Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

Study of the Active Earth Pressure of Unsaturated Sandy Soil Behind a Rigid Retaining Wall

Majid Gourgani [a], Hamid Reza Razeghi [b], Jaber Mamaghanian [c,*]

[a] *Ph.D. Candidate, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran*
[b] *Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran*
[c] *Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:

Unsaturated soil;
Earth Pressure;
Retaining wall;
Matric Suction;

ABSTRACT

In this research, the lateral earth pressure of standard Firuzkuh sand on a rigid retaining wall by using fourteen physical models built in the Geotechnical Research Center of Iran University of Science and Technology, in the active state of the soil for dry and unsaturated sand conditions, has been investigated. The PIV (Particle Image Velocimetry) method was used to measure the deformations of the soil and the results of the deformations were verified with the data was obtained by pressure gauges installed on the retaining wall. The results show the impressive effect of internal sand suction on the lateral pressure of the embankment. It has been shown that the rupture wedge behind the retaining wall has become smaller with the increase of soil suction and the force on the wall has decreased significantly. The displacement of the wall required to reach the active state has been investigated and shows that with increasing soil suction, the displacement required to reach the active state increases.

DOI: https://doi.org/

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

UNCORRECTED PROOF

*** Corresponding author.**
E-mail address: mamaghani@iust.ac.ir

How to cite this article:

مقاله پژوهشی

مطالعه فشار جانبی فعال ماسه غیراشباع پشت دیوار حائل صلب

مجید گورگانی[۱]، حمیدرضا رازقی[۲]، جابر ممقانیان[۳،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله:
بازنگری مقاله:
پذیرش مقاله:

واژگان کلیدی:
خاک غیراشباع،
فشار جانبی فعال،
ماسه فیروزکوه،
مکش ماتریسی،
دیوار حائل،

چکیده

در این تحقیق با استفاده از چهارده مدل فیزیکی ساخته شده در مرکز تحقیقات ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران، فشار جانبی ماسه استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه بر دیوار حائل صلب، در حالت فعال خاک برای شرایط خشک و غیراشباع ماسه مورد بررسی قرار گرفته است. برای اندازه گیری تغییرشکل‌های خاک از روش PIV (Particle Image Velocimetry) استفاده شده و نتایج حاصل از تغییر شکل‌ها با نتایج حاصل از فشارسنج‌های نصب شده روی دیوار حائل صحت سنجی شده است. داده‌های برداشت شده بیان‌گر تاثیر چشم‌گیر مکش داخلی ماسه بر فشارجانبی خاکریز می‌باشد. نشان داده شده است که گوه گسیختگی پشت دیوار حائل با افزایش مکش خاک کوچکتر شده و نیروی وارد بر دیوار کاهش محسوسی داشته است. تغییر مکان مورد نیاز دیوار برای رسیدن به حالت فعال مورد بررسی قرار گرفته و افزایش تغییر مکان مورد نیاز برای رسیدن به حالت فعال خاکریز با افزایش مکش خاک منتج شده است. در انتها رابطه‌ای برای تخمین نیروی وارد بر دیوار حائل در تماس با خاک ماسه‌ای غیراشباع در شرایط فعال ارائه شده است.

DOI: https://doi.org/

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

UNCORRECTED PROOF

۱-مقدمه[۱]

دیوارهای حائل از جمله پرکاربردترین سازه‌های مهندسی در فعالیت‌های عمرانی محسوب می‌شود. طراحی ایمن و اقتصادی این سازه‌ها هنر مهندس طراح است که جز با درک صحیح رفتار خاکریز و تحلیل درست موضوع فشارجانبی خاک، امکان‌پذیر نیست. تحلیل‌های سنتی برای فشارهای فعال زمین، خاک را در حالت خشک یا اشباع شده در نظر می گیرند. این در حالی است که خاک معمولاً در طبیعت غیراشباع است [۱-۱۲]. رطوبت موجود در خاک که باعث غیراشباع شدن خاک می‌شود تاثیر بسزایی در مقاومت برشی خاک و در نتیجه فشار جانبی خاک دارد [۲, ۱۱, ۱۲].

