



## برآورد نیروی جانبی وارده بر دیوارهای حائل مجاور با خاکریزهای لایه‌ای تحت شرایط اشباع و غیراشباع

میلاذ بختیار، جواد احدیان\*

دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۸ مرداد ۱۳۹۵  
بازنگری: ۷ اسفند ۱۳۹۵  
پذیرش: ۲۲ اسفند ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

دیوار حائل  
نیروی جانبی  
خاکریز لایه‌ای اشباع  
گوه شکست

**چکیده:** بررسی وضعیت گوه شکست خاکریز پشت دیوار حایل به لحاظ نحوه‌ی توسعه‌یافتگی و ابعاد هندسی آن، مبین نحوه حرکت دیوار و میزان تخریب‌کنندگی ناشی از آن می‌باشد. در شرایط طبیعی خاکریزها به‌گونه‌ای هستند که عمدتاً لایه‌ای بوده و گاهی تحت شرایط اشباع شدن قرار می‌گیرند. از این رو تحقیق حاضر بر مبنای بررسی آزمایشگاهی گوه شکست حاصل از دوران دیوار حول پاشنه پایه‌گذاری گردید و اندازه‌گیری‌های فیزیکی لازم، جهت استفاده از روش ترسیمی در محاسبه نیروی ناشی از فشار جانبی خاکریزهای لایه‌ای در دو حالت اشباع و غیراشباع صورت پذیرفته است. برای این منظور مدل خاکریز پشت دیوار طره‌ای با چهار نوع لایه‌بندی مختلف از ترکیب دو نمونه خاک ریزدانه رسی و خاک ماسه‌ای ساخته شد. پروفیل عمقی خاکریزهای دو لایه‌ای به دو صورت شامل: لایه بالایی: رس، لایه زیرین: ماسه، لایه بالایی: ماسه، لایه زیرین: رس و پروفیل عمقی خاکریزهای سه و چهار لایه‌ای به صورت لایه بالایی: ماسه، لایه میانی: رس و لایه زیرین: ماسه و لایه بالایی: رس، لایه میانی اول: ماسه، لایه میانی دوم: رس و لایه انتهایی: ماسه در پشت مدل دیوار به‌گونه‌ای طراحی و اجرا گردید که ارتفاع لایه‌های تشکیل‌دهنده هر پروفیل مساوی باشد. نتایج نشان داد: نتایج آزمایشگاهی بدست آمده که بهره‌برداری از روابط تئوری موجود منجر به طرح محافظه‌کارانه دیوار حائل و در نتیجه افزایش هزینه اجرا می‌شود. عدم ایجاد گوه شکست از پای دیوار بر خلاف نتایج حاصل از تئوری‌های کلاسیک و همچنین متوسط کاهش ۳۲/۷۵ و ۲۹/۲۵ درصدی نیروی جانبی وارده بر دیوار حاصل از داده‌های آزمایشگاهی نسبت به مقادیر روش‌های رانکین و سیرنیواسا، شاهدهی بر این مدعا می‌باشد.

### ۱- مقدمه

به طور معمول در طرح‌های مهندسی از جمله در بنادر، گودبرداری‌ها، راه آهن، پل‌ها، جاده‌ها، ابنیه و کانال‌های فاضلاب به منظور جلوگیری از ریزش خاک یا نفوذ آب و همچنین پایدارسازی اجزای طرح، از سازه‌های نگهبان موسوم به دیوارهای حائل استفاده می‌شود. با توجه به کاربرد فراوان دیوارهای حائل در پروژه‌های مهندسی، دقت در طراحی آن‌ها حائز اهمیت می‌باشد [۱]. از طرفی به علت ارتباط سازه‌ها با پی و خاک محل اجرا، بررسی شرایط خاک و فشار وارده از طرف خاک در طراحی دیوار حائل دارای اهمیت می‌باشد [۲]. فشار گوه خاک مجاور دیوار، عامل ایجاد نیروهای جانبی وارد بر دیوار می‌باشد، که بزرگی این نیروها نیز به نوع حرکت دیوار بستگی دارد. دیوارهای حائل در سه وضعیت سکون، محرک و مقاوم، تحت فشارهای جانبی از سوی خاک قرار می‌گیرند [۳]. اگر جابه‌جایی در دیوار رخ دهد، فشار جانبی وارد بر دیوار نیز تغییر می‌کند. از این منظر بررسی حالات مختلف حرکت دیوار بر فشار جانبی اعمال‌شده بر دیوار دارای اهمیت می‌باشد [۴]. مطالعات صورت گرفته بر روی فشار جانبی به طور عمده به سه

قسمت آزمایشگاهی، عددی و تئوری تقسیم می‌شوند. سیرنیواسا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) در یک تحقیق تئوری به بررسی توزیع فشار در دو حالت فیزیکی و تحلیلی تحت انواع حرکت دیوار پرداختند و نتایج مطالعات آنان نشان داد که، دوران حول پاشنه دیوار بیشترین فشار محرک را ایجاد می‌کند. میزان نیروی محرک و مقاوم با توجه به هندسه گوه شکست محاسبه می‌گردد، که وضعیت گوه شکست نیز علاوه بر نوع و میزان حرکت دیوار به مشخصات فیزیکی خاکریز نیز وابسته می‌باشد [۷]. نتایج مطالعات آزمایشگاهی فنگ<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۴) مبین آن است که جابه‌جایی دیوار حائل شامل حالت‌های مختلفی از جمله دوران دیوار حول پاشنه، دوران حول بالای دیوار، حرکت انتقالی دیوار و یا دوران همراه با انتقال می‌باشد [۵]. شوکوآن<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی روش‌های کلی تئوری در محاسبه نیرو و توزیع فشار در حالات مختلف حرکت و دوران دیوار پرداختند که محاسبات نیروی دیوار در هر یک از حالات مورد بررسی، بر اساس تئوری کولمب<sup>۴</sup> (۱۷۷۶) انجام

1 Srinivasa et al

2 Fang

3 Shu-quan

4 Coulomb

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.ahadiyan@scu.ac.ir

اختلاف زیادی دارد که به شدت تحت تاثیر پدیده قوس زدگی می باشد [۱۸]. کولمب در سال ۱۷۷۶ برای تعیین فشار جانبی خاک روی ساختار دیوار حائل بر اساس نحوه جابه جایی دیوار (محرک و مقاوم)، روابطی را پیشنهاد نمود. بر طبق تئوری کولمب، فشار جانبی خاک در پشت دیوار حائل ناشی از اعمال فشار به وسیله گوه لغزش خاک می باشد. در این تئوری، سطح گسیختگی صفحه ای در نظر گرفته می شود و گوه لغزش بین دیوار و سطحی از پایه ی دیوار که با افق زاویه  $\alpha$  می سازد، به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته می شود. بر اساس تئوری کولمب، گوه لغزش از پایه دیوار تشکیل می شود و هر چقدر زاویه  $\alpha$  بزرگتر باشد، میزان فشار وارد بر دیوار حائل نیز بزرگتر می باشد. لازم به ذکر نکته آنکه، روابط کولمب بر اساس تعادل نیروها در تمام گوه لغزش بنا نهاده شده است. همچنین رانکین<sup>۵</sup> در سال ۱۸۵۷ برای تعیین فشار جانبی خاک در دیوار حائل روابطی ارائه نمود که در واقع ساده شده روش کولمب می باشد. در این روابط از شیب زمین، زاویه دیوار و اصطکاک بین خاک و دیوار صرف نظر شده است.

همان طور که اشاره شد، با توجه به اهمیت دیوارهای حائل، برآورد نیروی جانبی خاکریز نقش بسزایی در طرح دیوار دارد. میزان این نیرو تابعی از ابعاد هندسی گوه شکست خاکریز می باشد که آن هم به نوبه خود تحت تاثیر عواملی مانند نوع حرکت دیوار و خصوصیات فیزیکی خاکریز قرار می گیرد. از طرفی تطابق بیشتر مدل مورد بررسی با فیزیک خاکریزهای طبیعی، نتایج تحقیق را به ایجاد شرایطی جهت برآورد دقیق تر نیرو و در نهایت انجام بهتر طراحی رهنمون می گردد. با توجه به مرور تحقیقات گذشته، معلوم گردید که تاکنون بیشتر بررسی ها با وجود خاکریزهای همگن و خشک انجام شده است. این در حالی است که عموم خاک های طبیعی، لایه ای و ناهمگن بوده و پروفیل عمقی ناهمگن آن ها بویژه به لحاظ مسائل طراحی و اجرا قابل ملاحظه می باشد. از سوی دیگر طبیعت گاهی شرایطی را رقم می زند که دیوار حائل مورد نظر با خاکریزهای اشباع مجاور می گردد. بالا بودن سطح آب زیرزمینی و زهکشی اراضی زراعی مشرف به سواحل رودخانه ای از جمله مواردی می باشد که ممکن است خاک را تحت شرایط اشباع قرار دهند. از این رو تحقیق حاضر با هدف برآورد نیروی جانبی وارده بر دیوارهای حائل مجاور با خاکریزهای لایه ای تحت شرایط اشباع و غیراشباع انجام شده است.

