات *ASTM A-6*، رواداری های قفل و بست ها، مستقیم بودن و مقاومت قفل و بست را پوشش نمی دهد [۱].

دیگر مشخصات به شرح زیرند:

- مشخصات کانادایی *CSA 44 W, CAST 44W/70*
- مشخصات بریتانیایی *BS4360* ، در رده های مختلف
- مشخصات اروپایی: *ST SP 37; ST SP 45; ST SP 5* [۱]

ض ۱-۳ - قفل و بست

برخی انواع قفل و بست (اتصال) ها در این قسمت تشریح شده است:

۱- **اتصال کام و زبانه انگشتی:** این اتصال هنگامی که در معرض خمش قرار گیرد، سه نقطه تماس بین المان های اتصال ایجاد می کند که نه تنها دلیلی بر مقاومت بالای این اتصالات است بلکه یک درزگیری دوگانه نیز در برابر ورود آب یا تراوش خاک فراهم می نماید. این مقاومت گسترش یافته با بذل توجه در رواداری های ابعادی از پیش تعیین شده زبانه و بازشو شیاری بین کام و زبانه انگشتی، در کارخانه کنترل می شود. ابعاد انگشتی نیز مهم است زیرا این المان نباید جاری شود یا اجازه دهد که زبانه بچرخد یا به خارج از قفل و بست بلغزد [۶].

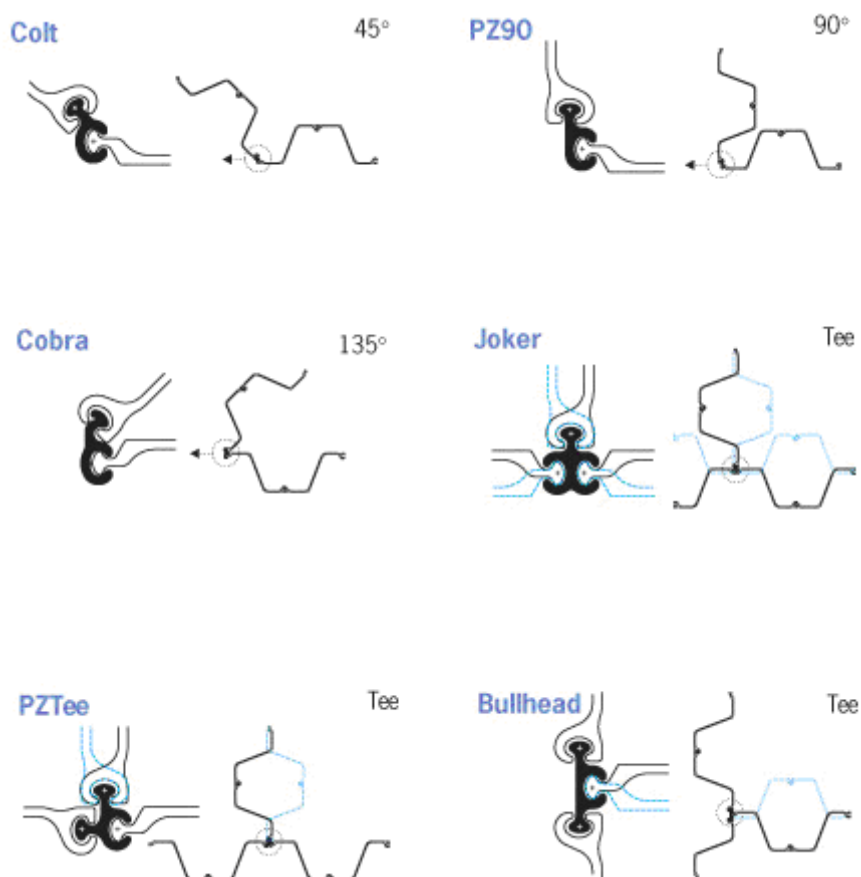
۲- **اتصال کام و زبانه توپی:** این اتصال در ایالات متحده و برخی سپرهای Z شکل دیده می شود. طرح اصلی به طراحی لمپ یا رنسام بر می گردد. اتصالات جدید کام و زبانه توپی برای «ایجاد وجه تمیز و صاف در دیوار، قرار دادن فلز در جایی که بیشترین بازده مقاومتی را داراست، درزگیری مؤثر در برابر تراوش، و برای قلاویز کردن آسان در حین کوبش» طراحی شده است. این هدف تمام تولید کنندگان است. اگر توپی این اتصال زودتر کوبیده شود، مسیر حدقه (*socket*) را باز می کند [۶].

۳- **اتصالات فکی:** اتصالات فکی تک موجود در برخی مقاطع Z شکل اروپایی همانند اتصالات کام و زبانه توپی اما با محیط زاویه ای به جای بیضوی است. به نظر می رسد که با اعمال کنترل جدی بر ابعاد و صاف بودن محصول، این اتصالات که فضای چفت و فشرده تر و مناسبی دارند، مشکلات کمتری در هنگام نصب ایجاد کرده و در همان حال در برابر ورود آب نیز درزگیری مطلوبی به دست می دهند [۱۹].

طرح اتصالات دو فکی یا فکی دابل که در برخی سپرهای Z شکل اروپایی و ژاپنی یافت می شود، طرحی منحصر به فرد است که شاید برای تمام گوشه های دیوار، مزایای دیگری نیز داشته باشد. وقتی دیوارهای Z شکل کام و زبانه در هم درگیر می شوند، باید حتماً یک مقطع گوشه ای تولید شده ویژه نیز در کنار آنها فراهم شود. تولید کنندگان اتصالات فکی دابل قادرند یک میله اتصال سازه ای ساده و گرم نورد شده عرضه کنند که اساساً یک دسته با دو زبانه است [۶].

۴- **اتصالات قلاب و چنگک:** این اتصالات در تمام سپرهای سرد نورد شده و در هر دو نوع Z و قوسی به کار می رود. این اتصال با خم کردن لبه های مقطع در حین یکی از عبورهای پایانی از درون غلتک های نورد سرد شکل می گیرد. عده ای دوام درازمدت این اتصال برای کاربردهای مکرر موقتی را زیر سؤال برده اند [۱۹].

با استفاده از انواع اتصالات یاد شده می توان به اشکال مختلف گوشه های دیوار دست یافت که تعدادی از آنها در شکل زیر برای مقاطع Z شکل دیده می شود.



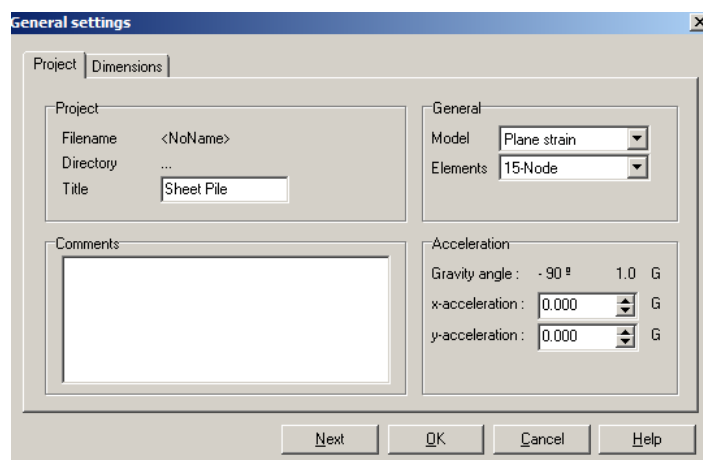
شکل ض ۱-۲- اشکال مختلف گوشه ای دیوار سپر [۲۰]

ضمیمه ۲- نحوه مدل سازی در نرم افزار PLAXIS

نرم افزار PLAXIS از منوها و نوار ابزارهایی تشکیل شده است که کار مدل سازی و تحلیل سازه ها با استفاده از آنها صورت می گیرد و در طی مراحل مدل سازی یک سپر فولادی آشنایی مختصری با آنها حاصل خواهد شد. مراحل کلی مدل سازی در زیر تشریح شده است.

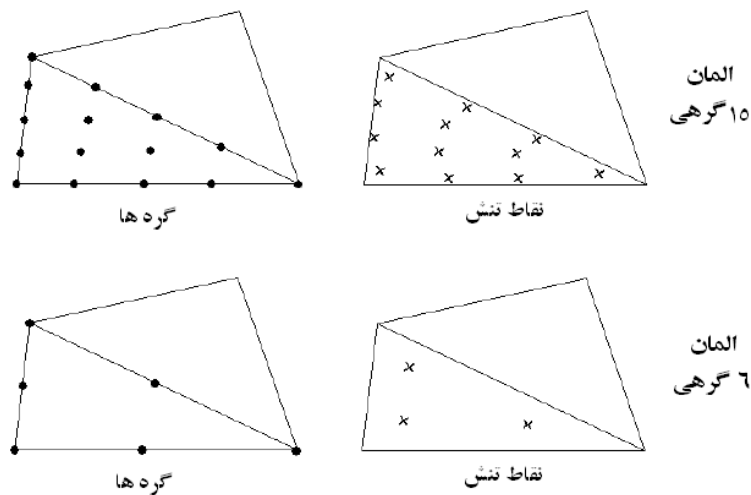
۳-۱۱-۱- معرفی تنظیمات کلی سازه به نرم افزار

این پنجره دارای دو تب *Project* و *Dimensions* می باشد.



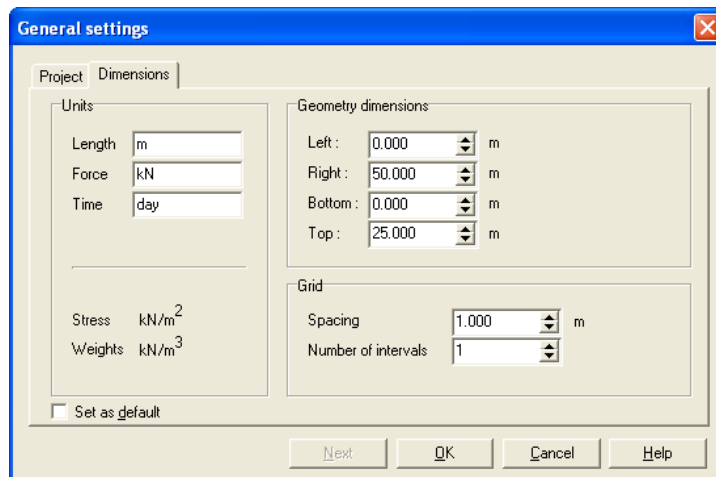
شکل ض ۱-۲- تنظیمات کلی

- در تب *Project* و در جعبه *General* دو گزینه *Axisymmetric* (متقارن محوری) و *Plain Strain* (کرنش صفحه ای) موجود است. در طراحی سپرها (به علت ممتد بودن دیواره سپر و فرض رفتار کرنش مسطح برای آن) باید گزینه دوم انتخاب شود.
- از آنجا که *PLAXIS* یک برنامه تحلیل اجزای محدود است، در این قسمت نوع المان ها (۶ گرهی مثلثی و ۱۵ گرهی مثلثی) به نرم افزار معرفی می شود. واضح است که المان ۱۵ گرهی دقت بیشتری به تحلیل می دهد. در مدل های آتی از همین نوع المان استفاده شده است. در زیر تفاوت بین المان های ۶ گرهی و ۱۵ گرهی مشاهده می شود [۱۷].



شکل ض ۲-۲- گره ها و نقاط تنش

- در جعبه *Acceleration*، مؤلفه های شتاب زمین (جهات x و y) در هنگام زلزله به نرم افزار معرفی می گردد که مختص تحلیل های دینامیکی است و موضوع این پروژه نمی باشد.
- در تب *Dimensions* ابعاد کلی سازه، فاصله بین خطوط شبکه (گرید ها) و نیز واحدها معرفی می گردد.



شکل ض ۳-۲- تب Dimension

محدوده سازه تا جایی در نظر گرفته می شود که شرایط مرزی مسئله (تکیه گاه تعریف شده برای مرزها) تأثیری بر نتایج سیستم نداشته باشد [۱۷].

۳-۱۱-۲- رسم سازه

پس از تکمیل و کلیک کردن بر روی دکمه OK، اکنون می توان به رسم سازه اقدام نمود.

۳-۱۱-۲-۱- خطوط و نقاط

رسم خطوط و نقاط با استفاده از ابزار *Geometry Line* انجام می شود. از خطوط برای مشخص کردن نواحی مختلف و لایه های خاک استفاده می گردد.


