

# بررسی تغییرات فشار آب حفره ای اضافی در خاک حاوی لایه های سست ماسه سیلتی پشت دیوارهای ساحلی سپری مهار شده با استفاده از آزمایشهای میز لرزه

کمال باقرزاده خسروشاهی<sup>۱</sup>، عباس قلندرزاده<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های دریایی، دانشگاه تهران

۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه تهران

Kamal\_bkh@yahoo.com

## خلاصه

اکثراً خاک پشت دیوارهای ساحلی را مصالح دانه ای اشباع تشکیل می دهند، به هنگام زلزله و با افزایش فشار آب حفره ای و وقوع پدیده روانگرایی تغییر شکلهای بزرگ در خاک به وجود می آید که باعث خرابی های گسترده ای در دیوارهای ساحلی می شود. در این تحقیق چگونگی تغییرات فشار آب حفره ای در خاک پشت دیوار ساحلی سپری مهار شده که شامل لایه های سست ماسه سیلتی می باشد، با استفاده از آزمایشهای مدل میز لرزه در محیط 1g، مورد بررسی قرار گرفته است. دیوار ساحلی فوق با الهام از دیوار سپری مهار شده بندر شهید رجایی ساخته شده است. مشاهده شد که میزان نسبت فشار آب حفره ای لایه شل ماسه سیلتی موجود بین لایه های متراکم بالا و پایین در طول آزمایش بیش از سایر لایه ها می باشد کاهش فشار آب حفره ای اضافی پشت دیوار در اثر جابجایی دیوار و تاثیر شمع در افزایش فشار آب حفره ای اضافی از دیگر مشاهدات آزمایشهای فوق می باشد.

کلمات کلیدی: فشار آب حفره ای اضافی، روانگرایی، دیوار سپری مهار شده، لایه شل ماسه سیلتی، مدل میز لرزه

## مقدمه

دیوارهای ساحلی از سازه های مهم و بزرگ می باشند که در بنادر به منظور امکان پهلوگیری کشتیها و بارگیری و تخلیه بارهای کتتی احداث می شوند. عملکرد لرزه ای دیوارهای ساحلی به دلیل آسیبهای جدی که نمونه های آن در زلزله های اخیر مشاهده شده توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده است. بررسی خرابیهای ناشی از زلزله در سازه های ساحلی نشان داده است که این نوع خرابیها عمدتاً ناشی از تغییر شکل یک لایه نرم و یا قابل روانگرا می باشد.

معمولاً لایه های خاک ساحلی از رسوبات دریا بوده و یا از لایروبی مصالح و رسوبات کف دریا جهت استحصال زمین استفاده می شود، این لایه ها سن بسیار کمی دارند و در نتیجه از نظر میزان تراکم چندان سخت و متراکم نیستند. به دلیل تحریک ناشی از زلزله و تنش برشی به وجود آمده در خاک، توده های اشباع نیمه متراکم و سست خاک تمایل به تراکم و نشست پیدا می کنند. در اثر این تمایل به تراکم، دانه های خاک جابجا شده و در نتیجه در فضای خالی بین ذرات که با آب میان حفره ای پر شده است، فشار اضافی مثبت در آب حفره ای به وجود می آید. در اکثر موارد به دلیل کوتاه بودن زمان وقوع زلزله و کم بودن ضریب نفوذپذیری این نوع خاکها، آب فرصت زهکشی نیافته و اضافه فشار آب حفره ای ایجاد شده در هر تناوب بارگذاری با اضافه فشار ایجاد شده در تناوب بعدی جمع می گردد و در نهایت فشار آب حفره ای آنقدر بالا می رود که تماس بین دانه های خاک از بین رفته و تنش مؤثر بین دانه های جامد خاک برابر صفر می گردد. در چنین شرایطی خاک مقاومت برشی خود را کاملاً از دست داده و همانند یک سیال لزج و سنگین با چگالی برابر وزن مخصوص اشباع خاک عمل می کند و تغییر شکلهای بزرگی در خاک رخ می دهد. از خسارات مهم ناشی از وقوع روانگرایی می توان به از بین رفتن ظرفیت باربری پی ها، نشست خاک و تراکم لایه های روانگرا شده، جوش ماسه، بیرون زدن از درون سازه های حجیم مدفون و مهمتر از همه پدیده تغییر شکل یا گسترش جانبی اشاره کرد. اغلب این خسارات می توانند در مورد انواع اسکله ها و سازه های ساحلی به وقوع پیوند.