## ۲- مواد و روش ها

همانگونه که در بخش قبل اشاره شد، در این تحقیق اثر خاکریز اشباع و غیر اشباع و همچنین خاک لایه بندی شده را بر خصوصیات صفحه شکست مورد بررسی قرار می گیرد. به منظور برآورد اهداف تحقیق، ابتدا یک مدل آزمایشگاهی از دیوار حائل طره ای ساخته شد، سپس نتایج حاصل از اندازه گیری ابعاد گوه شکست ایجاد شده تحت دوران محرک دیوار حول پاشنه، جهت برآورد نیروی جانبی وارده بر دیوار با روش حل ترسیمی معادله الاستوپلاستیک، مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مقادیر بدست آمده با

شده است، اما نحوه توزیع فشار و محل اثر برآیند نیروی مقاوم، به جابه جایی دیوار و زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار وابسته می باشد [۱۴]. چن در سال ۲۰۱۴ با بررسی تحلیلی حرکت دیوار بر فشار محرک خاک، یک روش تحلیلی جدید مبتنی بر تعادل حدی برای محاسبه ی فشار محرک خاک ارائه نمود و به این نتیجه رسید که توزیع فشار پشت دیوار، غیرخطی بوده و محل اثر نیرو در حالت محرک کمی بالاتر از  $1/3$  ارتفاع دیوار از پاشنه قرار می گیرد، که با نظریه کولمب متفاوت می باشد [۱۰]. اوریا<sup>۱</sup> و ابراهیمی در سال ۱۳۹۳ با بررسی تحلیلی توزیع تنش جانبی خاک روی دیوار حائل در شرایط دوران حول بالای دیوار با استفاده از معادلات دیفرانسیل تعادل و مدل کردن صفحه گسیختگی خاک با معادله منحنی اسپیرال لگاریتمی و در نظر گرفتن روابط تعادل با استفاده از معادلات دیفرانسیل، نتیجه گیری نمودند که با فرض پیشگی بودن گوه گسیختگی خاک پشت دیوار، محل اثر نیرو در شرایط دوران حول بالای دیوار در محل یک سوم ارتفاع قرار نداشته و با افزایش زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار کاهش می یابد [۸]. لیو<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۴ در یک پژوهش اثر فشار جانبی را بر دیوارهای حائل دایره ای با روش عددی FEM بررسی نمود و بیان کرد که فشار جانبی به صورت نمایی با افزایش جابه جایی دیوار، کاهش می یابد [۱۱]. راتو<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی تحلیلی اثر خاک چسبنده بر فشار محرک وارد بر دیوار حائل صلب پرداختند و نتایج مطالعات آنان نشان داد که کاهش فشار جانبی محرک وارد بر دیوار حائل صلب با افزایش زاویه اصطکاک دیوار و خاک همراه می باشد [۱۲]. سپهر و اوریا در سال ۱۳۹۰ با تحلیل عددی الاستوپلاستیک فشار جانبی محرک خاک روی دیوارهای حائل با روش المان های محدود در نرم افزار Plaxis به این نتیجه رسیدند که محل اثر برآیند نیروهای اکتیو تابعی از میزان جابه جایی دیوار می باشد. که برای جابه جایی های بسیار کم ( $\delta=0/001$  متر) و بسیار زیاد ( $\delta=1$  متر) در محل یک سوم ارتفاع دیوار از پاشنه قرار می گیرد، در حالی که برای جابه جایی های متوسط ( $\delta=0/003$  متر)، نقطه اثر نیرو می تواند در ارتفاعی بالاتر از یک سوم ارتفاع دیوار واقع گردد [۹]. مزارعی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی با عنوان اثر بافت و تراکم خاک غیراشباع در تحلیل آزمایشگاهی و الاستوپلاستیکی گوه شکست دیوار ساحلی رودخانه ای به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد خاک ریزدانه مقاومت جانبی خاکریز افزایش می یابد. همچنین با افزایش درصد تراکم، گوه شکست کوچکتری در توده خاک ایجاد می شود [۱۷]. بنمبارک<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی با عنوان مطالعه عددی فشار محرک خاک بر دیوار حائل صلب برای حالت های مختلف جابه جایی با روش تفاضل محدود با نرم افزار FLAC به این نتیجه رسیدند که در شرایط هیدرواستاتیک میزان حرکت پایه دیوار با شرایط واقعی هم خوانی دارد، همچنین در تحقیق آن ها توزیع فشار جانبی در حالت چرخش از بالای دیوار با توزیع هیدرواستاتیک

1 Aouria

2 Liu

3 Rao

4 Benmebarek

۲-۲- روش الاستوپلاستیک در خاک‌های غیرچسبنده

تخمین فشار جانبی در تئوری الاستوپلاستیک بر اساس تخمین حالت بحرانی انجام می‌شود. زمانی که شکست در توده خاک رخ می‌دهد، همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، گوه گسیختگی برای حالت حرکت محرک به سمت پائین حرکت می‌کند و بر اثر وزن گوه، نیرویی به سطح تماس دیوار و خاک اعمال می‌شود. با افزایش حرکت دیوار، زوایای اصطکاک داخلی خاک و زاویه اصطکاک دیوار و خاک افزایش یافته تا به حالت حدی خود برسند. در این حالت نیروهایی به صورت واکنش در سطح شکست خاک و بر سطح دیوار وارد می‌شوند. در سطح شکست AC زاویه اصطکاک به حالت حدی می‌رسد و نیروی عکس‌العمل، Q، وارد بر این سطح با خط عمود وارد بر سطح شکست، زاویه را تشکیل می‌دهد. معمولاً به دلیل وجود اصطکاک سطح تماس خاک با دیوار، قسمت بالایی سطح شکست خطی و قسمت پائین آن به منحنی نزدیک می‌باشد. از آنجایی که با فرض حالت خطی سطح شکست، نسبت به سطح شکست خمیده، می‌توان تقریب مناسبی از گوه مذکور را داشت [۵]. در این تحقیق نیز از فرض حالت خطی سطح شکست استفاده گردید. با توجه به سطح شکست خطی در شکل ۲ باید تعادل گوه ABC بررسی شود. نیروهای وارد بر گوه شکست ABC شامل موارد زیر است: نیروی وزن گوه، W، نیروی عکس‌العمل،  $E_a$ ، وارده بر AB (فشار جانبی،  $E_a$ ) که با افق زاویه‌ای برابر اصطکاک خاک و دیوار را ایجاد می‌کند، نیروی عکس‌العمل Q وارد بر سطح شکست نیز با عمود وارد بر سطح شکست زاویه‌ای برابر با  $\phi$  و با W زاویه‌ای  $-\phi\alpha$  را می‌سازد. در این شکل  $\alpha$  زاویه شکست خاکریز مورد نظر است، برای بدست آوردن  $E_a$  در روش الاستوپلاستیک معادله زیر که تابع دو متغیر از و است، ارائه می‌شود:

$$dE_a = \frac{\partial E_a}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial E_a}{\partial \phi} d\phi = 0 \quad (1)$$

که برای حل معادله فوق و تخمین فشار جانبی،  $E_a$ ، که تابع دو زاویه  $\phi$  و  $\alpha$  است باید دو معادله زیر حل شوند:

$$\frac{\partial E_a}{\partial \alpha} = 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial E_a}{\partial \phi} = 0 \quad (2)$$

برای حل معادله اول تئوری ریبهان<sup>۱</sup> (در سال ۱۸۵۷) بیان میدارد که باید مساحت مثلث ABC برابر با مساحت مثلث ACD باشد و برای حل معادله دوم نیز تئوری جکی (در سال ۱۹۴۸) بیان می‌دارد که باید شرایط زیر در شکل برقرار باشد:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha - \phi + \psi) &= 0 \\ \alpha - \phi + \psi &= 90^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

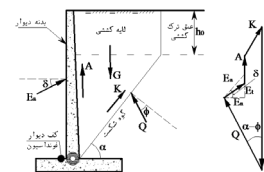
بر اساس معادله ۳ زاویه بین دو نیروی  $E_a$  و Q باید به اندازه ۹۰ درجه

میزان نیروی حاصل از دو روش تحلیلی دیگر مقایسه گردید. در ادامه ابتدا به معادلات الاستوپلاستیک و روش ترسیمی آن در خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده پرداخته می‌شود. سپس مشخصات مدل آزمایشگاهی تشریح می‌گردد.