۳-۱۱-۲-۲- تیرها (دیوارها و صفحات)

تیرها اعضای سازه ای هستند که برای مدل کردن سازه های لاغر داخل زمین و با سختی خمشی قابل ملاحظه و سختی نرمال به کار می روند. تیرها از اعضای تیری با سه درجه آزادی در هر گره تشکیل یافته اند: دو درجه آزادی انتقالی u_x و u_y و یک درجه آزادی چرخشی در صفحه $x-y$. اگر از المان ۶ گرهی خاک استفاده شود، آنگاه المان های تیری دارای سه گره و اگر از المان ۱۵ گرهی خاک استفاده شود، دارای ۵ گره خواهند بود. المان های تیری مطابق با تئوری میندلین می توانند علاوه بر تغییر شکل های خمشی، تغییر شکل برشی نیز داشته

باشند. همچنین اگر بار وارد به تیر، محوری باشد، می توانند تغییر طول نیز بدهند. با رسیدن لنگرهای خمشی یا نیروهای محوری به مقدار حداکثر، تغییر شکل های خمیری نیز حادث می گردند. [۱۷]

در مدل سازی های آینده، طول سپر که از نوع تیر تعریف می شود، ۱۵ متر بوده و عمق قرار گرفته آن در خاک پی، ۶ متر می باشد. این عمق، عمق کافی برای فرض گیرداری را برآورده می سازد.


۳-۱۱-۲-۳ - فصل مشترک

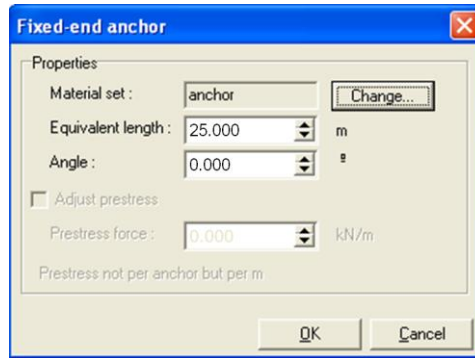
 فصل مشترک ها در مدل سازی اندرکنش بین خاک و سازه کاربرد دارند. پس از استفاده از گزینه فصل مشترک، در همان سمتی از مدل که این ابزار به کار رفته، خط چینی ایجاد می شود که نشان دهنده اعمال فصل مشترک می باشد. فصل مشترک را می توان در دو وجه سازه نیز به کار برد که در این صورت اندرکنش کامل بین اعضای خطی سازه ای و خاک پیرامون آنها ایجاد می گردد [۱۷].

کاربرد معمول فصل مشترک در مدل سازی اندرکنش بین سپرها و خاک است که حالتی میانگین بین بسیار صاف و بسیار زیر دارد. در این گونه موارد فصل مشترک در هر دو وجه دیوار سپر اعمال می گردد. میزان زبری اندرکنش با انتخاب مقدار مناسب برای ضریب کاهش مقاومت فصل مشترک مدل سازی می شود. این ضریب، مقاومت فصل مشترک (اصطکاک دیوار و پیوستگی) را به مقاومت خاک (زاویه اصطکاک و چسبندگی) مربوط می سازد [۱۷].

فصل مشترک ها از اعضای فصل مشترکی تشکیل یافته اند. اگر از المان ۶ گرهی خاک استفاده شود، آنگاه المان های فصل مشترک دارای سه جفت گره و اگر از المان ۱۵ گرهی خاک استفاده گردد، دارای ۵ جفت گره خواهند بود.

۳-۱۱-۲-۴ - مهارهای انتها - گیردار (Fixed-End Anchor)

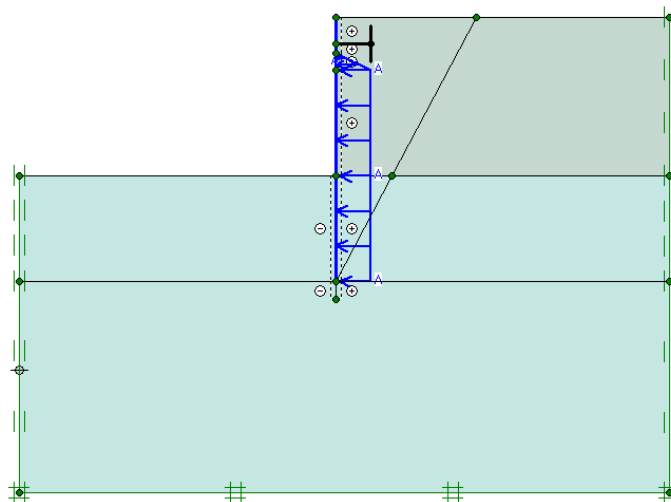
 این مهارها فنرهایی هستند که برای مدل سازی مهاربندی تک نقطه ای کاربرد دارند. مثالی از این نوع مهارها، مدل سازی *strut* ها (*prop* ها) در دیوارهای سپر می باشد. مهارهای انتها- گیردار با حرف *T* دوران یافته نشان داده می شوند و همیشه به یک خط موجود در مدل وصل می شوند اما نه الزاماً به یک نقطه موجود. در هنگام رسم این مهار، پنجره زیر ظاهر می شود:



شکل ض ۲-۴- مشخصات مهارهای انتها- گیردار

در این پنجره می توان زاویه دلخواهی برای مهار تعیین نمود که جهت مثبت آن در جهت پادساعتگرد است. همچنین طول معادل (*Equivalent Length*)، فاصله بین نقطه اتصال مهار و یک نقطه موهومی در امتداد طولی مهار است که در آن، تغییر مکان صفر فرض می شود [۱۷].

طول معادل مهار در مدل های آتی برابر با ۲۵ متر و زادیه آن با افق صفر می باشد. در انتهای میل مهار در عمل از یک سپر به عنوان مهار یا *Deadman* استفاده می شود که گیرداری انتهای آن را تضمین می نماید. مهار با انتهای گیردار یک شبیه سازی از این نوع گیرداری می باشد.




شکل ض ۲-۵- مدل اولیه سیستم

۳-۱۱-۳ - شرایط مرزی و بارها


پس از رسم مدل سازه (محدوده، لایه های مختلف خاک، سپرها، مهارها و ...) لازم است شرایط مرزی به مدل اعمال گردد. برای مسائل تغییر شکل، دو نوع شرایط مرزی اولیه وجود دارد: تغییر مکان از پیش تعیین شده و نیروها (بارها)ی از پیش تعیین شده. اصولاً تمام مرزها در هر جهت باید یک شرط مرزی داشته باشند در غیر این صورت در هر جهتی که شرط مرزی تعریف نشده باشد، نرم افزار شرط مرزی طبیعی (مرز آزاد) را در نظر می گیرد [۱۷].

۳-۱۱-۳-۱ - گیرداری استاندارد (Standard Fixity)

 گیرداری استاندارد، محیط پیرامونی مدل را کاملاً ثابت و بدون حرکت می نماید. در این صورت تمام نقاط پیرامونی مدل دارای تغییر مکان صفر خواهند بود. این مشخصه در بسیاری از مدل ها کاربرد دارد.

از آن جا که محدوده تعریف شده برای مدل های آتی تا مسافتی ادامه یافته که شرایط موجود در مرز، تأثیر عمده ای بر تنش ها و تغییر شکل های ناحیه مورد مطالعه ندارند، می توان از گزینه گیرداری استاندارد برای شبیه سازی شرایط مرزی استفاده کرد که در آن فرض می شود در مرزها هیچگونه جابجایی و تغییر شکلی وجود ندارد و بارگذاری موجود در سیستم، مرزها را تحت تأثیر قرار نمی دهد [۱۷].

۳-۱۱-۳-۲ - بارهای سطحی (Tractions)

 این بارها، بارهای گسترده ای هستند که بر خطوط موجود در مدل اعمال می شوند و واحد آنها نیرو بر واحد سطح است. دو سیستم بارگذاری برای ترکیب بارهای سطحی وجود دارد (سیستم های A و B) که می توانند به طور مستقل از هم فعال شوند. ورودی بارهای سطحی مانند رسم خطوط است. پنجره مربوط به بارهای سطحی همانند پنجره تغییر مکان های از پیش تعیین شده است.

مقدار اعمالی بارهای سطحی در طی تحلیل برابر با حاصل ضرب مقادیر ورودی در ضریب بار متناظر می باشد. بارهای سطحی به وسیله ضرایب بار $MloadA$ (یا $\Sigma MloadA$) و $MloadB$ (یا $\Sigma MloadB$) کنترل می شوند.

در مدل های آتی از هر دو سیستم A و B برای بارگذاری استفاده شده است. سیستم A برای شبیه سازی فشار آب وارد بر سپر (بار جانبی) به کار می رود و سیستم B نیز برای شبیه سازی بارهای سرویس (بارهای قائم وارد بر خاک پشت سپر).

ضرایب بار یاد شده در هنگام تحلیل مدل به نرم افزار معرفی می گردند و در فصل بعد معرفی می شوند. معمولاً مقدار بار اعمالی به مدل برابر یک در نظر گرفته می شود و با اعمال ضریب بار، مقدار آن تا مقدار واقعی

افزایش می باید. بدین ترتیب برنامه، بار را یکجا و به صورت لحظه ای به مدل اعمال نمی کند بلکه میزان آن را طی گام هایی از صفر تا مقدار مورد نظر افزایش می دهد. با این روش، شرایط بارگذاری مسئله به شکل واقعی تری تعریف می شود. تعداد گام ها نیز بستگی به شکل مدل و میزان پیچیدگی آن (مش بندی، المان های سازه ای، میزان ضریب بار و ...) دارد [۱۷].

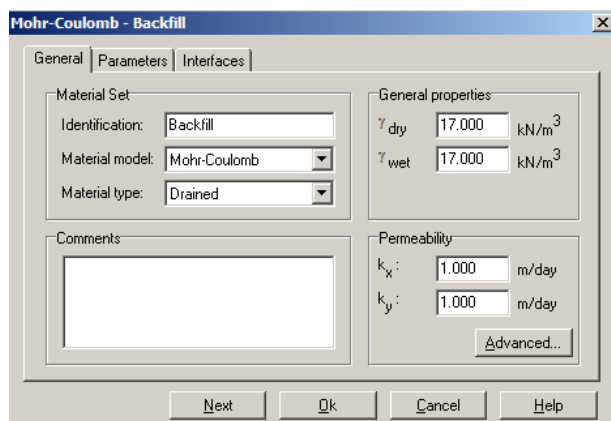
ضریب بار برای سیستم های A و B به ترتیب ۱۰ و ۵ تن بر متر مربع در نظر گرفته شده است.

۳-۱۱-۴ - خصوصیات مصالح

اکنون باید مشخصات هر کدام از اعضا و مؤلفه های موجود در مدل (لایه های خاک، صفحات، سپرها، مهارها) به نرم افزار معرفی گردد. ابزار مورد نیاز در اینجا *Material sets* می باشد.

۳-۱۱-۴-۱ - خاک

خصوصیات مختلف و مورد نیاز خاک برای مدل سازی در شکل زیر به چشم می خورد. پنجره خصوصیات خاک دارای سه تب *General*، *Parameters* و *Interface* می باشد.



شکل ض ۲-۶- تب *General*

تب *General*: در این تب قسمت های مختلفی وجود دارد که به ترتیب معرفی می گردد.

الف - مدل مصالح (*Material Model*): این گزینه شامل ۵ مدل می باشد:

Linear Elastic: تنها خصوصیات مورد نیاز در این مدل، مدول یانگ E و نسبت پواسون ν می باشد و مدل مناسبی برای بررسی رفتار پیچیده خاک نمی باشد.

Mohr-Coulomb (MC): مدل الاستو پلاستیک موهر- کولمب شامل ۵ پارامتر می باشد: E و ν برای الاستیسیته خاک، ϕ و c برای پلاستیسیته خاک و ψ به عنوان زاویه اتساع. مدل موهر- کولمب یک تقریب «مرتب اول» از رفتار خاک و سنگ به دست می دهد. توصیه می شود که این مدل تنها برای تحلیل اولیه مسئله مورد مطالعه استفاده گردد. برای هر لایه، یک سختی متوسط ثابت در نظر گرفته می شود. به علت همین سختی ثابت، محاسبات با سرعت بسیار بالایی انجام می شود و کاربر می تواند به یک درک اولیه از تغییر شکل ها دست یابد. این مدل حالات تنش در شکست در شرایط زهکشی شده را نسبتاً به خوبی تشریح می نماید.

Soft Soil Model: این مدل یک مدل نوع کم- کلی می باشد که برای شبیه سازی رفتار خاک های نرم مانند رس ها و تورب های عادی تحکیم یافته به کار می رود. این مدل در شرایط تراکم اولیه، بهترین عملکرد را داراست.