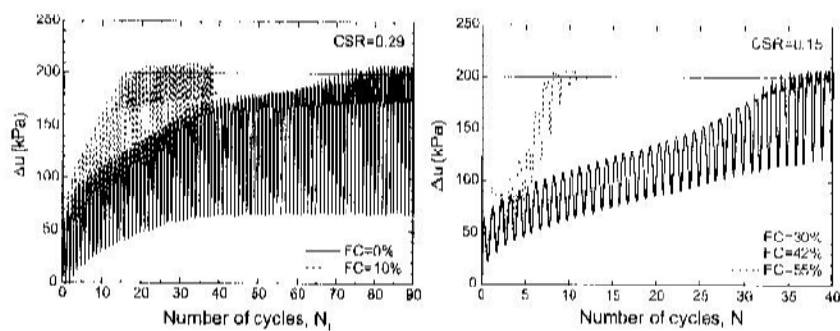
برای سالهای طولانی این تصور وجود داشت که پدیده روانگرایی تنها در ماسه ها رخ می دهد و خاکهای ریزدانه فاقد توانایی افزایش فشار آب حفره ای می باشند. در زلزله های گذشته موارد متعددی از روانگرایی ماسه های سیلت دار و همچنین سیلتهای ماسه دار مشاهده شده است. برای مثال، موری (۱۹۸۸)، موریوتو (۱۹۸۸) و موری و نوماتا (۱۹۹۰) در زلزله نسبتاً بزرگی که در چییاکن-توهوکی در سال ۱۹۸۷ و لوسا پریتا در سال ۱۹۸۹ اتفاق

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های دریایی دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده عمران دانشگاه تهران

افتاده بود جوشش خاکهای سیلنی را گزارش کردند؛ همچنین برای زلزله کوبه در سال ۱۹۹۵ جوشش ماسه‌های سیلنی گزارش شده است در حالیکه در این منطقه از سیلت برای مقاوم کردن ماسه در مقابل روانگرایی استفاده شده بود.