۲-۱- روش الاستوپلاستیک در خاک‌های چسبنده

برای خاک‌های چسبنده، تخمین میزان جابه‌جایی مورد نیاز برای ایجاد حالت حدی دارای ابهاماتی می‌باشد. اگر تنش برشی در خاکریز بزرگتر از مقاومت برشی خاک باشد، پدیده خزش رخ می‌دهد. در این حالت اگر سرعت خزش ثابت بماند، مقدار اندازه فشار جانبی نیز ثابت باقی خواهد ماند. اگر حرکت دیوار به صورت پیوسته نباشد، فشار جانبی به دلیل اینکه تنش برشی بر سطح بحرانی کوچک‌تر می‌شود، افزایش می‌یابد. مقدار بحرانی فشار جانبی را می‌توان فقط با در نظر گرفتن مقدار جابه‌جایی دیوار در حالتی که خزش رخ می‌دهد، با توجه به اینکه آسیبی به دیوار وارد نگردد، محاسبه نمود. اگر خاک رسی قابلیت تورم داشته باشد، یا سیستم زهکشی عملکرد مناسبی نداشته باشد، برای از بین بردن فشار تورم، باید با طراحی یک سیستم زهکشی مناسب، آب سطحی هدایت شود. با توجه به دلایل ذکر شده، روش طراحی دیوار حائل برای خاکریز چسبنده اساساً نامعین می‌باشد. آیرلند در سال ۱۹۶۴ در تحقیقی به این نتیجه رسید که رفتار ۶۸ درصد از دیوارهای حایل ساخته شده بر خاک رس و ۵۱ درصد دیوارهای حایل بنا شده بر خاک چسبنده دارای رفتار نامطلوبی می‌باشند. با فرض اینکه جابه‌جایی دیوار به اندازه کافی زیاد باشد که باعث برانگیخته شدن مقاومت برشی خاکریز گردد، بر این اساس در قسمت‌های بالای خاکریز تنش‌های کششی ایجاد می‌شود که باعث ایجاد ترک، در قسمت‌های بالایی خاکریز می‌گردد. این لایه‌ها عملکردی شبیه به سربار دارند و هیچ تنشی به پشت دیوار اعمال نمی‌کنند. در عمق‌های بیشتر از ترک کششی فشار جانبی اعمال می‌گردد.

برای مطالعه پایداری گوه لغزش، نیروهای وزن گوه W، برآیند نیروهای برشی و قائم Q، که با امتداد قائم سطح AD، زاویه  $\phi$  می‌سازد. چسبندگی بر سطح AD ( $K=cl$ )، فشار جانبی  $E_a$  و چسبندگی  $A=a(h-h_0)$  در نظر گرفته می‌شوند. چند ضلعی نیروها را برای سطح شکست اختیاری AD تشکیل می‌شود، جهت و اندازه همه‌ی نیروها به جز  $E_a$  مشخص می‌باشد. که این نیرو نیز از تعادل گوه شکست به دست می‌آید. شکل ۱ جزئیات این حالت را بهتر نمایش می‌دهد.



شکل ۱: نیروهای جانبی وارد بر دیوار در حالت خاک چسبنده (به نقل از ویتنرکرن و فنگ، ۱۹۷۵ [۱۶])

Fig. 1. lateral forces acting on wall in the cohesive soil conditions

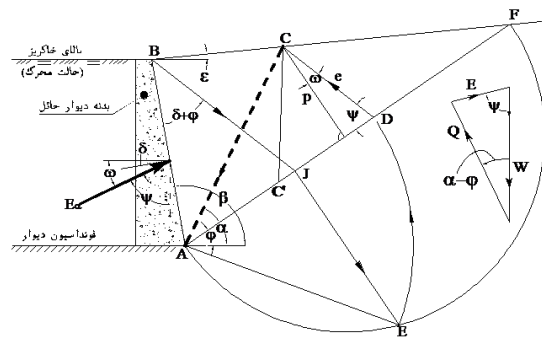
۲-۳- مدل آزمایشگاهی

برای دستیابی به اهداف مدنظر تحقیق، یک مدل آزمایشگاهی به شکل مکعب مستطیل به طول ۱ متر، عرض ۰/۳۵ متر و ارتفاع ۱ متر در آزمایشگاه مدل های فیزیکی و هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد. این مدل تنها به منظور هدف این تحقیق ساخته شد. در این مدل، یک دیوار حائل طرهای، طراحی و ساخته شد که در وسط فلوم آزمایشگاهی نصب گردید. مکعب مدل توسط ورق های ۴ میلیمتری از سه طرف و یک شیشه ۸ میلیمتری از یک طرف به دلیل مشاهده روند تغییر شکل خاک در حین انجام آزمایش ها و داده برداری از آزمایش ها ساخته شد. دیوار حایل مدل سازی شده در آزمایش به مقیاس هندسی ۱ به ۱۰ برای دیوار حایل بتنی طراحی شده و توسط آنالیز دیوار بهینه به ارتفاع ۵ و وزن مخصوص خاکریز برابر با ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب مدل گردید. از آنجا که هدف تحقیق حاضر بررسی گوه شکست خاکریز تحت جابجایی محرک بدنه دیوار می باشد، پی دیوار به کف مکعب ثابت گردید. برای این منظور که در طی مراحل خاکریزی حرکتی در بدنه دیوار رخ ندهد، سعی شد دیوار به صورت صلب در این مدل قرار گیرد. برای وصول به این هدف بدنه دیوار با ورق های آهنی ۴ میلیمتری به صورت مجزا از پی، تعبیه شد برای پوشش اسکلت دیوار ساخته شده از ورق آهنی ۴ میلی متری استفاده گردید، به گونه ای که فقط تحت پایه و از طریق گیربکس دستی دوران حاصل می شد و در بدنه دیوار هیچ گونه تغییر شکلی رخ نمی دهد. برای ایجاد چرخش یک لوله آهنی به قطر ۵ سانتی متر به انتهای بدنه دیوار جوش داده شد. در دو قسمت انتهایی این لوله آهنی از بلبرینگ هایی برای ایجاد چرخش استفاده شد و از میان قطر کوچک آن یک لوله ی آهنی در میان فضای لوله بزرگ تر عبور داده شد. قطر بیرونی بلبرینگ ها به این دلیل که حرکت دیوار فقط بر اساس حرکت دایره میانی بلبرینگ انجام شود، ثابت گردید. در واقع برای ایجاد حرکت، بدنه دیوار بر روی یک پی ثابت و در بخش میانی آن، لوله ی کوچک از بلبرینگ ها عبور داده شده بر دو قسمت انتهایی پی طوری جوش داده شدند که بتواند آزادانه چرخش کند. به منظور کنترل حرکت بدنه از لوله ای به قطر ۳ سانتی متر است و شافت پیچی به طول ۰/۶ متر به صورت محوری استفاده شد. قرارگیری بلبرینگ ها بر روی شافت با استفاده از دستگاه پرس قوی صورت پذیرفت تا هیچ گونه فاصله ی آزادی برای ایجاد چرخش صورت نپذیرد. طول شافت مورد نظر طوری انتخاب گردید که پس از اتصال به بدنه دیوار و از سمت راست مدل در خارج از فلوم نیز دارای یک دسته برای ایجاد چرخش در شافت باشد. در نهایت با چرخش دسته متصل به شافت، لوله های تعبیه شده در انتهای بدنه باعث دوران دیوار در جهت ساعتگرد و پادساعتگرد می شود. در واقع میزان چرخش بر اساس طول گام های شافت قابل کنترل می باشد. از طرفی پس از انتهای هر آزمایش برای تخلیه خاک که در پشت دیوار قرار می گیرد یک دریچه تخلیه، تحت عنوان دریچه تحتانی در کف فلوم تعبیه گردید تا خاک هر آزمایش تخلیه و بارگیری برای آزمایش بعدی امکانپذیر گردد. شکل ۳ کلیه جزئیات این فلوم آزمایشگاهی را نشان می دهد.