Hardening Soil Model (HS): مدل سخت شونده خاک مدل بسیار پیشرفته تری از مدل موهر- کولمب است. همانند مدل موهر- کولمب، حالت های محدود شده تنش به وسیله زاویه اصطکاک داخلی، ϕ ، چسبندگی، c ، و زاویه اتساع، ψ تشریح می شود. سختی خاک با استفاده از سه سختی ورودی متفاوت، به شکل بسیار دقیق تری محاسبه می گردد: سختی بارگذاری سه محوری یا E_{50} ، سختی باربرداری سه محوری یا E_{ur} و سختی بارگذاری اوندومتر یا E_{oed} . [۱۸]

Soft Soil Creep Model (SSC): مدل سخت شونده کرنش یاد شده برای تمام خاک ها مناسب است اما اثرات گرانروی (ویسکوزیته) و به عبارت دیگر، خزش و تخفیف تنش را مد نظر قرار نمی دهد. در واقع کلیه خاک ها مقداری خزش از خود نشان می دهند و بنابراین در آنها پس از تراکم اولیه، یک تراکم ثانویه حادث می شود. مورد اخیر حالت غالب در خاک های نرم؛ یعنی رس ها، سیلت ها و تورب عادی تحکیم یافته می باشد و بنابراین مدلی تحت عنوان مدل خزش خاک نرم ساخته شده است [۱۸].

در این پایان نامه به علت سادگی مدل موهر- کولمب و در دسترس بودن اطلاعات مورد نیاز برای آن، از این مدل برای خاک استفاده شده است.

ب- نوع مصالح: شامل سه گزینه *Drained* (زهکشی شده)، *Undrained* (زهکشی نشده) و *Non-porous* (غیر متخلخل) می باشد.

Drained: در حالت زهکشی شده، هیچ تنش حفره ای اضافی ای ایجاد نمی شود. این حالت در خاک های خشک و نیز در زهکشی های کامل ناشی از نفوذ پذیری بالا (ماسه) و یا سرعت پایین بارگذاری، غالب است. می

توان از گزینه زهکشی شده برای شبیه سازی رفتار درازمدت خاک استفاده کرد بدون آنکه نیازی به مدل سازی تاریخچه دقیق بارگذاری زهکشی نشده در تحکیم باشد.

Undrained: گزینه زهکشی نشده برای توسعه کامل فشارهای حفره ای اضافی کاربرد دارد. گاهی اوقات می توان از جریان آب حفره ای به دلیل نفوذ پذیری پایین (رس) و یا نرخ سریع تحکیم صرفنظر نمود.

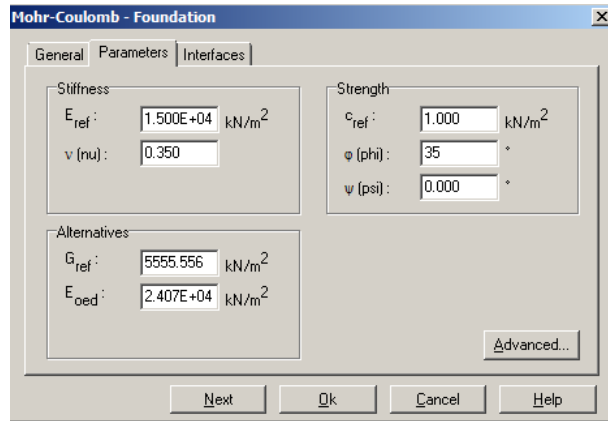
Non-porous: گزینه غیر متخلخل برای حالاتی کاربرد دارد که فشارهای حفره ای اولیه و اضافی در توده های خاک در نظر گرفته نمی شوند. کاربردهای این گزینه را می توان در مدل سازی رفتار بتن و سنگ یا اعضای سازه ای یافت. معمولاً رفتار غیر متخلخل در ترکیب با مدل الاستیک خطی به کار می رود. با انتخاب حالت غیر متخلخل، پارامترهای k_x و k_y (نفوذ پذیری در دو جهت) غیر فعال می شوند.

گزینه غیر متخلخل را می توان برای فصل مشترک ها نیز به کار برد. به منظور مسدود کردن کامل جریان آب از درون دیوار سپرها یا دیگر سازه های نفوذ ناپذیر، فصل مشترک پیرامون می تواند خصوصیات مصالحی جداگانه ای داشته باشد که در آن نوع مصالح غیر متخلخل تعریف شود [۱۸].

در این پایان نامه در یکی از مدل های ابتدایی فشار آب برای سیستم با معرفی یک سطح ایستابی در بالای میل مهار مدل سازی شده است. با توجه به بارگذاری بحرانی در حالت جزر و مدی که در بالا نیز به آن اشاره شد، یکبار نیز بدون معرفی سطح ایستابی و در عوض با مدل سازی حالت بحرانی فشار آب به تحلیل پرداخته می شود. هر یک از این دو حالت که بحرانی تر باشد برای تحلیل های بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. توضیح این نکته نیز لازم است که در حالت اول (معرفی سطح ایستابی) گزینه *Undrained* (زهکشی نشده) برای خاک در نظر گرفته می شود تا فشارهای حفره ای آب تولید گردند. در حالت دوم که بار وارده به صورت بار گسترده روی سپر تعریف می گردد، نیازی به فعال کردن فشارهای آب حفره ای نمی باشد. در نتیجه از گزینه *Drained* (زهکشی شده) استفاده خواهد شد [۱۸].

ج- خصوصیات کلی: وزن مخصوص خشک و مرطوب وارد می شوند.

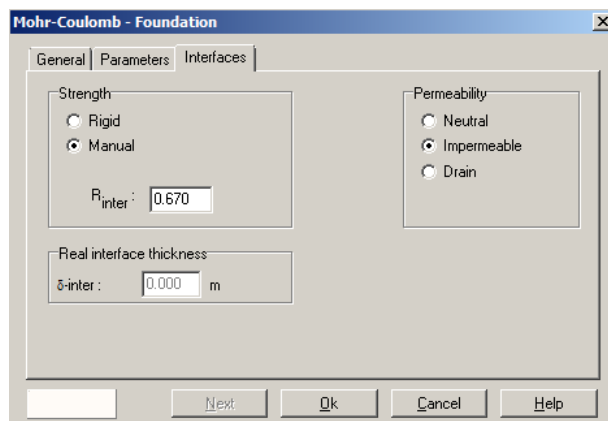
د- نفوذ پذیری: نفوذ پذیری در جهات x و y به نرم افزار داده می شود. نفوذ پذیری برای خاک های ماسه ای که زهکشی در آنها سریع اتفاق می افتد، عددی بالا و برای خاک های رسی عددی پایین است. در مدل هایی که تراز سطح آب معرفی نمی شود، تعیین دقیق مقدار این پارامتر، ضروری نمی باشد.



شکل ض ۲-۷- تب Parameters

تب *Parameters*: گزینه های موجود در این تب با توجه به مدل انتخابی برای خاک متغیر است. در اینجا تنها به گزینه های مربوط به مدل موهر- کولمب پرداخته می شود [۱۸].

همان طور که پیش از این نیز گفته شد مدل الاستو پلاستیک موهر- کولمب شامل ۵ پارامتر می باشد: E (ضریب الاستیسیته) و ν (ضریب پواسون) برای الاستیسیته خاک، c (چسبندگی) و ϕ (زاویه اصطکاک داخلی) برای پلاستیسیته خاک و ψ به عنوان زاویه اتساع.



شکل ض ۲-۸- تب Interface

تب *Interface*: برای تشریح رفتار فصول مشترک در مدل سازی اندرکنش خاک- سازه، از یک مدل الاستیک- پلاستیک استفاده شده است. خصوصیات مقاومتی فصول مشترک وابسته به خصوصیات مقاومتی لایه خاک است. هر مجموعه داده ای دارای یک ضریب کاهش مقاومت مربوطه برای فصول مشترک می باشد (R_{inter}). خصوصیات

فصل مشترک از روی خصوصیات خاک در مجموعه دادهٔ مربوطه و ضریب کاهش مقاومت با اعمال قوانین زیر محاسبه می گردند:

$$c_i = R_{inter} c_{soil}$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil} \leq \tan \varphi_{soil}$$

$$\psi_i = 0^\circ \text{ for } R_{inter} < 1, \quad \psi_i = \psi_{soil} \text{ for } R_{inter} \geq 1$$

با استفاده از گزینه های زیر می توان مقاومت فصل مشترک را تعیین نمود:

Rigid: این گزینه زمانی به کار می رود که فصل مشترک نباید بر مقاومت خاک پیرامون تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، فصول مشترک گسترش یافته در اطراف گوشه های اعضای سازه ای تمایلی به اندرکنش خاک-سازه ندارند و نباید خصوصیات کاهش مقاومتی داشته باشند. به این فصول مشترک باید گزینه *Rigid* (صلب) نسبت داده شود (که متناظر با $R_{inter}=1.0$ است). در نتیجه خصوصیات فصل مشترک به استثناء نسبت پواسون، همانند خصوصیات خاک است.

Manual: اگر از گزینه *Manual* (دستی) استفاده گردد، مقدار R_{inter} باید به طور دستی وارد برنامه شود. در حالت کلی برای اندرکنش واقعی خاک-سازه، فصل مشترک، ضعیف تر و انعطاف پذیرتر از لایه خاک مربوطه است؛ به عبارت دیگر R_{inter} کوچکتر از ۱ می باشد. در غیاب اطلاعات کافی، می توان R_{inter} را برای تماس ماسه- فولاد برابر با $\frac{2}{3}$ و برای تماس رس- فولاد برابر با $\frac{1}{2}$ در نظر گرفت.

اگر فصل مشترک الاستیک باشد، وقوع شکاف یا روی هم رفتگی و لغزش محتمل است.

δ_{inter} : ضخامت واقعی فصل مشترک، δ_{inter} ، نشان دهنده ضخامت واقعی ناحیه برشی بین سازه و خاک است. مقدار δ_{inter} تنها وقتی اهمیت دارد که فصل مشترک در ترکیب با مدل سخت شوندگی خاک به کار می رود.

Permeability: فصل مشترک دارای یک نفوذ پذیری برای جریان در امتداد عمود بر فصل مشترک (k_n) و یک نفوذ پذیری برای جریان در راستای فصل مشترک (k_s) می باشد. نفوذ پذیری فصل مشترک با اعمال ضرایب نفوذ پذیری لایه خاک مربوطه تولید می شود.

به جای وارد کردن این مقادیر، می توان از سه گزینه استاندارد *Neutral* (خنثی)، *Impermeable* (نفوذ ناپذیر) و *Drain* (زهکشی) استفاده کرد.

Neutral: این گزینه در مواردی کاربرد دارد که فصل مشترک نباید بر جریان آب در خاک پیرامون تأثیر بگذارد. برای مثال وقتی از فصول مشترک اضافی در اطراف گوشه های المان های سازه ای استفاده می گردد، فصول مشترک نه تمایل به اندرکنش سازه با خاک دارند و نه تمایل به مسدود کردن جریان. به این فصول مشترک باید گزینه *Neutral* نسبت داده شود که معادل مقدار بالای k_n (۱۰۰ برابر نفوذ پذیری خاک) و مقدار صفر k_s است.

Impermeable: از این گزینه وقتی استفاده می شود که لازم است جریان عمود بر فصل مشترک، محدود گردد. برای مثال در هنگام استفاده از تیرها برای مدل سازی دیوار سپر، تیرها به خودی خود، کاملاً نفوذ ناپذیرند. برای آن که دیوار نیز آب بند شود، باید به فصول مشترک اطراف دیوار گزینه *Impermeable* نسبت داده شود که به معنای مقدار پایین k_n (۰/۰۰۱ نفوذ پذیری خاک) و مقدار صفر k_s است.

Drain: این گزینه وقتی به کار می رود که آب آزادانه در امتداد طولی فصل مشترک جریان داشته باشد [۱۸]. خصوصیات مورد استفاده برای کلاسترهای خاک موجود در مدل های فصل بعد در جدول زیر آمده است.

جدول ض ۲-۱- خصوصیات خاک ها

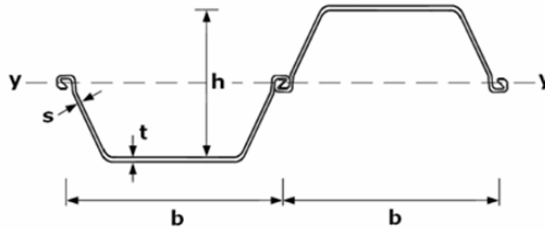
| خاک | γ_d | γ_{wet} | k_x | k_y | E | ν | c | φ | Interface |
|------------|------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-----|-----------|-----------|
| Backfill | 17 | 17 | 1.0 | 1.0 | 1.5E4 | 0.35 | 1.0 | 35 | 0.67 |
| Foundation | 18 | 18 | 1.0 | 1.0 | 5E4 | 0.4 | 1.0 | 37 | 0.67 |
| Concrete | 24 | 25 | 0 | 0 | 1.4E7 | 0.18 | --- | --- | 0.50 |
| Filler | 17 | 17 | 1.0 | 1.0 | 1.5E4 | 0.35 | 1.0 | 35 | 0.67 |
| Clay | 17 | 17 | 1E-5 | 1E-5 | 5E4 | 0.33 | 12 | 22 | 0.5 |

در جدول بالا ضریب کاهنده مقاومت فصل مشترک در خاک های مختلف آمده است.