منحنی های ارائه شده توسط توجیچا (۱۹۷۰) و سید (۱۹۸۵)، به طور واضح نشان دهنده کاهش پتانسیل روانگرایی با افزایش ریزدانه می باشند. آزمایشهای انجام شده توسط چنگ و تروتکس (۱۹۹۰)، نیز در تایید نتایج قبلی می باشد تا اینکه سوانایام و همکاران در سال ۲۰۰۰ با استفاده از مفهوم تخلخل بین دانه ای (تخلخل بین ذرات ماسه) توانست تناقضات بین نتایج آزمایشگاهی را با آنچه که در واقعیت رخ داده بود را بر طرف کنند، وی چهار حالت ممکن برای ترکیب ریزدانه و درشت دانه و اثرات آنها بر هم تعریف کردند و با توجه به حالت‌های اندرکنشی بین ذرات درشت و ریز، تخلخل بین دانه های درشت ( $e_p$ ) و تخلخل بین دانه های ریز ( $e_r$ ) به عنوان اندیس دانسیته تماس برای ترکیب خاک دانه ای با درصد ریزدانه کم و زیاد در نظر گرفته شد و بر اساس آن در ۳ حالت از ترکیبهای ماسه و سیلت که مقدار ریزدانه از مقدار بحرانی کمتر می باشد رفتار مکانیکی از ذرات درشت تاثیر می پذیرد و بنابراین بدون در نظر گرفتن ریزدانه، از تخلخل بین درشت دانه ( $e_p$ ) به عنوان اندیس تماس ذرات مورد استفاده قرار گرفته و در حالت چهارم که مقدار ریز دانه از میزان بحرانی بیشتر می باشد، ذرات ریزدانه اثر مهمی خواهند داشت و با صرف نظر کردن از تاثیر ذرات درشت دانه برآکنده، می توان از تخلخل بین ریزدانه ( $e_r$ ) به عنوان اندیس تماس ذرات مورد استفاده قرار داد. با توجه به مفهوم ارائه شده توسط سوانایام، زنگی و آنتاپولوس در سال ۲۰۰۲ به این نتیجه رسیدند که برای تخلخل کلی ثابت، با افزایش ریز دانه تا ۴۴ درصد، رفتار مکانیکی همچنان از حالت ذرات درشت تاثیر می پذیرد و بنابراین مقاومت در برابر روانگرایی کاهش می یابد (افزایش پتانسیل روانگرایی) و برای ریزدانه بیش از ۴۴ درصد، مقاومت روانگرایی با افزایش ریزدانه افزایش می یابد (کاهش پتانسیل روانگرایی). در شکل (۱) تاثیر درصد ریزدانه بر روی چگونگی افزایش فشار آب حفره ای در تخلخل کلی یکسان نشان داده شده است. با توجه به این اشکال، با افزایش درصد ریزدانه برای تخلخل کلی یکسان، سرعت ایجاد فشار آب حفره ای برای ترکیب ماسه- ریزدانه، نسبت به ماسه افزایش می یابد و برای ریزدانه بیش از مقدار بحرانی، سرعت ایجاد فشار آب حفره ای کاهش می یابد.



شکل (۱): روند افزایش آب حفره ای برای درصد‌های مختلف آب حفره ای

#### ایزار و خاک مورد استفاده

جهت انجام این تحقیق از چند نوع ایزار استفاده شده است: میز لرزه جهت اعمال حرکت پایه هارمونیک، جعبه مدل، سیستم سازه ای دیوار حائل شامل سیر T شکل، مهار و شمع، کابل مهاری، سربار، سنسورها و سیستم جمع آوری و ثبت داده ها شامل دینالاگر و کامپیوتر.

بارگذاری لرزه ای سیستم به وسیله میز لرزه با عملگر هیدرولیکی و با تولید شتاب هارمونیک انجام شده است. جعبه مدل از جنس پلکسی گلاس شفاف با طول ۱۸۰ سانتیمتر، عرض ۵۰ سانتیمتر، ارتفاع ۷۵ سانتیمتر و ضخامت ۲ سانتیمتر ساخته شده است. در پایین طرفین جعبه، شیرهایی برای ورود و خروج آب و گاز دی اکسید کربن تعبیه شده است این جعبه بر روی میز لرزه قرار می گیرد.

برای ساخت اجزای دیوار از ضریب مقیاس ۱/۷۰ استفاده شده است. برای ساخت المانهای T شکل دیوار ساحلی و همچنین مهار و شمع با توجه به روابط تشابه و مدول الاستیسیته مصالح مختلف، از پلکسی گلاس استفاده شده است. همه اجزای مدل با توجه به پیش تنیده بودن کابلها، بر روی دیوار سیستمی برای اعمال پیش تنیدگی تعبیه شده است. برای ساخت کابلهای مهار نیز از مفتول فولادی تنیده شده استفاده شده است. برای ساخت سربار محوطه اسکله از ۲ تکه ورقه فولادی استفاده شده است که ضخامت آن نیز از روابط تشابه حاصل شده است.

جهت قرائت سنسورها در طول بارگذاری لرزه ای، از دو دستگاه دینالاگر دینامیکی ۱۰ کاناله (در مجموع ۲۰ کانال) استفاده شده است. اطلاعات آنالوگ در هر یک صدم ثانیه قرائت شده و توسط دینالاگرها به دیجیتال تبدیل شده و توسط یک دستگاه کامپیوتر ذخیره و پردازش شده اند.