باشد. با ایجاد این شرایط در بررسی معادله ۱ برای گوه شکستگی می توان زاویه سطح شکست  $\alpha$  و نیروهای وارد بر گوه را بدست آورد. راه حلی ترسیمی بر اساس که شرایط معادله ۲ و ۳ در حل معادله ۱ و بدست آوردن پارامترهای مورد نظر در شکل ۲ ارائه شده است. در روش ترسیمی خطی از نقطه B با زاویه ترسیم شده تا خط رسم شده AF که با افق زاویه می سازد را در نقطه J قطع کند. سپس نیم دایره های به قطر AF رسم گردیده و از نقطه J خطی عمود بر AF اخراج می گردد تا دایره ی رسم شده را در نقطه E قطع کند. در مرحله بعد دایره ای با شعاع AE رسم شده تا نقطه برخورد D تشکیل شود. سپس از نقطه D خطی به موازات BJ ترسیم شده و نقطه برخورد این خط با سطح افق، نقطه C که نقطه برخورد سطح شکست بحرانی با سطح خاک است را نتیجه می دهد. در نهایت با رسم خط AC خط شکست مورد نظر بدست می آید. با توجه به این حل ترسیمی برآیند فشار جانبی به صورت زیر بدست می آید:

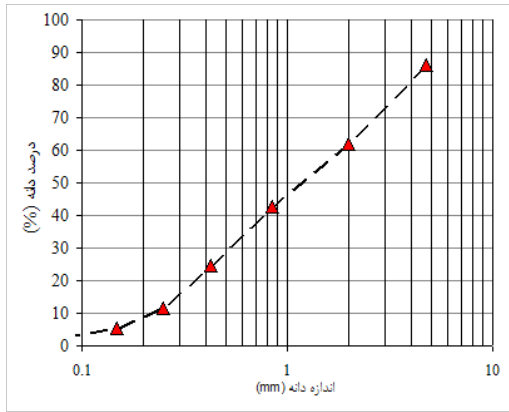
$$\gamma E_a = \frac{pe}{2} \quad (4)$$

در این معادله p اندازه خط عمود رسم شده از C بر خط AF است، e نیز اندازه خط CD در شکل است. بعد از محاسبه ی نیروی برآیند فشار جانبی از راه حل گرافیکی مثلث نیرو را برای نیروهای وارد بر گوه بدست آمده تشکیل داده و از بررسی تعادل نیروهای گوه های نشان داده شده در شکل ۲ و تشکیل مثلث نیرو، می توان عکس العمل را برای سطح شکست بدست آمده در خاکریز مورد نظر محاسبه نمود.

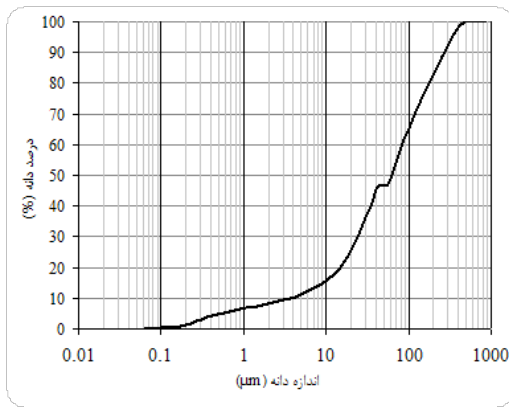


شکل ۲: روش ترسیمی ارائه شده در تحلیل الاستو پلاستیک برای خاک های غیر چسبنده (به نقل از وینتر کرن و فنگ، ۱۹۷۵) [۱۶]

Fig. 2. graphical method in the elastoplastic analysis for cohesionless soils



الف

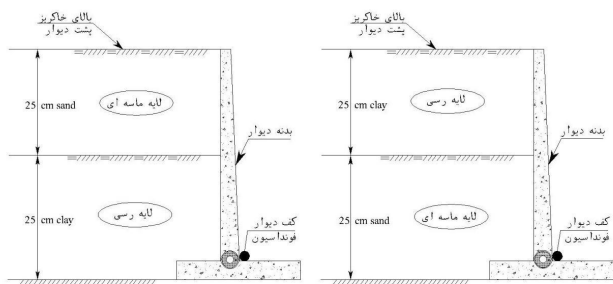


ب

شکل ۴: منحنی دانه‌بندی خاک (الف) خاک درشت دانه (ب) خاک ریز دانه

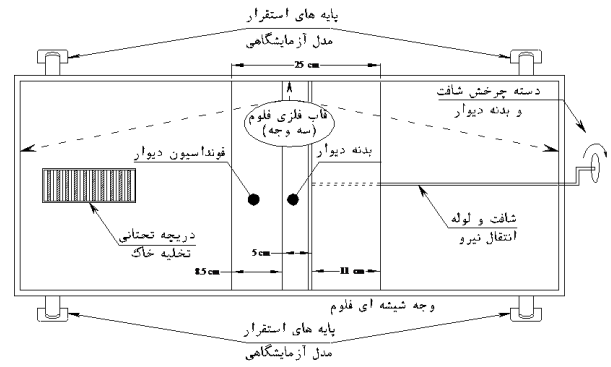
Fig. 4. Soil grading curve (A) Coarse Grain soil (B) fine grained soil

در این آزمایش‌ها، ۴ نمونه خاکریز به صورت لایه‌بندی که حالت لایه‌ها به صورت لایه بالایی: رس، لایه زیرین: ماسه، شکل ۵-الف، لایه بالایی: ماسه، لایه زیرین: رس، شکل ۵-ب، لایه بالایی: ماسه، لایه میانی: رس و لایه زیرین: ماسه، شکل ۵-ج و لایه بالایی: رس، لایه میانی اول: ماسه، لایه میانی دوم: رس و لایه انتهایی: ماسه، شکل ۵-د ساخته شد. لازم به ذکر است که ارتفاع دیوار بین لایه‌ها به طور مساوی تقسیم گردید، به گونه‌ای که ارتفاع لایه‌ها در هر آزمایش یکسان در نظر گرفته شد.

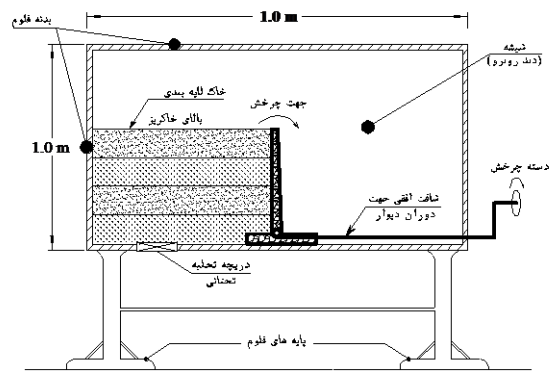


ب

الف



الف



ب

شکل ۳: الف) نمایی از پلان فلوم آزمایشگاهی (ب) نمای جانبی دیوار در فلوم

Fig. 3. A: view of the laboratory flume plan B: Side view of the wall in the flume

## ۲-۴- روش انجام آزمایش

در این آزمایش دو نمونه خاک ریزدانه و درشت دانه به طور جداگانه تهیه شد. قبل از انجام هر آزمایش از هر دو نمونه خاک نمونه‌برداری صورت گرفته و رطوبت وزنی دو نمونه خاک اندازه‌گیری می‌گردید. به این منظور رطوبت دو نمونه خاک به صورت رطوبت طبیعی ۲ درصد منظور گردید. قبل از انجام آزمایش‌ها، جهت تعیین دانه‌بندی خاک درشت دانه و ریزدانه در آزمایشگاه مکانیک خاک، از هر دو نوع، نمونه‌برداری بعمل آمد، و دانه‌بندی خاک درشت دانه با روش الک و دانه‌بندی خاک ریز دانه، از طریق تفکیک لیزی در دستگاه مسترسایزر تعیین گردید. شکل ۴ منحنی دانه‌بندی دو نمونه خاک را به طور مجزا نشان می‌دهد.



از طی مراحل فوق و ایجاد خاکریز، حرکت بدنه دیوار به صورت محرک و با سرعت کنترل شده (بر حسب سرعت چرخش شافت) در مدت زمان معین برای حرکت ۳۸ درجه‌ای از حالت عمود انجام پذیرفت. از آنجایی که هدف تحقیق حاضر، اثر چرخش ناگهانی دیوار بر توده لغزش خاکریز می‌باشد، لذا با سرعت کنترل شده و با حرکت سریع، دوران دیوار انجام شد تا در نهایت همه نمونه‌های خاکریز تحت حرکت ۳۸ درجه‌ای در دیوار قرار گرفته و گوه شکست خاکریز شکل می‌گیرد، برای دستیابی به زاویه ۳۸ درجه برای یک نوع خاکریز، آزمایش‌های متعددی با زوایای مختلف چرخش انجام شد، نتایج نشان داد در زاویه ۳۸ درجه، شکست ناگهانی رخ می‌دهد، در صورتی که در سایر زوایاها (زاویه‌های کوچکتر از ۳۸ درجه) یا ریزش رخ نمی‌داد یا دارای جابه‌جایی بسیار کم در خاکریز مشاهده گردید که گوه شکست به طور کامل تشکیل نمی‌گردد. بنابراین کمترین زاویه‌ای (۳۸ درجه) که در آن خاک دچار لغزش ناگهانی می‌شود مبنای آزمایشات قرار گرفت. پس از حرکت ناگهانی دیوار، خاکریز پشت آن دچار شکست شده و گوه شکست ایجاد میشد. لازم به توضیح است که در کلیه آزمایش‌ها پس از آماده‌سازی خاکریز درون فلوم آزمایشگاهی و اعمال سرعت ناگهانی برای دیوار و شکل‌گیری گوه شکست، با توجه به وضوح دید در یک طرف فلوم که از جنس شیشه بود، مشخصات هندسی آن با استفاده از خط‌کش و نقاله مدرج به طور دقیق برداشت گردید. نیروهای وارد بر گوه شکست از پارامترهای مهم در طراحی ایمن وارد بر دیوار هستند، اصولاً برای طراحی دیوار حائل، گوه شکست خاکریز را بر اساس تئوری‌های کلاسیک از جمله کولمب و رانکین به دست می‌آید. در این تحقیق شکل منحنی گوه شکست به دست آمده از آزمایش‌ها با شکل گوه حاصل از تئوری‌های کلاسیک مقایسه گردید. در نهایت با توجه به لایه‌بندی خاکریزهای مورد آزمایش و سطح شکست، تفاوت منحنی گوه شکست آزمایش با منحنی گوه شکست خاک در تئوری‌های کلاسیک مقایسه شد. خاکریزهای ساخته شده در پشت دیوار حایل با تراکمی بین ۹۰ تا ۹۵ درصد مقدار حداکثر آزمایشگاهی تهیه شدند.