۳-۱۱-۴-۲- تیرها

خصوصیات تیرها (سپرها) در این قسمت به نرم افزار معرفی می گردد.

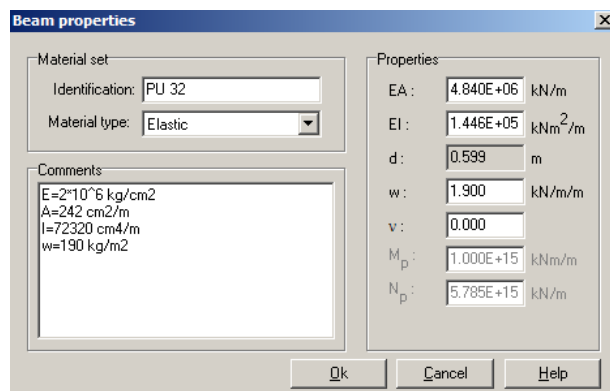
برای سپرهای به کار رفته در این پایان نامه از خصوصیات نیمرخی ارائه شده توسط کارخانه سازنده استفاده شده است. این خصوصیات در شکل (ض ۲-۱۱) آمده اند [۱۷].



| Section | Width Height | | Thickness | | Sectional area cm ² /m | Mass | | Moment of inertia cm ⁴ /m | Elastic section modulus cm ³ /m | Static moment cm ³ /m | Plastic section modulus cm ³ /m | Class* | | | | |
|-----------------------|--------------|---------|-----------|---------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------|---|---|-------------------------------------|---|--------|---|---|---|---|
| | b mm | h mm | t mm | s mm | | kg/m of single pile | kg/m ² of wall | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| PU 12 10/10 | 600 | 360 | 10.0 | 10.0 | 148 | 69.6 | 116 | 22580 | 1255 | 755 | 1535 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| PU 22 ^{-1.0} | 600 | 450 | 11.1 | 9.0 | 174 | 81.9 | 137 | 46380 | 2060 | 1195 | 2422 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| PU 32 | 600 | 452 | 19.5 | 11.0 | 242 | 114.1 | 190 | 72320 | 3200 | 1825 | 3687 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

شکل ض ۲-۹- خصوصیات نیمرخ سپر

با وارد شدن به گزینه خصوصیات تیر پنجره زیر باز می شود که در آن نوع رفتار تیر و خصوصیات مقاومتی آن از کاربر خواسته می شود.



شکل ض ۲-۱۰- مشخصات تیرها

نوع مصالح (Material Type)

نوع مصالح تیر را می توان الاستیک و یا الاستو پلاستیک انتخاب کرد و برنامه بین این دو رفتار تیر، تفاوت قائل شده است. در این پایان نامه از گزینه الاستیک برای مدل سازی تیرها استفاده شده است. فرض بر این است که بارهای وارده، تیر را وارده محدوده پلاستیک نمی کنند. این مطلب پس از تحلیل مدل کنترل می شود [۱۷].

سختی (Stiffness)

برای رفتار الاستیک باید یک سختی محوری (EA) و یک سختی خمشی (EI) به عنوان خصوصیات مصالح تعریف گردد. برای هر دو مدل متقارن محوری و کرنش مسطح، سختی محوری و خمشی به سختی در واحد عرض در امتداد خارج از صفحه مربوط می شوند. از نسبت دو سختی EI و EA در رابطه زیر، یک ضخامت معادل (d_{eq}) برای تیرهای حجیم به طور خودکار محاسبه می گردد:

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (\text{ض } 2-32)$$

در *PLAXIS* برای تیرها مطابق با تئوری میندلین، تغییر شکل های برشی محاسبه می شود (سختی برشی با فرض سطح مقطع مستطیلی تعیین می گردد). این تغییر شکل ها درباره دیوارهای صلب و حجیم، مقادیر درستی به دست می دهند. با این حال ممکن است در المان های نیمرخ های فولادی مانند دیوارهای سپر، مقادیر محاسبه شده، بسیار بزرگ باشند. این موضوع را می توان با قضاوت درباره مقدار d_{eq} بررسی نمود. برای المان های نیمرخ های فولادی، d_{eq} باید حداقل ۱۰ برابر کوچک تر از طول تیر باشد تا ناچیز بودن تغییر شکل های برشی تضمین گردد. در این پروژه طول تیر (ارتفاع سپر) با مقطع *PU32* برابر با ۱۵ متر می باشد. برنامه به طور خودکار میزان d_{eq} را برابر با ۰/۵۵۹ به دست می آورد که این مقدار از طول تیر ۲۷ برابر کوچک تر است و شرط بالا را برآورده می سازد. درباره سپر *PU22* مقدار d_{eq} برابر با ۰/۵۶۶ و برای مقطع *PU12 10/10* برابر با ۰/۴۲۸ می باشد که به ترتیب ۲۶ و ۳۵ برابر از طول سپر (۱۵ متر) کوچک ترند [۱۷].

ضریب الاستیسیته فولاد سپر برابر با $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ در نظر گرفته شده است.

نسبت پواسون

علاوه بر پارامترهای سختی یاد شده، به یک ضریب پواسون، ν ، نیز نیاز است. برای سازه هایی که در امتداد خارج از صفحه نسبتاً انعطاف پذیرند (مثلاً سپرها و دیگر سازه های فولادی)، نسبت پواسون عموماً برابر صفر است. در این پروژه نیز همین مقدار برای ضریب پواسون تیرها در نظر گرفته شده است [۱۷].

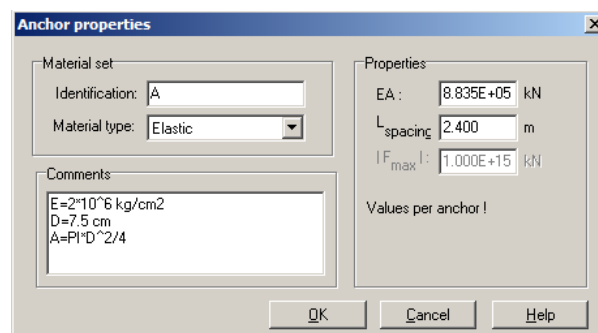
وزن

وزن به صورت وزن واحد طول به برنامه داده می شود. وزن واحد طول سپرها معمولاً توسط تولید کننده ارائه می گردد و می توان همین مقدار را مستقیماً وارد برنامه نمود.

وزن تیرها به همراه وزن خاک توسط پارامتر $\Sigma Mweight$ فعال می شوند [۱۷].

۳-۱۱-۴-۳- مهارها

مهارهای انتها گیردار، المان های فنری هستند. مهم ترین مشخصه مهارها، سختی محوری، EA ، است که در هر مهار و نه در هر واحد عرض، در امتداد خارج از صفحه معرفی می گردد. به منظور محاسبه سختی معادل در واحد عرض، فاصله خارج از صفحه، L_s باید به برنامه معرفی گردد. اگر نوع مصالح، الاستو پلاستیک انتخاب شود، می توان حداکثر نیروی مهار، F_{max} (باز هم در واحد مهار) را وارد نمود. در این حالت نیز برای محاسبه حداکثر نیروی مناسب در تحلیل کرنش مسطح می توان حداکثر نیروی مهار را بر فاصله خارج از صفحه تقسیم نمود [۱۷].



شکل ض ۲-۱۱- مشخصات مهارها

قطر میل مهار در این پروژه برابر با $75mm$ و ضریب الاستیسیته فولاد آن برابر با $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ در نظر گرفته شده است. فاصله مهارها از هم $2.4m$ می باشد.

پس از آن که مجموعه خصوصیات مصالحی هر کدام از المان ها مشخص شد، باید آنها را توسط درگ کردن از داخل پنجره *Material setes*، به داخل صفحه و به المان مربوطه مرتبط ساخت.

۳-۱۱-۵- گسسته سازی (Mesh Generation)

برای انجام محاسبات اجزای محدود، هندسه باید به المان هایی تقسیم گردد. این کار گسسته سازی اجزای محدود نامیده می شود. همان طور که پیش از این اشاره شد، المان های اولیه، المان های ۶ گرهی مثلثی

و ۱۵ گرهی مثلثی هستند. علاوه بر این المان ها، المان های خاص دیگری برای رفتار سازه ای وجود دارند که در بخش های ض ۲-۲ تا ض ۶-۲ معرفی گردیدند. PLAXIS اجازه می دهد تا یک گسسته سازی کامل خودکار ایجاد شود [۱۷].

ایجاد شبکه (*Mesh*) بر اساس یک روش قوی مثلث سازی است که منجر به ایجاد شبکه های «غیر سازه ای» می گردد. این شبکه ها ممکن است نامنظم به نظر آیند اما عملکرد عددی چنین شبکه هایی معمولاً بهتر از شبکه های منظم «سازه ای» است [۱۷].

ورودی مورد نیاز برای شبکه سازی یک مدل متشکل از نقاط، خطوط و کلاسترها است که کلاسترها (نواحی بسته محصور شده با خطوط) به طور خودکار در طی ساختن هندسه مدل ایجاد می شوند [۱۷].

با فشردن دکمه *Mesh Generation*، گسسته سازی آغاز می گردد. پس از اتمام گسسته سازی، برنامه خروجی (*Output Program*) شروع به کار کرده و تصویری از شبکه ظاهر می شود.

۳-۱۱-۵-۱ - درشتی کلی (*Global Coarseness*)

گسسته ساز نیاز به یک پارامتر کلی گسسته سازی دارد که متوسط اندازه المان، l_e را نشان دهد. در PLAXIS این پارامتر از روی ابعاد خارجی هندسه؛ یعنی x_{min} ، x_{max} ، y_{min} ، y_{max} (شکل ۵) و تنظیمات درشتی کلی محاسبه می شود.

۵ اندازه بندی مختلف برای درشتی کلی وجود دارد: خیلی درشت، درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز. گزینه درشت به عنوان پیش فرض انتخاب شده است. متوسط اندازه المان و تعداد المان های ایجاد شده به این تنظیمات درشتی کلی بستگی دارد [۱۷].

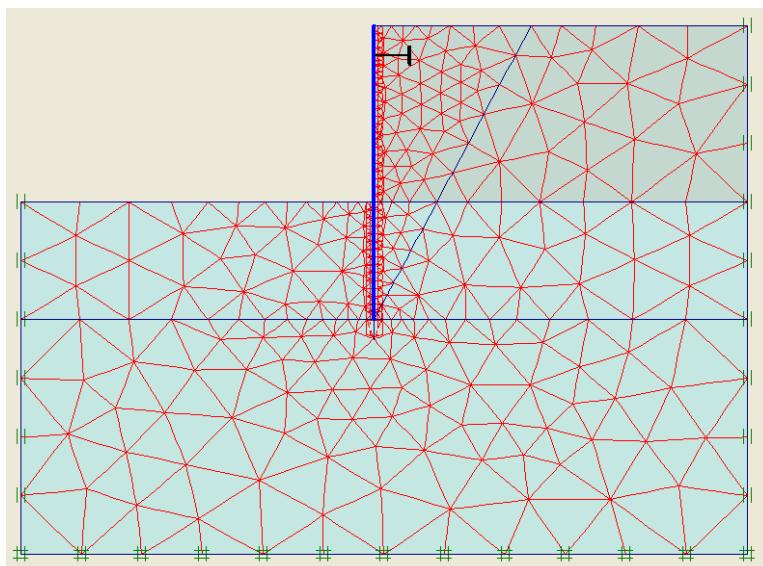
۳-۱۱-۵-۲ - تصحیح کلی (*Global Refinement*)

می توان شبکه اجزای محدود را با انتخاب گزینه *Refine Global* از زیر منوی *Mesh* تصحیح کلی نمود. با انتخاب این گزینه، پارامتر درشتی کلی یک پله بالاتر می رود (برای مثال از درشت به متوسط) و شبکه مستقیماً ایجاد می گردد [۱۷].