برای اینکه امکان تکرار آزمایشهای انجام شده در مراکز تحقیقات ژئوتکنیکی وجود داشته باشد، استفاده از نوعی ماسه استاندارد، با مشخصات فیزیکی معلوم و حتی امکان مشابه ماسه های استاندارد شناخته شده ضروری می باشد. در این تحقیق، از ماسه شکسته سیایی شماره ۱۶۱ فیروزکوه و نیز بودر میکرونیزه فیروزکوه برای انجام آزمایشها استفاده شده است. ماسه شماره ۱۶۱ فیروزکوه از دانه بندی یکنواختی برخوردار بوده و از نظر خواص فیزیکی و منحنی های دانه بندی شباهت زیادی به ماسه های استاندارد توپورا و سنگنیاما دارد. با توجه به مشخصات فیزیکی و دانه بندی بودر

میکرونیزه، این نوع پودر را می توان در رده سیلت قرار داد. مشخصات ماسه و سیلت فیروزکوه و نیز ترکیب بکار رفته برای ساخت ماسه سیلتی در جدول (۱) ارائه شده است.

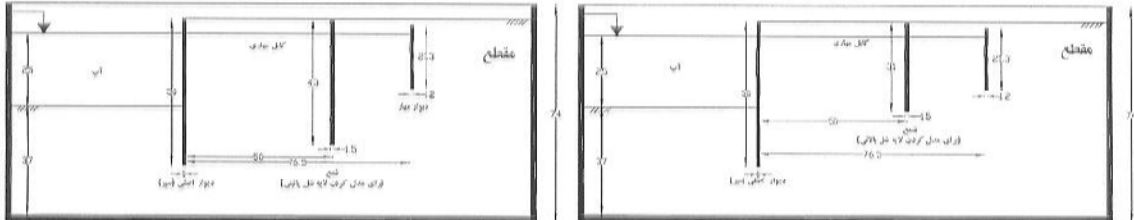
جدول (۱): مشخصات ماسه ۱۶۱ و سیلت فیروزکوه و ترکیب ماسه سیلتی بکار رفته

نوع خاک	چگالی دانه ها $G_s$	نسبت تخلخل حداکثر $e_{max}$	نسبت تخلخل حداقل $e_{min}$	قطر درصد عبوری ۵۰ $D_{50}(mm)$	درصد ریز دانه عبوری از الک شماره ۲۰۰ % Fe	ضریب یکنواختی Cu	ضریب دانه بندی Cc	حد روانی %LL	حد خمیری %PL	نشانه خمیری %PI
ماسه فیروزکوه	2.658	0.943	0.603	0.3	0	2.58	0.97	-	-	-
سیلت فیروزکوه	2.658	0.943	0.603	0.03	55	-	-	26	17.7	8.31
ترکیب ۱۵٪ سیلت با ۸۵٪ ماسه فیروزکوه	2.658	0.849	0.439	0.26	8.25	2.58	0.97	-	-	-