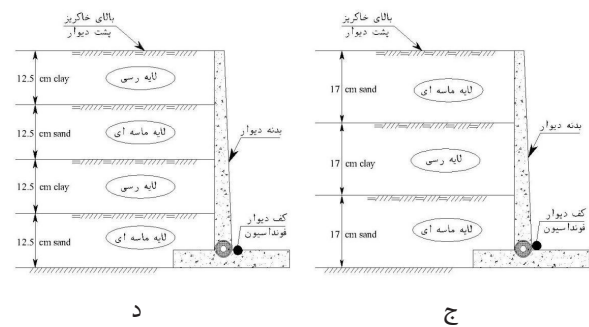
#### جدول ۱: مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده برای خاکریزهای پشت دیوار حائل

Table 1. Physical Properties of Soils Used for the embankment behind the retaining wall

نوع خاکریز	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	چسبندگی خاک (KN/m <sup>2</sup> )	زاویه اصطکاک $\phi$
رس	۱/۸	۱۷	۳۳
ماسه	۱/۵۶	۰	۲۹

#### ۳- نتایج و بحث

در این تحقیق برای بررسی اثر لایه‌بندی با حرکت دیوار بر اساس روش ارائه شده در بخش قبل اقدام به ترسیم خط گوه شکست ناشی از اعمال



شکل ۵: جزئیات لایه‌بندی در خاکریزهای مورد استفاده در پشت دیوار حائل

Fig. 5. Details of the layering in the embankment used behind the retaining wall

در این مرحله بدنه دیوار مدل در حالت عمود با زاویه ۹۰ درجه تنظیم شده و لایه‌ها به ترتیب به صورت آهسته و در لایه‌های کم عمق به درون مدل وارد گردید. به نحوی که با ریزش، بر لایه‌ی زیرین کمترین تراکم ممکن ایجاد گردد. پس از رسیدن هر لایه خاک به ارتفاع مورد نظر، لایه بالایی به همین منوال به درون مدل وارد می‌گردد. با توجه به اهداف تحقیق و بررسی اثر لایه‌بندی و حالت اشباع و غیر اشباع خاکریز پشت دیوار بر گوه شکست، تمام مراحل فوق برای خاکریز اشباع و غیر اشباع با این تفاوت که در حالت اشباع پس از انجام مراحل فوق خاکریز پشت دیوار اشباع نیز می‌گردد، انجام شد. در عمل برای اشباع کردن خاک دو روش وجود دارد: روش اول اینکه با اضافه کردن آب و بدون تغییر در حجم خاک، فضای خالی از آب پر شده و خاک را اشباع می‌گردید. در این روش به علت عدم تغییر حجم خاک، وزن مخصوص خشک خاک و نسبت تخلخل ثابت می‌ماند. روش دوم اینکه با کاهش حجم خاک و بدون تغییر در رطوبت آن، هوای موجود در فضای خالی را خارج شده و خاک اشباع می‌گردد. در این تحقیق از روش اول بهره گرفته شد. بدین ترتیب که پس از تشکیل پروفیل عمقی خاک جهت ایجاد هر یک از حالات مورد نظر لایه‌بندی، با تزریق جریان بسیار آرام آب در پشت دیوار، رطوبت خاکریز به تدریج تا ایجاد شرایط اشباع افزایش می‌یافت. جهت حصول اطمینان، روند اشباع شدن خاک لایه‌ای، از وجه شیشه‌ای مقابل مدل به دقت مشاهده می‌شد. افزایش سطح آب بر روی دیوار پس از اجرای عملیات، از دیگر علائم ظاهری ایجاد شرایط اشباع خاکریز به شمار می‌رفت. با اطمینان از اشباع بودن خاکریز، عملیات دوران دیوار حول پاشنه جهت ایجاد گوه شکست انجام می‌پذیرفت. سپس برای محاسبه وزن مخصوص صحرائی، برای خاک‌های درشت‌دانه از روش بالون و برای خاک‌های ریزدانه از روش مغزه‌گیری با استوانه‌های استاندارد استفاده شد. در نهایت با نمونه‌برداری از خاکریز مورد نظر و انجام آزمایش برش مستقیم در هر نمونه خاکریز پارامترهای مقاومتی خاک و اصطکاک بین خاک و دیوار به دست آمد. جدول ۱ مشخصات کلی خاکریزهای مورد استفاده در آزمایش‌های این تحقیق را نشان می‌دهد. بعد

در شکل ۶ در حالت اشباع به علت افزایش درجه اشباع خاک رسی، چسبندگی نیز افزایش می‌یابد [۶]. چسبندگی زیاد مانع از حرکت لایه رسی بعد از حرکت دیوار می‌گردد و اجازه تشکیل گوه شکست در این حالت را نمی‌دهد. از طرفی بر خلاف حالت اشباع، در حالت غیر اشباع و با لایه‌بندی یکسان به علت چسبندگی کمتر خاک رس، گوه شکست در لایه رسی و همچنین در لایه ماسه‌ای اتفاق می‌افتد که مشاهدات آزمایش بیشتر بودن زاویه شکست رس (۷۸ درجه) نسبت به زاویه شکست ماسه (۵۳ درجه) را در این حالت گزارش می‌دهد. از طرفی در شکل ۶ مشخص می‌شود که به محض ورود گوه‌ی شکست به لایه رسی، خط شکست خمیده شده و به صورت افقی و کششی در لایه‌ی رسی امتداد می‌یابد. این موضوع در لایه‌ی اول شکل ۷ نیز قابل مشاهده بوده و نمایش دهنده تغییر شکل پلاستیک در لایه رسی به دلیل تنش‌های کششی می‌باشد. به دلیل این که لایه ماسه‌ای به هیچ وجه تنش‌های کششی را تحمل نمی‌نماید. لازم به توضیح است که به دلیل وجود لایه‌های کششی در رس برای شکل ۶ در لایه رسی ترک کششی تا عمق نهایی آن رخ داده که به دلیل تأثیر چسبندگی در لایه رس، فشار محرک در ارتفاع ترک کششی منفی می‌شود. نکته جالب توجه آنکه چنین پدیده‌ای در حالت اشباع مشاهده نگردید. از نظر کمی در شکل ۷ زاویه شکست ماسه (۵۶ درجه) در حالت اشباع از زاویه شکست ماسه (۶۴ درجه) در حالت غیر اشباع کمتر می‌باشد، همچنین زاویه شکست رس (۵۹ درجه) در حالت اشباع از زاویه شکست رس (۷۷ درجه) در حالت غیر اشباع کمتر می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌گردد در حالت اشباع گوه شکست حاصل شده از دوران دیوار به مراتب کوچکتر از حالت غیر اشباع می‌باشد، در نتیجه نیروی طراحی در حالت اشباع نسبت به حالت غیر اشباع کمتر می‌باشد. در این لایه‌بندی به علت قرارگیری لایه ماسه در بالای لایه رس، به منزله‌ی سربار لایه‌ی رسی خواهد بود که به این علت در این لایه‌بندی ترک کششی اتفاق نمی‌افتد. در حالت غیر اشباع یک قوس شدگی در لایه رس اتفاق می‌افتد، در حالی که در حالت اشباع چنین اتفاقی رخ نداده است.