۳-۱۱-۵-۳ - تصحیح محلی (*Local Coarseness*)

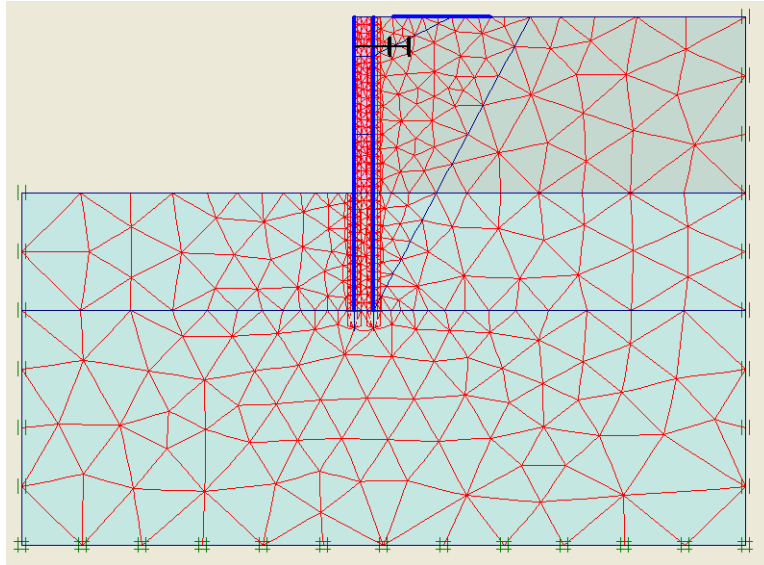
در نواحی ای که تمرکز تنش و یا تغییرات تغییر شکل محتمل است (برای مثال در گوشه های یا لبه های المان های سازه ای یا ناحیه بین دو سپر)، بهتر آن است که از شبکه اجزای محدود دقیق تر (ریزتر) استفاده شود در حالی که ممکن است در دیگر قسمت های هندسه، نیازی به شبکه ریز نباشد. گزینه *Local Coarseness* به همین منظور در برنامه گنجانده شده است. پارامتر *Local Coarseness* یک ضریب اندازه محلی المان است که در هر نقطه هندسه یافت می شود. این ضریب شاخصی از نسبت اندازه المان به اندازه متوسط المان می دهد [۱۷].

در مدل های آتی ابتدا از گزینه متوسط (*Medium*) برای اندازه مش بندی استفاده شده و سپس در جاهایی که نیاز به تصحیح وجود دارد (مانند نواحی اطراف سپرها و بارهای وارده) از تصحیح محلی برای دقیق تر شدن مش بندی استفاده گردیده است. نحوه مش بندی مدل در شکل زیر نشان داده شده است.

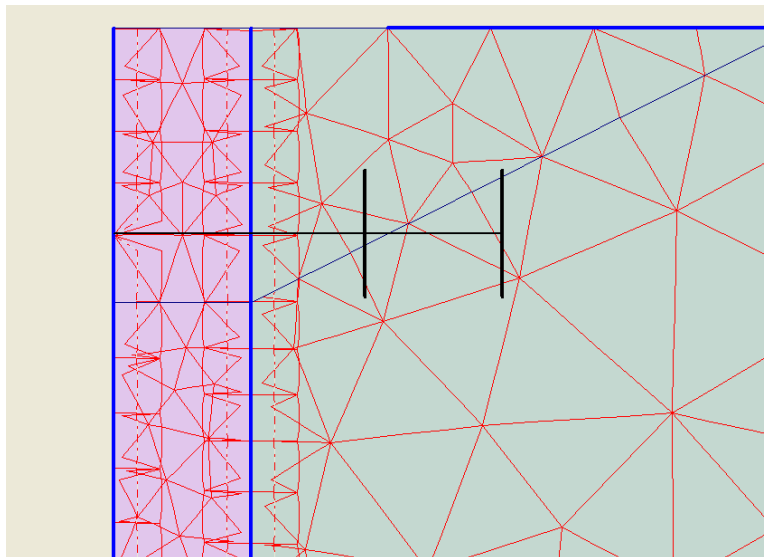


شکل ض ۲-۱۲- مش بندی مدل اولیه

شکل بالا مربوط به مش بندی مدل های اولیه با یک سپر است. مدل دارای ۵۳۵ المان می باشد که این المان ها در نواحی اطراف دیوار سپر، ریزتر شده اند. همچنین برای آن که ناحیه مربوط به گوه گسیختگی نیز به طور دقیق تر بررسی شود، خطی با زاویه $45+\varphi/2$ نسبت به افق از پایین دیوار رسم شده و تا بالای خاکریز ادامه یافته است. مش بندی در این ناحیه نیز اصلاح شده است.



(الف) نمای کلی



(ب) فاصله بین دو سپر

شکل ض ۲-۱۳- مش بندی مدل، الف- نمای کلی، ب- فاصله بین دو سپر

شکل های بالا نیز مربوط به مدل های بعدی با دو سپر می باشد که فاصله بین آنها با بتن پر شده است. اصلاحات این مورد شامل اصلاح مش بندی در ناحیه بین دو سپر می باشد. در شکل بالا نحوه المان بندی فصل مشترک نیز دیده می شود.

۳-۱۱-۶- شرایط اولیه (Initial Condition)

پس از آن که هندسه مدل، برپا و گسسته سازی انجام شد، حال باید حالت تنش اولیه و شرایط اولیه مشخص گردد. این کار با وارد شدن به بخش *Initial Conditions* از برنامه ورودی امکان پذیر است. *Initial Conditions* دو مود مختلف دارد: یک مود برای تولید فشارهای اولیه آب (مود شرایط آب) و دیگری برای مشخص نمودن وضعیت اولیه هندسه و تولید میدان تنش مؤثر اولیه (مود وضعیت هندسه).

به راحتی می توان بین این دو مد جابجا شد [۱۷].

۳-۱۱-۶-۱- غیر فعال سازی مؤلفه های هندسه

این قابلیت برای شبیه سازی ساخت مرحله ای (*Staged Construction*) سازه ها بسیار مفید است و ابزار قدرتمندی به شمار می رود. پروژه هایی که در آنها خاکریزها یا سازه ها مدل هندسه را می سازند، شامل برخی مؤلفه ها (کلاسترها، تیرها و مهارها) خواهند بود که در ابتدا فعال نیستند. این مؤلفه ها باید در وضعیت اولیه هندسه غیر فعال شوند. مطابق پیش فرض تمام مؤلفه های هندسه مدل فعالند. غیر فعال سازی مؤلفه ها با یک بار کلیک کردن بر روی مؤلفه در مدل هندسه صورت می گیرد. فصل مشترک ها همیشه به همراه خاک مجاور خود فعال و غیر فعال می شوند و نمی توانند به تنهایی غیر فعال باشند. کلاسترهای غیر فعال با رنگ پس زمینه (سفید)، و عناصر سازه ای غیر فعال با رنگ خاکستری نمایش داده می شوند. با کلیک کردن مجدد بر روی مؤلفه های غیر فعال می توان بار دیگر آنها را فعال نمود [۱۷].

اگر خاک یا سازه هایی که مهارها به آنها متصل هستند، فعال شوند، مهارها هم فعال می شوند در غیر این صورت به طور خودکار توسط برنامه غیر فعال باقی می ماند. اگر بارها یا تغییر مکان های از پیش تعیین شده بر روی بخش غیر فعالی از هندسه عمل کنند، آنگاه این شرایط در طی محاسبات اعمال نمی گردند [۱۷].

نحوه فعال و غیر فعال شدن اجزای مدل و روش ساخت مرحله ای در بخش بعد مفصلاً تشریح خواهد شد.

۳-۱۱-۶-۲- تغییر داده های تنظیمات مصالح

با دو بار کلیک کردن بر روی کلاستر یا عنصر سازه ای در مود وضعیت هندسه، پنجره خصوصیات ظاهر می گردد و در آن می توان داده های تنظیمات مصالح را تغییر داد. این مزیت برای در چارچوب ساخت مرحله ای مفید است.

۳-۱۱-۶-۳- تولید تنش اولیه (روش $K0$)

تنش های اولیه در توده خاک تحت تأثیر وزن مصالح و تاریخچه شکل گیری آن قرار دارند. این حالت تنش معمولاً توسط تنش عمودی اولیه $\sigma_{v,0}$ تعریف می شود که به وسیله ضریب فشار جانبی خاک K_0 ($\sigma_{h,0} = K_0 \cdot \sigma_{v,0}$) به آن ارتباط می یابد. در *PLAXIS* تنش های اولیه را می توان با مشخص نمودن K_0 یا با استفاده از بارگذاری گرانشی تولید نمود [۱۷].

تولید تنش های اولیه بر مبنای روش K_0 در پنجره مربوطه انجام می گیرد. پارامترهای موجود در این پنجره به شرح زیرند:

$\Sigma Mweight$: پیش از وارد کردن مقادیر به جدول، باید مقدار $\Sigma Mweight$ معلوم باشد. این پارامتر نشان دهنده نسبت گرانش (*Gravity*) اعمالی است. عموماً مقدار پیش فرض ۱/۰ قابل قبول است که نشان می دهد وزن کامل خاک، فعال است. برای آن که بتوان تنش های اولیه ایجاد شده قبلی را مساوی صفر قرار داد باید $\Sigma Mweight$ مساوی صفر قرار داده شده و تنش های اولیه مجدداً تولید گردند.

Cluster: اولین ستون، شماره کلاستر را نشان می دهد. وقتی شماره ای وارد جدول گردد، کلاستر متناظر در صفحه اصلی نشان داده می شود.

Model : ستون دوم نشان دهنده مدل مصالح است که برای کلاستر تعریف شده است.

OCR و POP : ستون های سوم و چهارم برای وارد کردن نسبت بیش تحکیمی (*OCR*) و فشار پیش از بیش بارگذاری (*POP*) به کار می روند. این دو پارامتر هر دو تنها در مدل خاک نرم فعالند.

K_0 : پنجمین ستون برای وارد کردن مقدار K_0 بر مبنای رابطه جکی ($1 - \sin j$) به کار می رود اما می توان آن را تغییر داد. وارد کردن مقدار منفی برای K_0 منجر به محاسبه مجدد آن از رابطه جکی می شود. همچنین مقادیر بسیار بالا یا بسیار پایین K_0 ممکن است تولید پلاستیسیته اولیه نمایند [۱۷].

| Cluster | Material | OCR | POP | K0 |
|---------|----------|-----|-----|-------|
| 1 | MC | N/A | N/A | 0.470 |
| 2 | MC | N/A | N/A | 0.470 |
| 3 | MC | N/A | N/A | 0.470 |
| 4 | MC | N/A | N/A | 0.470 |

شکل ض ۲-۱۴- جدول روش K_0 [۱۷]

ضمیمه ۳- خوردگی در محیط های دریایی

ض ۳-۱- مقدمه

عمر مفید سپرها به میزان زیاد تحت تأثیر عوامل جوی است. تأثیرات محیطی ای که ممکن است بر عمر مفید بهره برداری سپرهای فولادی اثر بگذارند ناشی از ضربه، بیش بارگذاری، طوفان، زلزله، سایش و خوردگی می باشند. اگر فلز، آندود نشده باشد، در محیط های مهاجم و در معرض خوردگی، ضخامت خود را از دست می دهند. خرابی ناشی از خوردگی، عاملی مؤثر در تعیین عمر مفید سازه و تخمین پتانسیل خوردگی در یک سازه بخصوص است [۲۱].

خوردگی یک واکنش الکتروشیمیایی طبیعی است که بر تمام فلزات اثر می گذارد. شرایطی که لازم است تا فرایند خوردگی آغاز شود، وجود رطوبت (الکترولیت)، یک رسانا (فلز) و اختلاف پتانسیل بین نواحی فلز می باشد. عامل آخر ممکن است عامل بسیار ساده ای مانند تفاوت های شیمیایی یا فیزیکی موجود در فلز یا محیط باشد یا ممکن است توسط دیگر عوامل از قبیل خراش، سایش، باکتری و نظایر آن ایجاد گردد. فرایند خوردگی به یک باتری شبیه است که در آن دو الکتروود وجود دارد: یک آنود و یک کاتود. وقتی این دو به هم متصل می شوند، الکترون ها از آنود به کاتود جریان پیدا می کنند. آنود قسمتی از خود را در مدت زمان برقراری جریان از دست می دهد (خورده می شود) و کاتود آن را دریافت می کند. این گونه است که وقتی این باتری های ریز در سطح خود در کنش می باشند، نواحی آنودی فلز خورده می شود [۲۱].

فلزات در بین سنگ هایی یافت می شوند که ترکیبی از اکسیژن، سیلیکات ها، سولفور و دیگر اجزا هستند. برای مثال آهن در تعدادی از مواد معدنی پیدا می شود که مهم ترین آنها مگنتیت و هماتیت می باشند. مگنتیت (Fe_3O_4) ترکیبی از ۷۲٪ آهن و ۲۸٪ اکسیژن است. در طی فرایند تلخیص، اکسیژن خارج می شود. فلزات تمایل دارند که به حالت پایدارتر اکسید آهن یا زنگ برگردند. زنگ محصول واکنش خوردگی است. از آنجا که زنگ جاذب نیست، در کند کردن خرابی تأثیر قابل توجهی دارد و در برخی موارد پس از تشکیل یک لایه چسبنده از زنگ، خوردگی به کلی متوقف می شود. آلیاژ «فولاد هوادیده» از این مزیت بهره می برد تا در مواردی که در معرض شرایط جوی قرار می گیرد، عملکرد قابل قبولی داشته باشد [۲۱].