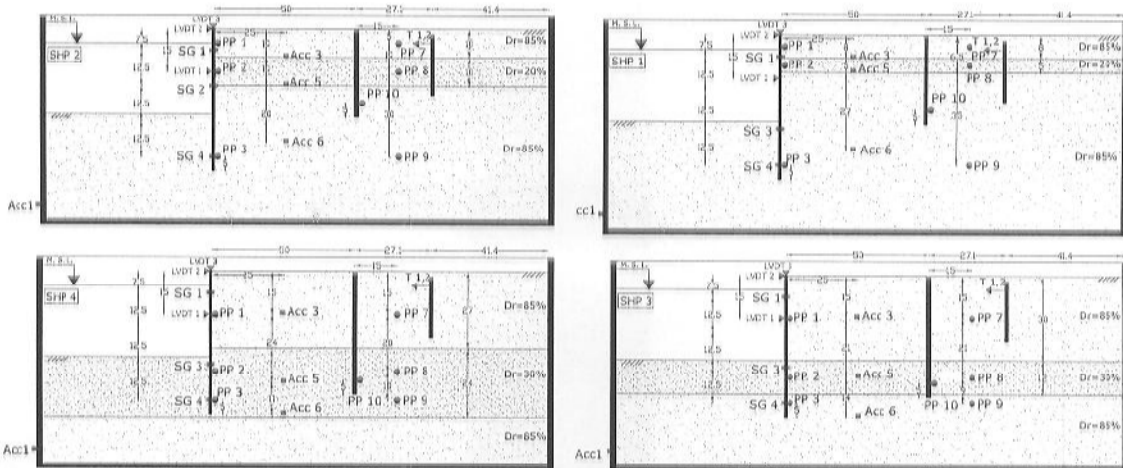
#### ساخت مدلها

برای ساخت مدلها از روش کوبش مرطوب استفاده شده است. این روش، ایجاد تراکم های مختلف را امکان پذیر کرده است. به این منظور ۱۵ درصد وزنی، آب به ماسه اضافه شده، و سپس در لایه های ۵ سانتیمتری در داخل جعبه ریخته شده و برای رسیدن به درصد تراکم مورد نظر به دقت کوبیده شده است. برای ساخت لایه شل ماسه سیلتی میانی از ترکیب وزنی ۱۵٪ سیلت و ۸۵٪ ماسه استفاده شده است با توجه به تراز قرار گیری این لایه در هر مدل، خطوط کمکی بر روی طلق رسم شده است که پس از رسیدن به تراز مورد نظر، این لایه همانند مراحل قبلی ولی توسط وزنه سبک تر و به آرامی کوبیده می شود تا تراکم کم لایه ماسه سیلتی مورد نظر بدست آید. در مراحل مناسب، دیوار، مهار، شمع، کابلهای مهاری و سنسورها در محل از پیش تعیین شده جاسازی می شوند. بعد از پر شدن جعبه، قسمتی از جلوی دیوار برای اعمال پیش تنیدگی حفاری شده و پس از پیش تنیدگی، جلوی دیوار تا تراز کف آب (تراز لایروبی) خاکبرداری شده است. این کار برای مدلسازی اجرای واقعی این نوع دیوارها بوده است. برای مشاهده تغییر شکلها بوجود آمده در هنگام بارگذاری لرزه ای، از ماسه رنگی از جنس ماسه فیروزکوه به ضخامت ۱ سانتیمتر در شبکه های ۱۰ سانتیمتری استفاده شده است. برای خارج کردن هوای موجود در فضای خالی خاک جهت امکان پذیر شدن اشباع کامل با آب، مدل با گاز دی اکسید کربن اشباع شده است. اشباع مدل با عبور دادن آب از زیر جعبه به صورت تدریجی و با سرعت ثابت انجام گرفته است و در آخرین مرحله قبل از انجام آزمایش، سربار ساخته شده بر روی مدل گذاشته می شود. بعد از ساخت مدل، شتاب هارمونیک با فرکانس ۶ هرتز، در جهت طولی مدل به آن وارد شده است. مدلهای ساخته شده از نظر هندسه کلی مشابه یکدیگر هستند. هر مدل شامل ۹ المان دیوار T، ۹ شکل المان مهار، ۱۷ المان شمع و ۱۸ کابل مهار می باشد. در شکل (۲)، مقطع و پلان مدل نشان داده شده است.

در شکل (۳) نحوه آرایش سنسورها و همچنین لایه بندی خاک در مدلهای ساخته شده نشان داده شده است. در این اشکال، PP نشان دهنده سنسور فشار آب حفره ای، ACC سنسور شتاب، LVDT سنسور جابجایی، SG سنسور خمش دیوار و T سنسور کشش کابل مهار می باشند. همچنین Dr نشان دهنده دانسیته نسبی خاک می باشد. در مدلهای SHP1 و SHP2 لایه ماسه سیلتی بالایی و در مدلهای SHP3 و SHP4 لایه ماسه سیلتی پایینی مدل شده است. اطلاعات کلی راجع به این آزمایشها در جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول h1 نشان دهنده ارتفاع لایه متراکم بالایی (لایه مقاوم در برابر روانگرایی)، h2 نشان دهنده لایه شل میانه ماسه سیلتی و H2 ضخامت خاک بستر می باشد. در مدل SHP1 به سبب تغییر شکلهای ناچیز، مدل تحت بارگذاری های مکرر قرار گرفته است که نتایج مربوط به آخرین بارگذاری در این تحقیق ارائه شده است.