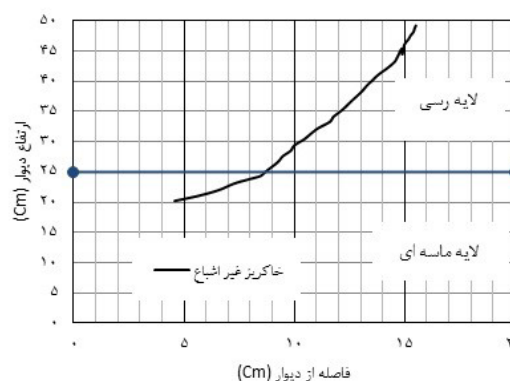
### ۳-۲- حالت سه لایه: لایه بندی ماسه، رس، ماسه

در حالت سه لایه نیز آزمایش‌های گوه شکست انجام گردید که شکل ۸ مسیر خط شکست در حالت محرک خاک را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد شیب سطح شکست برای لایه‌ی فوقانی در حالت غیر اشباع از حالت اشباع بزرگتر بوده ولی توسعه شکست برای لایه دوم که رس می‌باشد، متفاوت است. در این سری از آزمایش‌ها نیز مطابق با شرایط گذشته این حالت لایه‌بندی برای هر دو حالت اشباع و غیر اشباع یکسان در نظر گرفته شد. زاویه شکست لایه ماسه فوقانی (۴۲ درجه) در حالت اشباع از زاویه شکست لایه فوقانی ماسه (۶۶ درجه) در حالت غیر اشباع کوچکتر می‌باشد. زاویه شکست در لایه میانی رس (۴۸ درجه) در حالت اشباع از زاویه شکست لایه میانی رس (۷۷ درجه) در حالت غیر اشباع کمتر می‌باشد. نکته قابل توجه اینکه در هر دو حالت اشباع

نیروی اکتیو گردید. برای تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایشات انجام شده از نرم افزار Engauge Digitizer 4.1 استفاده شد. در این تحقیق ابتدا به بررسی حالات خاک اشباع و غیر اشباع در شرایط یکسان لایه‌بندی بر خاکریز پشت دیوار پرداخته شد، سپس به بررسی اثر لایه‌بندی خاکریز پشت دیوار در هر یک از حالات اشباع و غیر اشباع پرداخته شد، در ادامه به بررسی تغییرات پارامترهای هندسی گوه شکست در نمونه‌های آزمایشگاهی و تئوری الاستوپلاستیک پرداخته می‌شود و در نهایت نتایج این تحقیق با نتایج سایر محققین مقایسه شده است.

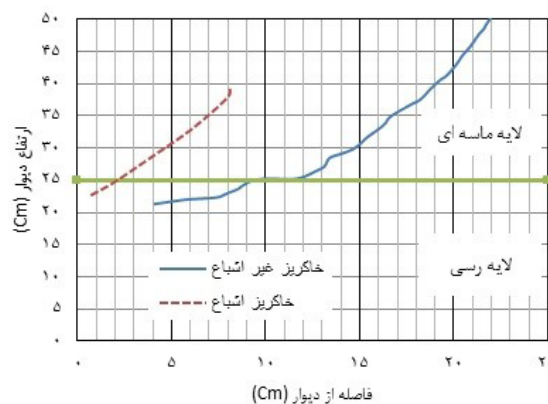
### ۳-۱- حالت دو لایه: ماسه و رس

شکل ۶ تغییرات شیب گوه شکست در لایه‌های مختلف را نمایش می‌دهد آزمایش‌های انجام شده در این بخش به دو دسته لایه‌ی بالایی رسی، لایه پایینی ماسه‌ای و همچنین لایه‌ی بالایی ماسه‌ای، لایه پایینی رسی تقسیم‌بندی گردید. شکل ۶ حالت اول یعنی لایه رس در بالا و ماسه‌ای را پایین را نمایش داده و حال آنکه شکل ۷ برعکس لایه‌ی ماسه‌ای در بالا و رسی در پایین را نمایش می‌دهد.



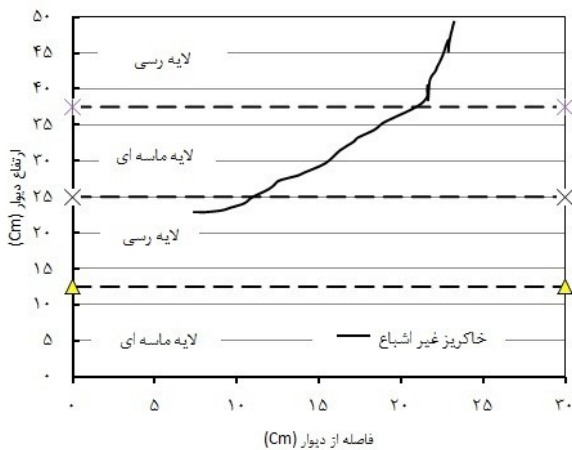
شکل ۶: تغییرات گوه شکست در حالت دو لایه رس روی ماسه

Fig. 6. Changes in failure wedge in two-layer state of clay on the sand



شکل ۷: تغییرات گوه شکست در حالت دو لایه ماسه روی رس

Fig. 7. Changes in failure wedge in two-layer state of sand on the clay



شکل ۹: تغییرات گوه شکست در حالت چهار لایه و اشباع و غیر اشباع

Fig. 9. Changes in failure wedge in four-layer state for saturated and unsaturated state

جدول ۲: زوایای شکست لایه‌های خاک در حالات مختلف لایه‌بندی بر حسب درجه

Table 2. The failure degree of the soil layers in different layering modes in degrees respectively

تعداد لایه	ترتیب لایه	اشباع	غیر اشباع	تعداد لایه	ترتیب لایه	اشباع	غیر اشباع
۴	۳	ماسه	۴۲	۷۳	۰	۰	۶۶
۴	۳	رس	۴۸	۴۶	۰	۰	۷۷
				۷۴	۰	۰	۰
۲	۱	رس	۰	۰	۰	۰	۰
				۰	۰	۰	۰
۲	۱	ماسه	۰	۶۴	۵۶	۰	۷۸
				۷۷	۵۹	۰	۵۳

مطابق با جدول فوق مشخص می‌شود که به طور کلی در حالت اشباع به علت اعمال نیروی چسبندگی زاویه شکست خاکریز پشت دیوار کاهش می‌یابد. میانگین زاویه شکست در حالت اشباع و در لایه‌بندی سه لایه ۵۸/۸ درصد کاهش می‌یابد و در حالت اشباع و لایه بندی دو لایه ماسه فوقانی و رس تحتانی زاویه شکست عمومی به اندازه ۲۲/۶ درصد کاهش می‌یابد. از این رو افزایش لایه‌بندی گاه باعث کاهش زاویه شکست عمومی خاکریز خواهد شد. همچنین بر اساس نتایج جدول ۲ می‌توان دریافت که در حالت غیراشباع موقعی که لایه رسی در بین لایه‌های ماسه‌ای قرار گیرد، به دلیل پذیرش تغییر شکل پلاستیک گوه شکست را در خود مستهلک نموده و ابعاد هندسی آن را کاهش می‌دهد. البته زمانی که در حالت تنش‌های کششی قرار گیرد، چنین خاصیتی را از خود نشان نمی‌دهد. برای نمایش بهتر اثر لایه‌بندی بر خصوصیات هندسی گوه شکست بهتر این است تا کلیه مرزهای شکست بر روی یک شکل قرار گیرند. از این رو شکل ۱۰ تغییرات مرز گوه

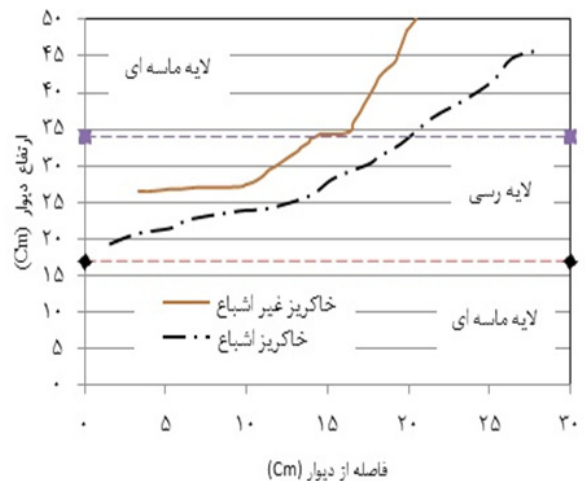
و غیراشباع، گوه شکست از لایه رس تا لبه دیوار تشکیل می‌گردد. نکته قابل توجه دیگر این است که توسعه شکست در حالت غیراشباع نسبت به صورت اشباع کوچکتر است. همچنین در حالت اشباع توسعه گوه شکست به صورت خطی و در حالت غیراشباع به صورت غیر خطی در لایه رسی اتفاق می‌افتد.

### ۳-۳ حالت چهار لایه: لایه بندی رس، ماسه، رس، ماسه

در شکل ۹ تغییرات شیب گوه شکست در لایه‌های مختلف را نمایش می‌دهد. در این شکل گوه شکست دیوار در دو حالت اشباع و غیراشباع آورده شده است.

در حالت چهار لایه و در حالت اشباع همانطور که قبلاً اشاره گردید، به علت افزایش درجه اشباع، چسبندگی در لایه رسی افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که در لایه ماسه‌ای که در بین دو لایه رسی قرار دارد، با افزایش چسبندگی در دو لایه رسی عملاً اجازه جابه‌جایی در لایه ماسه‌ای با حرکت دیوار داده نشده است و هیچ گونه شکستی در حالت اشباع رخ نمی‌دهد.