در هنگام استفاده از مصالح و محصولات فلزی که قرار است در محیط های دریایی قرار بگیرند؛ مثلاً در آب دریا شناور باشند یا یک طرف آنها در مجاورت آب دریا و طرف دیگر در مجاورت خاک اشباع از نمک و آب دریا قرار داشته باشد، باید از طبیعت واکنش زای فولاد در محیط های خورنده کاملاً آگاه بود [۲۱].

عوامل کلیدی لازم برای اکسید شدن (زنگ زدن) آهن یا هر ترکیبی از فولاد عبارتند از رطوبت آلوده به اسید سولفوریک رقیق حاصل از احتراق سوخت های فسیلی، افت دما در شب برای تسهیل چگالش شبنم بر روی سازه، شناور شدن در آب شور یا آب دریا و یا مدفون شدن در خاک با مقاومت الکتریکی پایین به دلیل حضور کود یا نمک های طبیعی [۲۱].

در غیاب سیستم های محافظ، پتانسیل خوردگی ممکن است در جاهایی قابل صرف نظر و در جاهایی بسیار شدید باشد. بدون توجه به پتانسیل خوردگی، سیستم های محافظ و روش های شناخته شده زیادی هستند که می توانند خرابی را کند کرده یا به کلی حذف کنند. روشن است که تحت برخی شرایط بهره برداری محدود یا

جاهایی که خوردگی از اهمیت چندانی برخوردار نیست، کنترل میزان خوردگی لزومی ندارد. از طرف دیگر در محیط های خورنده، ممکن است کنترل میزان خوردگی در شروع کار یک روش اقتصادی برای تأمین عمر بهره برداری باشد [۲۱].

ض ۳-۲- شرایطی که در آن نیازی به کنترل خوردگی نمی باشد

در برخی شرایط نیازی به کنترل خوردگی نمی باشد که از آن جمله می توان به نصب شمع های موقتی، کاربردهای غیر سازه ای، محیط های خورنده ملایم مانند آب تازه، و سازه های قابل جابجایی یا متحرک که به آسانی می توان از آنها محافظت نمود، اشاره کرد [۲۱].

ض ۳-۳- شرایطی که در آن نیاز به کنترل خوردگی می باشد

الف- بهره برداری دائمی

انتظار می رود که بسیاری از سازه های دریایی در مدت زمان طولانی، عملکرد رضایت بخشی داشته باشند. معمولاً برنامه ریزی ها برای حداقل عمر بهره برداری ۲۰ سال پیش از جایگزین کردن سازه دائمی صورت می گیرد. به دلیل دشواری فیزیکی جابجا یا جایگزین کردن سازه قدیمی، هزینه بالای قطع کردن بهره برداری، و هزینه نوسازی که ممکن است به دلیل تورم، بسیار بیشتر از هزینه های اولیه باشند، عمر بهره برداری ۵۰ سال یا حتی بیشتر، در اغلب موارد مناسب به نظر می رسد. برای رسیدن به این عمر طولانی لازم است از ابتدا از سیستم های محافظ در برابر خوردگی استفاده به عمل آید [۲۱].

ب- محافظت اضافی

برای جلوگیری از روش های نگهداری پر هزینه و افت در کیفیت بهره برداری، از سیستم های محافظ در برابر خوردگی استفاده می شود [۲۱].

ض ۳-۴- روش های کنترل خوردگی

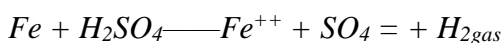
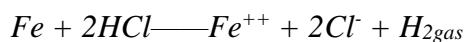
روش های کنترل خوردگی ممکن است از طراحی خوب و ساخت قابل قبول گرفته تا استفاده از ترکیبی از اندود کردن و سیستم های حفاظت کاتودیک متغیر باشد. با این حال اطلاع از اصول خوردگی و اقتصاد کنترل خوردگی، پیش از تصمیم گیری درباره درجه حفاظت، ضرورت دارد [۲۱].

ض ۳-۵- برخی اصول خوردگی

اطلاع از اصول خوردگی به ما در به حداقل رساندن افت ها در مدت زمان قرارگیری سازه در معرض محیط های مهاجم کمک می کند [۲۱].

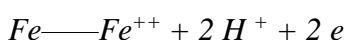
متأسفانه فولاد کربنی سازه ای در بسیاری شرایط، با سرعت غیر قابل قبولی دچار خوردگی می شود و ظاهر رضایت بخش خود را تا حدودی از دست می دهد. نرخ خوردگی فولاد سازه ای در بالای جزر و مدهای بلند، بسیار بالا است در حالی که ممکن است این نرخ در آب دریا تا حدودی قابل قبول باشد. با این تفاسیر لازم است با اصول واکنش های الکتروشیمیایی که بر عمر بهره برداری سازه های فولادی حاکم است، آشنا شویم [۲۱].

در فرایند تولید فولاد با نورد گرم، با سرد شدن فولاد، یک پوسته زبر بر روی آن شکل می گیرد که «پوسته کارخانه» نامیده می شود. این پوسته مخلوطی از سه اکسید آهن است اما برای سهولت از آن به زنگ (Fe_2O_3) یاد می شود. پوسته کارخانه با اسید سولفوریک یا اسید هیدروکلریک، اسید سابی می شود. اسیدها با برش دادن پوسته کارخانه از زیر، عمل می کنند. این کار با هجوم به فولاد پایه از طریق ترک های متعدد موجود که جزء خصوصیات فولاد است، و نیز تولید هیدروژن گازی انجام می گیرد و در نهایت پوسته را برطرف می کند. این عمل، واکنش سریعی است که در آن آهن پایه به سرعت خورده می شود. در زیر فرایند اسیدسابی تشریح می شود:

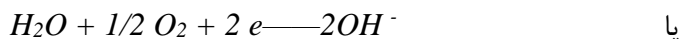
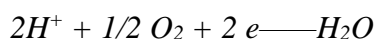


واکنش های خوردگی کند تر به صورت زیر بیان می شوند. این واکنش ها زمانی اتفاق می افتند که سازه فولادی رنگ آمیزی نشده در معرض چگالش شبانه یا شناور شدن در آب شور یا آب دریا قرار بگیرند [۲۱].

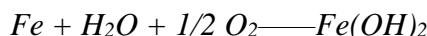
مانند قبل آهن حل، شده و هیدروژن و دو الکترون آزاد می کند:



الکترون ها می توانند با هیدروژن واکنش داده و به همراه اکسیژن تولید آب کنند یا به جای آن با آب واکنش داده و به همراه اکسیژن تولید یون هیدروکسیل کنند.



با جمع کردن این معادلات، معادله زیر به دست می آید:



آهن های سفید تا سبز می توانند علاوه بر آن با هوا اکسید شوند تا هیدروکسید آهن ژلاتینی قرمز آشنا را به دست دهند که هیدروژن آن جدا شده و شکل خالصی از زنگ (Fe_2O_3) از آن به جا می ماند [۲۱].

ض ۳-۶- انواع خوردگی

دو نوع کلی خوردگی در محیط های دریایی وجود دارد. خوردگی یکنواخت و هجوم حفره ساز. خوردگی یکنواخت نوعی زبر شدگی کلی سطح فلز است که منجر به نازک شدن تدریجی آن می گردد. این نوع خوردگی به وفور در سپرهایی که در معرض آب های با مقاومت ویژه پایین قرار دارند، رخ می دهد. خوردگی متداول تر حفره ساز، نوعی هجوم موضعی است و غالباً در سپرهایی که در آب شور شناورند، اتفاق می افتد. در برخی موارد (تغییر تنش)، ممکن است خوردگی حفره ساز - که مکان هایی را به وجود می آورد که مستعد تمرکز تنش باشند - جدی تر از خوردگی یکنواخت باشد. در مراحل اولیه شناوری، نرخ (سرعت) خوردگی حفره ساز اغلب ۵ تا ۱۰ برابر نرخ خوردگی یکنواخت است و به تدریج پس از یک مدت زمان طولانی تر (تقریباً ۱۰ سال)، مقدار آن تا ۳ برابر نرخ خوردگی یکنواخت کاهش می یابد. نرخ های خوردگی یکنواخت، معیارهای معمول خوردگی اعضای سازه ای در سازه های قرار گرفته در آب هستند [۲۱].

ض ۳-۷- دلایل خوردگی

خوردگی به دلیل اختلافات کوچک فیزیکی یا شیمیایی موجود در فلزات یا محیط رخ می دهد. شرایط اختلافی در فلز ناشی از ناخالصی های کم اهمیت، تنوع در ترکیب موضعی، خراش و سایش سطحی، شکست پوسته کارخانه، تنش های گرمایی محصور شده، جریان های سرگردان، و فعالیت کوپل های گالوانیک و باکتریایی می باشند. شرایط محیطی اختلافی ممکن است از تغییر در میزان اکسیژن حل شده که میزان آن با عمق شناوری، نوسان موضعی سرعت یا تمرکز غیر یکنواخت نمک به دلیل آلودگی سطحی تغییر می کند، ناشی شود. این گونه شرایط، مکان های موضعی نامشابهی بر روی سطح فلزی که به صورت الکتروشیمیایی اندرکنش دارد، ایجاد می کند [۲۱].

برای سهولت بیشتر، واکنش های خوردگی در یک پیل گالوانیک مطالعه می شوند که از دو الکتروود جداگانه آنود و کاتود که در یک محلول رسانا به نام الکتروولیت شناورند، تشکیل یافته است. یک باتری چراغ قوه ای معمولی مثال خوبی از پیل گالوانیک است. هنگامی که دو الکتروود به وسیله یک سیم خارجی به هم متصلند، پیل فعال است. خوردگی در آنود اتفاق می افتد و همراه با جریان الکترون ها از درون سیم خارجی، راهی کاتود می شود. اختلاف ولتاژ بین الکتروودها در هر زمان، جریان خوردگی متناظر آنی از درون پیل را تعیین می کند. این اختلاف ولتاژ با میزان جریان تولید شده و زمان فعالیت پیل تغییر کرده، به تدریج به مقادیر ثابتی میل می کند.

ض ۳-۸- مکانیزم خوردگی فولاد در آب دریا

بر روی سپر درون آب دریا، فعال ترین نواحی سطحی از نظر شیمیایی (آنودها) از طریق خود سپر و به صورت فلزی با کم فعالیت ترین نواحی سطح (کاتودها) جفت می شوند. این جفت شدگی منجر به تولید جریان الکتروولیت و خوردگی نواحی آنودی می گردد. و وقتی این نواحی موضعی آنودی و کاتودی به طور پیوسته و تصادفی در طی فرایند خوردگی جابجا می شوند، زبر شدگی کلی سطوح اتفاق می افتد. گاهی این نواحی فعال موضعی، موقعیت خود را تغییر نمی دهند و بنابراین فلز دچار حمله موضعی شده و خوردگی حفره ساز اتفاق می افتد. عموماً عمق حفره سازی به نسبت مساحت نواحی آنودی به مساحت نواحی کاتودی در تماس با الکتروولیت (آب دریا) بستگی دارد؛ هر چه مساحت آنود نسبت به مساحت کاتود کوچکتر باشد، عمق حفره سازی بیشتر می شود [۲۱].

وقتی دو فلز مشابه که با یکدیگر جفت و در آب دریا شناور شده اند، تشکیل یک پیل گالوانیک دهند، یک عمل مخرب مشابه اتفاق می افتد [۲۱].

ض ۳-۹- مناطق خوردگی شمع های فولادی

بررسی سپرهای دریایی خورده شده، چند ناحیه متفاوت آسیب را مشخص می کند. ساده تر است که این نواحی به ۵ منطقه تقسیم شوند که هر کدام نرخ خوردگی ویژه ای دارند [۲۱].

الف- مناطق اتمسفری (جوی)

نواحی بالای شمع ها هستند که مداوماً در معرض جو بالای ناحیه پاشش آب (اسپلش) قرار می گیرند.

ب- مناطق پاشش آب (اسپلش)

نواحی ای هستند که از متوسط تراز بالای آب شروع شده و به سمت بالا تا زیر منطقه جوی ادامه می یابند. در این نواحی، رطوبت کمی پایین می آید و لایه نازک پیوسته آب بر روی سطوحی از سپر که در معرض جو قرار دارند، به جا می ماند. دسترسی به این نواحی برای حفاظت و نگهداری آسان است مگر در هنگام جزر و مد پایین، که کار کمی مشکل می شود.