شکل (۲): مقطع و پلان مدل



شکل (۲): نحوه آرایش سنسورها و لایه بندی خاک در مدلها

جدول (۲): اطلاعات کلی آزمایشها

طول شمع	دانشیه ارتفاع H2	h2			h1			نوع شتاب اعمالی	فرکانس حرکت (Hz)	حداکثر شتاب پایه (g)	شماره آزمایش
		دانشیه	اندازه (cm)	نوع خاک	دانشیه	اندازه (cm)	نوع خاک				
31	85%	20%	5	ماسه سیلتی	85%	8	ماسه	سینوسی	6	0.405	SHP1"
31		20%	10	ماسه سیلتی	85%	10	ماسه	سینوسی	6	0.342	SHP2
43	85%	30%	12	ماسه سیلتی	85%	30	ماسه	سینوسی	6	0.375	SHP3
43	85%	30%	24	ماسه سیلتی	85%	27	ماسه	سینوسی	6	0.286	SHP4

نتایج عمومی و تحلیل نتایج:

فشار آب حفره ای در لایه های شل و متراکم

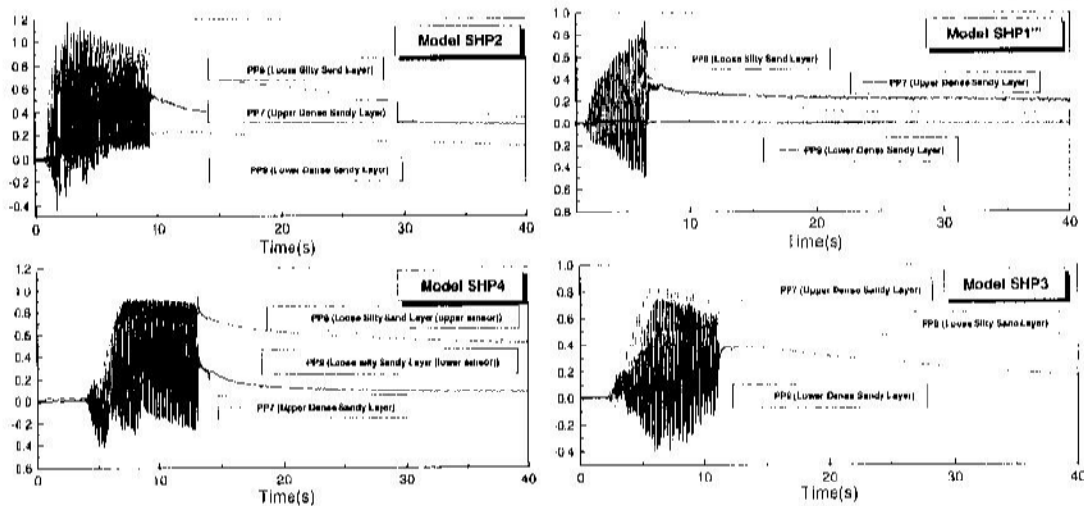
خاکهای واقعی از روی هم قرار گرفتن نامنظم ذرات با اندازه های مختلف تشکیل می شوند، بنابراین وقتی که خاک متحمل تغییر شکلهای برشی می شود، بعضی از ذرات خاک ممکن است تماس خود را از دست داده، در حالی که بقیه به عنوان بخشی از اسکلت خاک تماس خود را حفظ کنند، در این

حالت اضافه فشار آب حفره ای متناسب با تعداد نسبی نقاط تماس از بین رفته، تولید می شود. فرآیند روانگرایی خاکها به صورت کمی بر حسب نسبت فشار آب حفره ای اضافی  $\Delta u$ ، به تنش موثر قائم در محل  $\sigma'_v$ ، تعریف می شود و به عبارت دیگر داریم:

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_v} \quad (1)$$

که در این رابطه  $r_u$ ، نسبت اضافه فشار آب حفره ای نامیده می شود. افزایش  $r_u$  به معنای افزایش فشار آب حفره ای می باشد و روانگرایی کامل زمانی اتفاق می افتد که  $r_u$  به یک برسد ( $r_u = 1$ )، چنانچه قسمتی از تماس بین ذرات از بین نرفته باشد مقدار این نسبت کمتر از یک می باشد. در شکل (۴) چگونگی تغییرات نسبت فشار آب حفره ای اضافی در لایه های متراکم و شل ماسه سیلتی بالایی و پایینی مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه می شود با وجود بزرگتر بودن تنش مؤثر در لایه های پائین تر، در همه آزمایشهایی که نرم شدگی رخ داده است میزان نسبت فشار آب حفره ای لایه شل ماسه سیلتی موجود بین لایه های متراکم بالا و پائین در طول آزمایش بیش از سایر لایه ها و نزدیک به عدد یک می باشد. نوسانات این مقدار در تست SHP2 در سیکلهای اول از یک هم فراتر رفته که علت آن افزایش بسیار سریع فشار آب حفره ای در سیکلهای اول می باشد.

ضمناً مشاهده می شود که اضافه فشار آب حفره ای در لایه شل با سرعت بیشتری افزایش می یابد و مدت زمان بیشتری طول می کشد این فشار مستهلک شود.



شکل (۴): تغییرات نسبت فشار آب حفره ای اضافی در آزمایشها

در شکل (۵) مدلها پس از اعمال بار لرزشی نشان داده شده اند. همانطوری که مشاهده می شود با افزایش فشار آب حفره ای اضافی و در نهایت، وقوع نرم شدگی و روانگرایی، تغییر شکلهای قابل توجهی در خاک رخ داده که منجر به دوران دیوار شده است. در مدل SHP2، نرم شدگی خاک در ترازهای بالایی مدل به خصوص در جلوی مهار به وجود آمده است. در مدل SHP3 و SHP4، لایه شل ماسه سیلتی در پایین تراز لایروبی قرار دارد با وقوع نرم شدگی خاک در این لایه و لغزش لایه متراکم بالایی، تغییر شکل بیشتری در مدل رخ داده است و دوران دیوار نیز بیشتر می باشد. در مدل SHP4 دیوار علاوه بر دوران، مقداری هم به سمت جلو جابجا شده است که علت آن، ضخامت زیاد لایه شل در زیر تراز لایروبی و در نتیجه عدم کفایت نیروی مقاوم می باشد. در این سه مدل مقدار  $r_u$  لایه شل در همان سیکلهای اولیه، افزایش چشمگیری داشته است در حالی که در مدل SHP1، که تغییر شکل بسیار ناچیزی به وجود آمده، مقدار  $r_u$  به آرامی شروع به افزایش کرده و در سیکلهای آخر به بیشترین مقدار خود رسیده است. که علت آن، ضخامت بسیار کم لایه شل و مقاومت ذرات خاک در مقابل تغییر شکل برشی می باشد.

تأثیر حرکت دیوار بر روی تغییرات فشار آب حفره ای اضافی

در شکل (۶)، مقادیر  $r_u$  در نزدیک دیوار و نقاط دور از دیوار (بین مهار و شمع) رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود فشار آب حفره ای در پشت دیوار در مقایسه با نقاط هم تراز دور تر از دیوار افزایش کمتری داشته است، چراکه به دلیل حرکت دیوار به سمت دریا بخشی از فشار آب حفره ای ایجاد شده در پشت دیوار به سمت دریا جذب شود. موارد زیر می تواند علل کاهش فشار آب حفره ای اضافی در اثر حرکت دیوار باشد:

۱- در اثر حرکت دیوار در پشت دیوار مکش ایجاد می شود.