بر خلاف حالت اشباع، در حالت غیر اشباع با لایه‌بندی یکسان گوه شکست تشکیل شده‌است. به گونه‌ای که از نظر کمی زاویه شکست در لایه رس فوقانی ۷۳ درجه، در لایه ماسه‌ای میانی ۴۶ درجه و زاویه شکست در لایه رس زیرین ۷۴ درجه می‌باشد. از طرفی در حالت غیر اشباع ترک کششی در لایه رس فوقانی و همچنین قوس شدگی در لایه رس میانی رخ داده است. جدول ۲ نتایج زوایای شکست در کلیه آزمایش‌های تحقیق حاضر را نمایش می‌دهد.



شکل ۸: تغییرات گوه شکست در حالت سه لایه در حالت اشباع و غیر اشباع

Fig. 8. Changes in failure wedge in three-layer state for saturated and unsaturated state



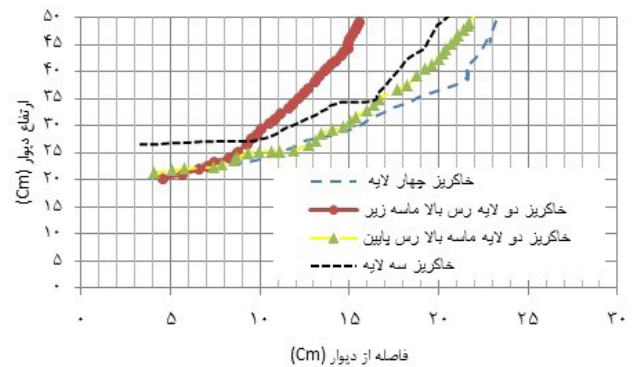
همانگونه که در شکل ۱۰-ب مشاهده می‌شود، در حالت اشباع با کاهش درصد حجمی رس، میزان توسعه گوه شکست افزایش می‌یابد. در جدول ۳ فاصله‌ی گوه شکست فاصله از پای دیوار در محل برخورد با دیوار در دو حالت اشباع و غیر اشباع ارائه شده است.

نکته مهمی که از نتایج جدول ۳ قابل ملاحظه می‌باشد، این است که گوه شکست در هیچکدام از لایه‌ها در حالت اشباع و غیر اشباع از پای دیوار رخ نداده است. از نظر تحلیلی در حالت چهار لایه که لایه‌های ماسه‌ای بین دو لایه رس قرار می‌گیرد، زاویه شکست ماسه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، که علت این پدیده را می‌توان چسبندگی رس در مرز با لایه‌ی ماسه‌ای دانست که مانع از لغزش لایه ماسه‌ای می‌شود. به گونه‌ای که در حالت اشباع با افزایش چسبندگی رس تا بیشترین مقدار خود، شکستی در لایه‌های خاک رخ نمی‌دهد. در حالت دو لایه ماسه بالا-رس پایین، لایه ماسه‌ای نقش سربار را برای لایه رسی داشته که باعث افزایش نیروی اکتیو و در نتیجه توسعه گوه شکست می‌شود. در حالت دو لایه رس بالا ماسه پایین، تقریباً عمق گوه شکست با عمق گوه در حالت دو لایه ماسه بالای غیراشباع یکسان است، اما به علت عدم چسبندگی ماسه در لایه زیرین و عدم مقاومت در برابر حرکت دیوار، توسعه گوه شکست نسبت به حالت ماسه بالا گوه شکست کمتر می‌باشد. نکته قابل توجه این که در کلیه حالات شکست رخ داده برای خاکریز پشت دیوار به هیچ وجه زاویه شکست از خط ۴۵ درجه پای دیوار به سمت خاکریز تجاوز نمی‌نماید و در نظر گرفتن این شرایط برای گوه شکست که در حال حاضر در طراحی دیوارهای حائل به کار گرفته می‌شود، بسیار محافظه‌کارانه می‌باشد. از این رو توجه به تحلیل نتایج حاصل از تحقیق حاضر و سایر تحقیقات مشابه در این زمینه، هزینه‌ی اقتصادی طرح‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

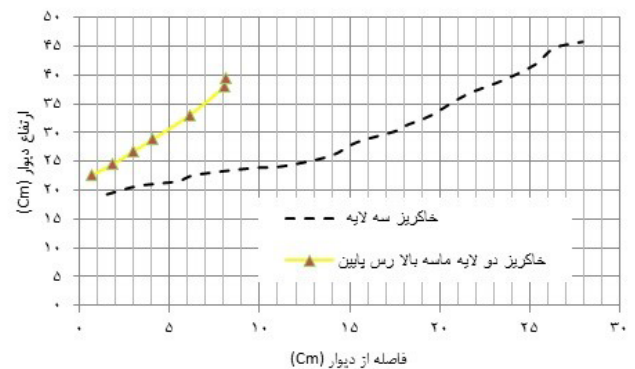
#### ۳-۴- مقایسه با سایر تحقیقات

به منظور اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی و به دلیل اهمیت فشار جانبی در طراحی دیوار حائل و استفاده از روش‌های کلاسیک برای طراحی، نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها با نتایج حاصل از روش کلاسیک رانکین و روش جدید ارائه شده توسط سیرنیوسا و همکاران (در سال ۲۰۱۲) که با ساخت یک مدل عددی به کمک روش DEM و تأثیر قوس‌زدگی، ضریب فشار جانبی را برای دیوار حایل ارائه نمود مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت [۷]. در این روش که عموماً برای خاک‌های غیرچسبنده کاربرد دارد، محدوده‌ی فشار جانبی در یک محدوده‌ی مشخص و از قبل تعریف شده به مدل وارد می‌گردد. برای مثال در اکثر خاک‌ها نسبت فشار جانبی در محیط خاک به فشار یا تنش نرمال بین  $0/3$  الی  $0/55$  در نظر گرفته می‌شود. در این روش توزیع تنش در حالت سکون و هر نوع حرکت دیوار قابل بررسی است. معمولاً ضریب نسبی اصطکاک بین خاک و دیوار برابر با  $0/35$  لحاظ می‌شود. در تحلیل‌های سیرنیوسا و همکاران (۲۰۱۲) مشخص گردید که هرگونه حرکت انتقالی صلب باعث فعال شدن نیروی اکتیو به صورت غیرخطی می‌گردد.

شکست را در لایه‌بندی‌های مختلف نمایش می‌دهد.



الف



ب

شکل ۱۰: مقایسه گوه شکست در لایه‌بندی‌های مختلف خاک، حالت (الف) حالت غیر اشباع (ب) حالت اشباع

Fig. 10. Comparison of wedge failure in different soil layers (a) unsaturated state (b) saturation state

جدول ۳: فاصله‌ی گوه شکست خاکریز از پای دیوار در محل برخورد با دیوار بر حسب سانتیمتر

Table 3. The distance between embankment failure wedge and heel of the wall in cm

تعداد لایه	اشباع	غیر اشباع	تعداد لایه	اشباع	غیر اشباع
چهار لایه	-	۲۰	سه لایه	۱۹	۲۶
دو لایه (ماسه-رس)	۲۲	۲۱	دو لایه (رس-ماسه)	-	۲۱

با توجه به شکل ۱۰-الف در حالت غیراشباع در لایه‌بندی‌هایی که مقدار رس از نظر حجمی با هم برابر است، عمق گوه شکست تقریباً با هم برابر است. به گونه‌ای که در حالت سه لایه با میزان رس ۳۳ درصد حجمی، عمق گوه شکست نسبت به حالت دو لایه و چهار لایه که میزان رس به اندازه ۵۰ درصد از حجم خاکریز پشت دیوار می‌باشد، کمتر است. همچنین

#### ۴- نتیجه گیری

تحقیق حاضر به بررسی مشخصات گوه شکست خاکریز ناشی از حرکت محرک دیوار در حالت دوران حول پاشنه پرداخته است. از مجموع آنچه انجام گرفت، بطور خلاصه نتیجه شد که:

بیشترین اختلاف عمق گوه شکست در حالتی که گوه شکست بین حالت اشباع و غیر اشباع تشکیل شده است، مربوط به خاکریز سه لایه‌ای و کمترین اختلاف این مقدار متوجه خاکریزهای دو لایه‌ای می‌باشد. به عبارت دیگر اثر اشباع و غیر اشباع بودن خاکریز بر توسعه عمقی گوه شکست خاکریزهای ناهمگن با بیش از دو لایه خود را نشان می‌دهد.