ج- مناطق جزر و مدی

نواحی ای هستند بین متوسط تراز پایین و بالای آب. این منطقه در معرض شناوری دوره ای و متناوب ناشی از تغییرات جزر و مد قرار دارد و در هنگام جزر و مدهای پایین، دسترسی به آنها جهت نگهداری و حفاظت، به سختی امکان پذیر است.

د- مناطق مداوماً شناور

این نواحی از سپرها که همیشه در زیر آب قرار دارد، از خط لایروبی تا متوسط تراز پایین آب ادامه می یابد (این مناطق در جاهایی که خط لایروبی بالای متوسط تراز پایین آب است، وجود ندارد). دسترسی به این نواحی برای حفاظت و نگهداری، بدون در اختیار داشتن تکنیک های کافردمی یا تکنیک های ویژه نقاشی در زیر آب، به آسانی امکان پذیر نمی باشد.

ه- مناطق خاک

این نواحی شامل قسمت های مدفون در لای یا خاک است و عموماً نیازی به حفاظت ندارد. باید توجه داشت که در بسیاری موارد ممکن است مناطق قرار گرفته در یک وجه سپر فولادی با وجه روبه رو تفاوت داشته باشد که این مطلب معمولاً درباره مناطق خاک، پاشش آب و اتمسفری اتفاق می افتد [۲۱].

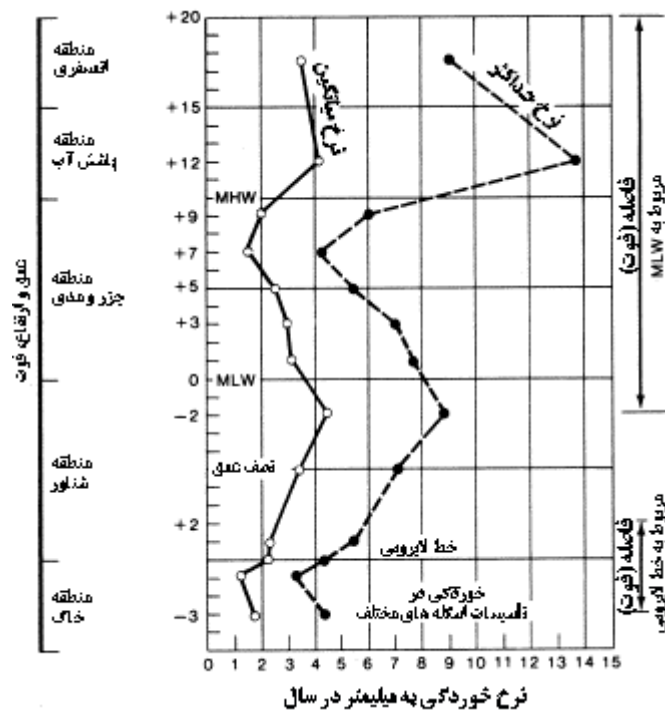
ض ۳-۱۰- عوامل محیطی اثرگذار بر نرخ خوردگی

دریایی شمع های فولادی

الف- نرخ های خوردگی مناطق

نرخ های خوردگی سطوح شمع های فولادی معمولاً بسته به منطقه، تغییرات قابل ملاحظه ای می کند. میانگین نرخ خوردگی پروفیل سپر فولادی در تأسیسات اسکله های متعدد، در شکل زیر نشان داده شده است. افت متغیر خوردگی که در هر منطقه نشان داده شده، میانگین مقادیر مربوط به سپرهای ۸ اسکله متفاوت پس از ۱۹ سال می باشد. به طور کلی حداکثر کاهش در ضخامت فلز در منطقه پاشش آب - بلافاصله بالای متوسط تراز بالای آب- اتفاق می افتد. افت عمده معمولاً در فاصله کمی زیر متوسط تراز پایین آب در منطقه مداوماً شناور رخ می دهد [۲۲].

به استثنای موارد کمی که در آنها رسوب یک عامل مؤثر است، منطقه ای که کمترین تأثیر را می پذیرد، در زیر خط لایروبی یافت می شود که در آن افت های بزرگ تر در فصل مشترک آب و خط لایروبی اتفاق می افتد. ناحیه کم افت دیگر در منطقه جزر و مدی و در نصف فاصله بین متوسط تراز بالا و پایین آب قرار دارد. در جاهایی که سپر فولادی در معرض آب در یک وجه خود می باشد، متوسط نرخ خوردگی از ۱ تا ۴/۵ میلیمتر در سال تغییر کرده و به حداکثر ۳ تا ۱۴ میلیمتر در سال می رسد. در جاهایی که سپر فولادی در معرض آب در هر دو وجه خود می باشد، نرخ نهایی خوردگی عضو، دو برابر می شود. در یک بازه زمانی بزرگ تر، آسیب موضعی ناشی از خوردگی حفره ساز، ۱/۵ تا ۳ برابر متوسط نرخ ها است [۲۲].



شکل ض ۱-۲- پروفیل خوردگی سپر فولادی (از ادواردز، ۱۹۶۳) [۲۲]

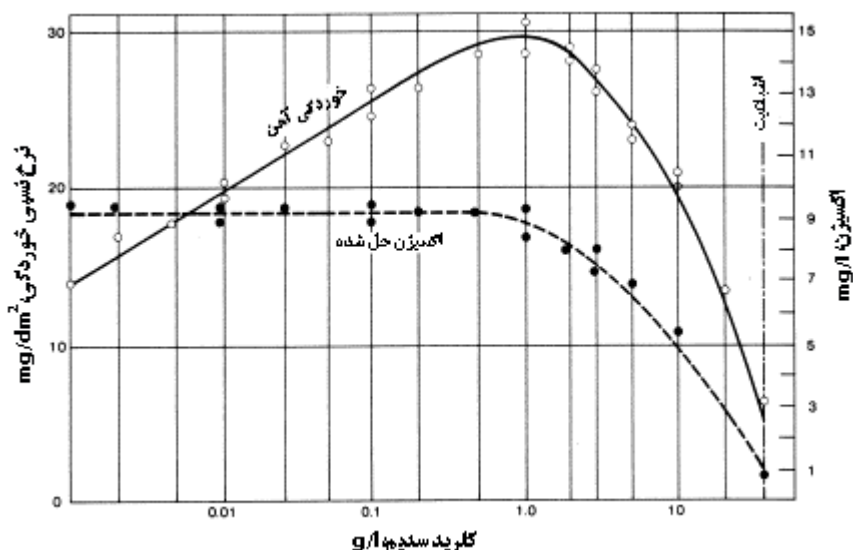
ب- مقدار pH

pH (درجه اسیدی یا بازی بودن) آب دریا تقریباً ثابت است و مقدار آن در بازه ۷/۲ تا ۸/۲ قرار دارد. pH زیر ۷ اسیدی و بالای آن، بازی است. در آب های بندر که حاوی آلاینده ها است، pH ممکن است تا اندازه ای متغیر باشد اما در بازه متوسط، نرخ خوردگی فولاد تقریباً ثابت می باشد.

ج- شوری

آب موجود در دریاهاى آزاد حدوداً ۳/۵٪ نمک دارد. در اسکله های آلوده نشده و دیگر مناطق ساحلی، این محلول با رواناب تازه رقیق می شود، اما میزان نمک های مختلف نسبت به هم ثابت باقی می ماند. در بین یون های مختلف آب دریا که تولید نمک های محلول می کنند، یون کلرید به علت غلظت بالایی که دارد، از اهمیت بیشتری برخوردار است. یون کلرید قادر است در لایه های محافظ شکل گرفته توسط محصولات خوردگی نفوذ و ایجاد خوردگی موضعی کند. علاوه بر آن حضور یون کلرید بر حل پذیری اکسیژن در آب تأثیر گذار است.

در شکل (ض ۲-۳) که تصویری از نرخ خوردگی و اکسیژن حل شده در مقابل شوری را نشان می دهد، دیده می شود که خوردگی با افزایش میزان نمک تا حداکثر مقداری در حدود ۰.۱٪ کلرید سدیم، افزایش می یابد و پس از آن با افزایش شوری، خوردگی کاهش می یابد. عمدتاً میزان اکسیژن حل شده تا غلظت ۰.۱٪ کلرید سدیم، ثابت است و پس از آن با افزایش مقدار نمک، به طور چشمگیری افت می کند. علاوه بر آن این نمودار نشان می دهد که آب تازه و آب دریا به اندازه آب های شور با غلظت ۰.۱٪ یون کلرید، خورنده نیستند.



شکل ض ۲-۲- تغییرات خوردگی آهن به صورت تابعی از شوری

(۷۵ درجه فارنهایت، از فینک، ۱۹۶۰) [۲۲]

د- آلودگی

آلودگی در اسکله ها ممکن است شامل هر نوع آلاینده از فاضلاب داخلی گرفته تا پساب های پیچیده صنعتی، روغن شوراب ها و یا روغن های سرریز شده باشد. آلودگی به طور کلی به واسطه اثر سمی خود و با خارج کردن اکسیژن حل شده از آب، گونه های زیستی را دچار مخاطره می کند. بسته به ارگانسیم های آلوده شده در آب دریا، تخریب ظظ ممکن است با کمک به بقای باکتری های غیر هوازی، نرخ خوردگی را به شکل نامطلوبی تغییر دهد. آلودگی هایی که pH را پایین می آورند یا سولفیدهایی را در محل سپر تولید می نمایند، نرخ خوردگی فولاد را افزایش می دهند. آلودگی های روغنی هر چند برای جانوران دریایی خطرناکند، اما می توانند با روکش کردن سازه فولادی در مناطق پاشش و جزر و مد، به طور جزئی از آن در برابر خوردگی محافظت کنند.

ه- باد

باد می تواند حرکت موج را تحریک کرده و مه مملو از نمک را بر روی سازه انباشته نماید. باقیمانده نمک خشک شده که رطوبت آن نمایان شده، می تواند رطوبت را به خود جذب کند و به عمل خوردگی ادامه دهد.

و- باران

باران خاصیت شویندگی دارد؛ با این حال در جایی هایی که آب باران در شکاف ها باقی می ماند، می توان خوردگی را با حفظ شرایط مرطوب مدل سازی نمود [۲۲].

ض ۳-۱۱- عوامل دیگری که بر نرخ خوردگی اثر می گذارند

الف- فلزات نامشابه

همان طور که قبلاً نشان داده شد، جفت شدن دو فلز نامشابه در سازه دریایی منجر به خوردگی گالوانیک در عضو آنودی می شود در حالی که عضو کاتودی اساساً غیر فعال می سازد. در ساخت شمع های دریایی گاهی اوقات جفت و بست ها، جوش ها، پوشش های مناطق پاشش آب و فیتینگ ها از فلزی غیر از فولاد ساده کربنی ساخته می شوند. در چنین مواردی اگر این فلزات نسبت شمع، کاتودی باشند و در مقایسه با مساحت سطح شمع، مساحت کمی داشته باشند، در سطح مجاور آنودی شمع، نرخ خوردگی تسریع خواهد شد و فلزات کاتود بدون تغییر باقی می مانند. اگر در جایی که یک فیتینگ آنودی کوچک به شمع کاتودی متصل شده باشد، شرایط عکس شود، فیتینگ به سرعت تخریب خواهد شد. این شرایط بعداً پیچیده تر می شود [۲۲].

ب- پوسته کارخانه

همان طور که قبلاً نشان داده شد، پوسته کارخانه پوسته ای است بسیار چسبنده که بر روی اعضای سازه ای گرم نورد شده شکل می گیرد. در جریان سرد شدن، ترک های کوچک بسیاری در فولاد پایه ایجاد می شود. قرار گرفتن این اعضا در آب دریا باعث شکل گیری پیل فعال گالوانیکی می شود که در آن فولاد کوچک آسیب پذیر نقش آنود را بازی کرده و با ایجاد حفراتی، دچار خوردگی می گردد.

پوسته کارخانه سالم پیرامون در این پیل نقش کاتود را بازی می کند. در کوتاه مدت، عمق حفرات از نرخ معمول خوردگی تجاوز می کند. البته در دراز مدت حالت پایداری ایجاد می شود [۲۲].

ج- خوردگی جریان های سرگردان

جریان مستقیم منبع های خارجی اطراف سازه دریایی اگر توسط سازه مجتمع شده و به داخل الکترولیت هدایت گردند، می توانند باعث تسریع صدمات وارد به شمع ها شوند. جریان مستقیم ژنراتورهای نامناسب جوشکاری زمینی، سیستم های خدمات کشتی، سیستم های حفاظت کاتودی مجاور و سیستم های الکتریکی راه آهن می توانند در سازه های زیرزمینی نواحی اسکله، تولید صدمات خوردگی جریان سرگردان نمایند. یک آمپر از جریان مستقیم گذرنده از یک سازه به آب دریا، تقریباً ۲۰ پوند (۱۰ کیلوگرم) فولاد در سال از سازه جدا می کند. جریان های سرگردان متناوب، مشکلی زیادی ایجاد نمی کنند.