اشباع کردن خاک همگن باعث می‌شود که فشار محرک افزایش یافته و نیروی محرک و در نتیجه لنگر محرک بیشتر از حالت غیر اشباع می‌شود. بنابراین ضریب اطمینان طراحی کاهش می‌یابد، ولی در خاک‌های ناهمگن الزاماً چنین اتفاقی رخ نمی‌دهد به گونه‌ای که در خاک دو لایه‌ای (ماسه-رس) کوچکتر بودن گوه شکست در حالت اشباع نسبت به حالت غیر اشباع، حاکی از کوچکتر بودن نیروی محرک و در نتیجه لنگر محرک در حالت اشباع نسبت به حالت غیر اشباع است.

بزرگی نیروی جانبی تحت تاثیر هم‌زمان دو عامل زاویه و ارتفاع گوه شکست می‌باشد، به طوری که در خصوص خاک دو لایه‌ای ماسه بالا با وجود ارتفاع گوه‌های تقریباً یکسان، با متوسط کاهش ۱۸ درصدی زاویه شکست گوه در لایه‌های اشباع نسبت به خاک غیر اشباع، نیروی جانبی نیز به میزان ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. این در حالی است که، افزایش ۲۷ درصدی نیروی جانبی در خاک سه لایه‌ای اشباع نسبت به خاک غیر اشباع، ناشی از متوسط کاهش ۳۷ درصدی زاویه شکست گوه با وجود افزایش ۳۰ درصدی ارتفاع گوه شکست در حالت اشباع نسبت به حالت غیر اشباع می‌باشد. از این رو مطابق ادعای مطالعات گذشته، قضاوت راجع به وضعیت فشار جانبی وارده بر دیوار بر اساس ابعاد هندسی گوه شکست امکان پذیر می‌باشد.

نتایج آزمایشگاهی بدست آمده نشان می‌دهد که بهره‌برداری از روابط تئوری موجود، منجر به طرح محافظه کارانه دیوار حائل و در نتیجه افزایش هزینه اجرا می‌شود. عدم ایجاد گوه شکست از پای دیوار بر خلاف نتایج حاصل از تئوری‌های کلاسیک و همچنین متوسط کاهش ۳۲/۷۵ و ۲۹/۲۵ درصدی نیروی جانبی وارده بر دیوار حاصل از داده‌های آزمایشگاهی نسبت به مقادیر روش‌های رانکین و سیرنیوسا، شاهدی بر این مدعاست.

#### سپاسگزاری

بدین وسیله، از دانشگاه شهیدچمران اهواز، به پاس تهیه امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی و حمایت و تأمین منابع مالی جهت انجام این مطالعه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

این میزان حداقل بارکل روی دیوار خواهد بود. در جدول ۴ مقایسه‌ی نتایج تحقیق حاضر با تحقیق سیرنیوسا و همکاران (۲۰۱۲) و همچنین تئوری رانکین ارائه شده است. در این جدول ستون دوم و سوم نتایج تحقیق حاضر بوده که با توجه با توجه به مرز گوه شکست و ترسیم نمودار برداری نیروها به دنبال یکدیگر و استخراج نیروی جانبی اکتیو محاسبه شده است. جدول ۴ نتایج فشار جانبی بدست آمده از گوه شکست در آزمایش‌ها و روش‌های ذکر شده برای خاکریزهای مورد نظر را ارائه می‌دهد. جدول ۴ میزان فشار جانبی در تمام لایه‌بندی‌ها بر اساس مطالعه‌ی آزمایشگاهی تحقیق حاضر و در هر دو حالت اشباع و غیر اشباع از فشار جانبی محاسبه شده توسط سیرنیوسا و همکاران (۲۰۱۲) و تئوری رانکین کمتر است. به عبارت دیگر تئوری‌های کلاسیک محافظه کارانه‌تر عمل می‌کنند. همچنین در حالت اشباع در لایه‌بندی‌های دولایه (ماسه-رس) و سه لایه به ترتیب ۹۳ درصد و ۱۴ درصد اختلاف بین نتایج حاصل از آزمایش با نتایج تحقیقات سیرنیوسا و همکاران (۲۰۱۲) وجود دارد. عامل ایجاد این اختلاف را باید به کارگیری فرضیات ساده‌کننده در این روش دانست. از جمله این فرضیات می‌توان به ثابت در نظرگرفتن ضریب اصطکاک بین دیوار و خاک و همچنین عدم در نظرگرفتن چسبندگی خاک اشاره نمود که عمدتاً پیچیدگی شرایط خاک‌های طبیعی بیش از این موارد می‌باشد و فرضیات گرفته شده همواره صادق نیست. همچنین در حالت غیر اشباع در لایه‌بندی‌هایی که در جدول ۴ آورده شده است، به ترتیب ۱۶ درصد، ۳۶ درصد، ۴۵ درصد و ۳۰ درصد اختلاف بین نتایج حاصل از آزمایش با نتایج تحقیقات سیرنیوسا و همکاران (۲۰۱۲) وجود دارد. در مقایسه با تئوری رانکین در حالت دیوار اشباع در لایه‌بندی‌های دولایه (ماسه-رس) و سه لایه به ترتیب ۷۴ و ۱۰ درصد اختلاف بین نتایج حاصل از آزمایش و تئوری رانکین وجود دارد. همچنین در حالت غیر اشباع مطابق با جدول ۴ به ترتیب لایه‌بندی ۲۷، ۴۱، ۵۴ و ۵۶ درصد اختلاف بین نتایج این تحقیق و تئوری رانکین وجود دارد.

جدول ۴: مقایسه فشار جانبی روش‌های مختلف

Table 4. Comparison of lateral pressure in different methods

روش رانکین (N/m)	روش سیرنیوسا (N/m)	نیروی جانبی آزمایش (N/m)	نوع لایه‌بندی		
اشباع اشباع	غیر اشباع	غیر اشباع	دو لایه (رس-ماسه)		
۰/۶۱	۰/۵۱	۰/۵۶	۰/۴۸	۰	۰/۲۹
۰/۵۸	۰/۵	۰/۵۶	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۲۹
۰/۶۸	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۹۳	۰/۴۴	۰/۵۶
۰/۷۲	۰/۴۸	۰/۶	۰	۰/۴۶	۰

- Geotechnical Journal, 46(8) (2009) 969-975.
- [9] Nadukuru, S. S., & Michalowski, R. L. Arching in distribution of active load on retaining walls. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 138(5) (2012) 575-584.
- [10] Niedostatkiewicz, M., Lesniewska, D., & Tejchman, J. Experimental analysis of shear zone patterns in cohesionless for earth pressure problems using particle image velocimetry. Strain, 47(s2) (2011) 218-231.
- [11] Peng, S.-q., Li, X.-b., Ling, F., & Liu, A.-h. A general method to calculate passive earth pressure on rigid retaining wall for all displacement modes. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22(6) (2012) 1526-1532.
- [12] Rao, P., Chen, Q., Zhou, Y., Nimbalkar, S., & Chiaro, G. Determination of active earth pressure on rigid retaining wall considering arching effect in cohesive backfill soil. International Journal of Geomechanics, 16(3) (2015) 04015082.
- [13] Sobhani, R. F.-A. E. Experimental study of the effect of saturation degree variations on shear strength parameters of sand-kaolin unsaturated compositions. 4th International Conference on Sustainable development & Urban Construction (2014). (in Persian)
- [14] Spangler, M. G., & Handy, R. L. Soil engineering. Retrieved from (1973).
- [15] Winterkorn, H. f. a. F., H.Y. (1975). Foundation Engineering Handbook.
- [1] Ahadiyan, H. M. J. Effect of Unsaturated Soil texture and Compaction in Experimental Analysis and River Retaining Wall Failure Wedge Elastoplasticity. Irrigation Sciences and Engineering, 40 (2016) 197-212. (in Persian)
- [2] Aouria, S. S. A. The study of lateral earth pressures acting on retaining walls due to the displacement modes. 1th National Congress On Civil Engineerin, (2014). (in Persian)
- [3] Benmebarek, N., Labdi, H., & Benmebarek, S. A numerical study of the active earth pressure on a rigid retaining wall for various modes of movements. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 53(1) (2016) 39-45.
- [4] Brown v. Board of Education, No. No. 1, 347 483 (Supreme Court 1954).
- [5] Chen, L. Active earth pressure of retaining wall considering wall movement. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 18(8) (2014) 910-926.
- [6] Fang, Y.-S., Chen, T.-J., & Wu, B.-F. Passive earth pressures with various wall movements. Journal of Geotechnical Engineering, 120(8) (1994) 1307-1323.
- [7] Liu, F. Lateral earth pressures acting on circular retaining walls. International Journal of Geomechanics, 14(3) (2013) 04014002.
- [8] Mei, G., Chen, Q., & Song, L. Model for predicting displacement-dependent lateral earth pressure. Canadian

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Bakhtiar, J. Ahadiyan, Estimation of Lateral Forces on Retaining Walls Adjacent to Layered Embankments in Saturated and non-Saturated Conditions, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(1) (2018)19-30.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11859.5090