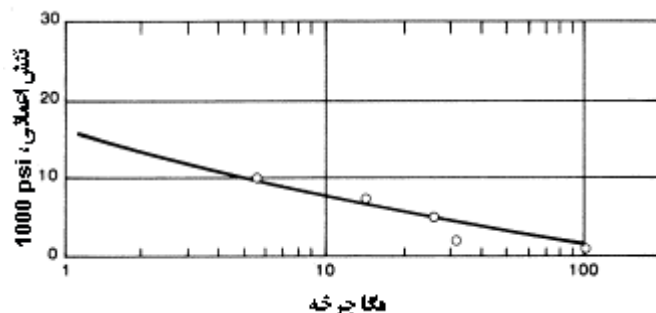
لازم است که جریان های سرگردان مستقیم در منبع از بین بروند یا اینکه سازه به طور مناسب به پایه منفی (زمین) منبع جریان سرگردان وصل شود [۲۲].

د- ترک خوردگی

ترک خوردگی، شکست تسریع یافته فلز تحت اثر ترکیبی خوردگی و تنش است. وقتی که تنش ها، تکراری یا دوره ای باشند، شکست حاصله، خستگی خوردگی نامیده می شود. خستگی خوردگی را می توان به صورت «کاهش مقاومت خستگی هوای یک فلز توسط محیط خورنده» نیز تعریف کرد. علاوه بر عوامل محیطی اثرگذار بر خوردگی، عوامل متعدد مرتبط با تنش مانند مود، بزرگی، مدت زمان و فراوانی، تمایل به پیچیده نمودن فرایند خوردگی دارند. اساساً تأثیر خوردگی بر خستگی، حذف حد ویژه خستگی هوا است. در شکل ۳ نمودار تنش اعمالی در مقابل تعداد چرخه های خستگی برای فولاد نرمه در آب دریا دیده می شود. در طراحی سازه های دریایی باید ملاحظات دقیقی برای پیش بینی بارگذاری خستگی انجام گیرد [۲۲].

تنش های استاتیک (تنش های اعمال شده یا تنش های پسماند داخلی) در ترکیب با خوردگی منجر به ترک خوردگی ای می گردند که از آن به ترک خوردگی - تنش یاد می شود. ترک خوردگی - تنش، مشکل جدی ای برای فولاد نرمه و فولادهای کم آلیاژ که معمولاً در سازه های دریایی ساکن به کار می روند، به وجود نمی آورد. فولادهای بسیار پر مقاومت (بیش از ۱۸۰۰۰۰ psi) در محیط های کلریدی، نسبت به ترک خوردگی - تنش از خود حساسیت نشان می دهند. در حضور سولفید هیدروژن (که جزء ترکیبات معمول آب دریا نیست اما گاهی در خط لایروبی یا در مجاورت آن توسط سولفات ساخته می شود و باکتری ها را تحت شرایط بی هوازی کاهش می دهد)، ترک خوردگی - تنش در فولادهای پر مقاومت تر افزایش می یابد. البته در حالت کلی برای فولادهای معمول که

در ساخت شمع از آنها استفاده می شود، تجربیات کارگاهی و داده های آزمایشی قویاً تأیید می کنند که در چنین فولادهایی در محیط های کلریدی، ترک خوردگی- تنش به وجود نمی آید [۲۲].



شکل ض ۲-۲- خستگی خوردگی فولاد نرمه در آب دریا با سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه [۲۲]

ض ۳-۱۲- خوردگی در خاک

در ساخت سازه های دریایی، شمع های فولادی باربر به طور معمول در زیر خط لایروبی کوبیده می شوند. سازه های سپری معمولاً در زیر خط لایروبی کوبیده می شوند و در یک وجه خاکریزی می گردند، یا کوبیده می شوند و خاکبرداری در وجه مجاور آب انجام می گیرد. شمع ها عموماً در نواحی زیر خط لایروبی یا وجه خاکریزی شده در برابر خوردگی محافظت نمی شوند زیرا خوردگی در این محیط ها، ملایم در نظر گرفته می شود. البته این مطلب همیشه درست نیست و عوامل بحرانی ای که خوردگی خاک را تعیین می کند، در زیر تشریح شده است [۲۲].

طی سال ها، بر روی عوامل زیادی از قبیل تخلخل خاک، چگالی خاک، هوادهی خاک، pH خاک، ویژگی های اکسایش یا کاهش خاک و ... مطالعاتی انجام گرفت. در نهایت چنین نتیجه گیری شد که علت خوردگی خاک همان عاملی است که خصوصیت مهاجم آب دریا را سبب می شود؛ یعنی میزان نمک. با وجود آن که در برخی شرایط میزان مواد آلی در خاک به همراه فعالیت باکتریایی آن نقش عمده ای در خوردگی فولاد در خاک بازی می کند، اما غلظت نمک است که بر شدت خوردگی خاک اثر می گذارد [۲۲].

ض ۳-۱۳- خوردگی گالوانیک فولاد در آب دریا

الف- مجموعه فلزات الکتروموتیو

فلزات خالص و گران قیمت مانند پلاتینوم، طلا، نقره و مس به صورت آزاد در طبیعت یافت می شوند. این مسئله نشان دهنده مقاومت ذاتی آنها در مقابل اکسیداسیون جوی است. فلزاتی چون کروم، نیکل، آهن، روی، منگنز و آلومینیوم هیچگاه به صورت آزاد در طبیعت یافت نمی شوند بلکه ترکیبی از آنها با ۵ عنصر دیگر به شکل مواد معدنی یا سنگ معدن وجود دارد. میزان انرژی لازم برای استخراج این فلزات از سنگ معدن آنها، شاخصی از پایداری و فعال بودن و در نتیجه گرایش آنها به اکسید یا خورده شدن توسط جو را نشان می دهد. روشی برای اندازه گیری نرخ ناپایداری وجود دارد که در واقع تعیین پتانسیل الکتروود فلز تحت شرایط خاص می باشد. این کار با جفت کردن فلزات با یک فلز استاندارد انتخابی دلخواه برای تشکیل یک باتری انجام می شود. با این روش، لیست های جداگانه ای از فلزات را می توان برای شرایط متفاوت محیطی تهیه نمود (جدول زیر را ببینید) [۲۲].

جدول ض ۲-۱- پتانسیل الکتروموتیو تعدادی از فلزات که در شرایط متفاوت اندازه گیری شده

| آب جاری دریا ۱۳ ft/s (ولت) | مجموعه های استاندارد الکتروموتیو | | فلز |
|----------------------------------|--|--------------------------|-----------------------|
| | آب ساکن دریا (ولت) | آب ساکن دریا (ولت) | |
| | -۱/۴۵ | -۲/۳۴ | منگنز |
| | -۰/۷۴ | -۱/۶۷ | آلومینیوم |
| -۱/۰۵ | -۰/۸۰ | -۰/۷۶ | روی |
| ۰/۶۱ | -۰/۵ | -۰/۴۴ | آهن |
| | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | هیدروژن/ پلاتینوم |
| -۰/۳۶ | +۰/۸۰ | +۰/۳۵ | مس |
| -۰/۱۳ | +۰/۱۲ | +۰/۸ | نقره |
| -۰/۰۵ | | | فولاد زنگ نزن نوع ۳۱۶ |
| +۰/۱۵ | +۰/۴ | +۱/۲۰ | پلاتینوم |

از موقعیت های فلزات مربوطه در جدول بالا روشن است که آنهایی که زیر هیدروژن قرار دارند، پایدار و آنهایی که بالای هیدروژن هستند، به طور فزاینده ای فعالند. آسان ترین و قدیمی ترین باتری کارا، پیل دنیل بود که از مس و روی تشکیل یافته بود. اتصال این دو به یکدیگر تحت شرایط جدول لاکو، منجر به تشکیل یک باتری با نیروی رانشی مساوی با اختلاف جبری بین $-۰/۷۶۷$ برای روی و $+۰/۳۵۷$ برای مس؛ یعنی $۱/۱۱$ ولت می شود [۲۲].

ب- پیل گالوانیک

گاهی اوقات پیل های گالوانیک یا دو فلزه می توانند در سازه ها تشکیل شده و اگر سطح سازه به طور ثابت با آب دریا یا دیگر محلول های با مقاومت الکتریکی پایین مرطوب باشد، منجر به صدماتی به یک یا چند عضو گردند. تنها شرایطی که در آن سازه در برابر خوردگی دو فلزه یا گالوانیک مقاومت می کند زمانی است که سطح فلزات منفی تر یا فعال بسیار بزرگ تر از دیگر عنصر جفت باشد مانند استفاده از پرچ های کوچک مسی برای بستن صفحات بزرگ فولاد کربنی [۲۲].

منابع

1. [www.pilebuckinternational.com/PZ27 by Pile Buck/ History and Types of Sheet Piling- Pile Buck ® International ,Inc.](http://www.pilebuckinternational.com/PZ27%20by%20Pile%20Buck/History%20and%20Types%20of%20Sheet%20Piling-%20Pile%20Buck%20International%20Inc)
2. *Foundation Engineering Handbook, Chapter13: Sheet pile structures*, G. M. Cornfield, ACGI, DIG, C. ENG., FICE
3. اصول مهندسی ژئوتکنیک، جلد دوم: مهندسی پی ، فصل ششم، سپرها، برآجا ام. داس، ترجمه شاپور طاحونی
4. [www.hammersteel.com/sheet_piling.htm/ Hammer & Steel/ Steel Sheet Piling "Z" & Flat Sections](http://www.hammersteel.com/sheet_piling.htm/)
5. *Deep Foundation and Sheet-Piling, Chapter V: Pressures on sheet-pile wall*, Donovan H. Lee, Concrete Series, Great Britain, Bulter & Tanner Ltd., Frome and London, 1961
6. [pilebuckinternational.com/PZ27 by Pile Buck/ Sheet Pile Interlocks - Pile Buck ® International ,Inc.](http://www.pilebuckinternational.com/PZ27%20by%20Pile%20Buck/Sheet%20Pile%20Interlocks-%20Pile%20Buck%20International%20Inc)
7. [pilebuckinternational.com/PZ27 by Pile Buck/ Installation of Sheet Piling- Pile Buck ® International ,Inc.](http://www.pilebuckinternational.com/PZ27%20by%20Pile%20Buck/Installation%20of%20Sheet%20Piling-%20Pile%20Buck%20International%20Inc)
8. *Piling Handbook, Seventh Edition 1997, British Steel Installation of Steel Sheet Piles, Edition 1995*, TESPA
9. *Engineering and Design - Design of Sheet Pile Walls*, EM 1110-2-2504, Chapter 4 - System Loads, American corp of engineering, 31 March 1994
10. *Workpackage ۲ Innovative design methods in geotechnical engineering*, Monika De Vos & Valerie Whenham, Belgian Building Research Inst., Belgium, GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network
11. *APPENDIX A: GEOTECHNICAL ANALYSIS BY THE FINITE ELEMENT METHOD*, Technical LetterNo. 1110-2-544, American corp of engineering, 31 July 1995
12. *Development of Finite-Element-Based Design Procedure for Sheet-Pile Walls.*, ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS GEOTECHNICAL LAB, Leavell, D. A. ; Peters, J. F. ; Edris, E. V. ; Holmes, T. L., SEP 1989
13. [http://www.plaxis.com/ PLAXIS FINITE ELEMENT CODE FOR SOIL AND ROCK ANALYSESIS FINITE ELEMENT](http://www.plaxis.com/)
14. *PLAXIS version7*, edited by R.B.J. Brinkgreve, PLAXIS B.V., and the Netherlands and P.A. Vermeer, University of Stuttgart, Germany, 1998

15. *PLAXIS Version 8, General Manual*
16. *PLAXIS Version 8, Scientific Manual*
17. *PLAXIS Version 8, Reference Manual*
18. *PLAXIS Version 8, Material Model Manual*
19. *www.ce-ref.com/ sheet pile walls/ Profile of steel sheet piles (From USS steel sheet piling design manual)*
20. <http://www.hammersteel.com/Chaparral/PZ-Corners.htm>
21. *pilebuckinternational.com/ PZ27 by Pile Buck/ Corrosion and Protection - Pile Buck ® International ,Inc.*
22. *pilebuckinternational.com/ PZ27 by Pile Buck/ Corrosion factors for marine structures- Seymour K. Coburn, Pile Buck ®International ,Inc., 2003*