علم مکانیک خاک‌های غیر اشباع از علوم مدرن محسوب می‌شود، در سال ۱۹۳۷ در زمینه کاربردهای کشاورزی شروع شد و چند دهه پیش شروع به توسعه کرد [۱۳]. علی رغم پژوهش‌های متعدد صورت گرفته در زمینه خاک غیراشباع و بررسی اثر مکش ماتریسی بر رفتار خاک، بعد از گذشت چندین دهه هنوز اثر مکش خاک نادیده گرفته می‌شود[۱۴]. پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه مقاومت برشی خاک‌های غیراشباع، نشان می‌دهد که با افزایش مکش ماتریسی، مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد و این افزایش در برخی از خاک‌های ریزدانه که مقدار مکش ماتریسی بالایی را تجربه می‌کنند، بسیار قابل توجه است [۱۵]. فاکتورهای مختلفی از جمله نوع خاک، درجه اشباع

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mamaghani@iust.ac.ir
۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

خاک، تراکم، بافت خاک و چرخه خشک یا تر شدگی بر مکش ماتریسی و در نتیجه مقاومت برشی خاک اثرگذار است [۱۱].

در نظر گرفتن اثر مکش ماتریسی با حضور رطوبت بین دانه‌های خاک منجر به طراحی بهینه و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی نسبت به تحلیل‌های سنتی می‌شود [۳]. در نظر گرفتن شرایط غیراشباع برای خاکریز، مستلزم داشتن دانش دقیق و تجربه کافی برای استفاده ازین موضوع است. در برخی موارد که خاکریز طبیعی با مکش ماتریسی پایدار بوده، این مکش ماتریسی با اشباع شدن خاک از طریق بارندگی از بین رفته و منجر به ناپایداری خاکریز گردیده است.

در تحلیل‌های سنتی معمولا از فرضیات کولمب یا رانکین برای محاسبه فشار جانبی خاک استفاده می‌شود. در این تحلیل‌ها فشار جانبی خاک بدون وابستگی به نوع حرکت دیوار، بصورت مثلثی و خطی فرض شده و در تمام طول دیوار بصورت یکنواخت فرض می‌شود. این درحالی است که، فشار جانبی خاک کاملا وابسته به نوع حرکت دیوار بوده و به صورت غیرخطی در ارتفاع و برخی موارد در طول دیوار تغییر می‌کند [۱۶, ۱۷].

منظور از نوع حرکت دیوار، چرخش دیوار حول نقطه پایین یا بالا و یا حرکت یکپارچه انتقالی دیوار است. نوع حرکت دیوار، در برخی از پژوهش‌های گذشته، برای خاکریز خشک یا اشباع مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۱۸]. نوع حرکت دیوار علاوه بر تغییرات غیرخطی فشار جانبی خاک در ارتفاع دیوار، بر مقدار جابجایی دیوار جهت رسیدن به فشار فعال تاثیر گذار بوده و بایستی مورد توجه قرار گیرد.

مولفه‌های درونی خاک که در تحلیل‌های سنتی در نظرگرفته می‌شوند شامل: زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی و نوع خاک است. علاوه بر موارد ذکر شده مولفه مکش ماتریسی خاک در شرایطی که خاک در حالت غیراشباع است، با توجه به اینکه خاک در طبیعت اغلب بصورت غیراشباع وجود دارد، به عنوان یک مولفه بسیار موثر درونی خاک در تحلیل‌های سنتی نادیده گرفته می‌شود.

روابط تئوری زیادی جهت تخمین فشار فعال خاک در حالت غیراشباع ارائه شده است [۲, ۴, ۱۴, ۱۹-۲۲]، اما پژوهش تجربی مبتنی بر مدل فیزیکی در این حوزه کمتر ارائه شده است. پژوهش حاضر با انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی در مقیاس 1g، نتایج تجربی ارزشمندی در زمینه فشار جانبی فعال ماسه غیراشباع ارائه کرده است.

تمامی مطالب مزبور در این پژوهش به معنی رد تحلیل‌های سنتی و منسوخ شدن آن‌ها نیست. مقصود پژوهش حاضر بررسی اثر مواردی است که در فرضیات سنتی، جهت ساده‌سازی حل مسئله فشار جانبی خاک در نظرگرفته نشده است. با تحلیل و انجام آزمایش‌های مدل فیزیکی جهت روشن شدن اثر وجود رطوبت در بافت خاک و نوع حرکت دیوار بر تغییرات فشار جانبی خاک در ارتفاع دیوار، نتایج این پژوهش، قدرت قضاوت مهندسی مهندسین طراح، مجری و ناظر بر پروژه‌های دیوار حائل را جهت ارائه و اجرای طرحی با ایمنی مقبول و اقتصادی، ارتقاء می‌بخشد.

۲- مدل‌سازی فیزیکی

در پژوهش حاضر، برای مدلسازی در مقیاس 1g از یک جعبه فلزی با ابعاد ۸۰ در ۹۰ در ۱۲۰ سانتیمتر به ترتیب برای عرض، ارتفاع و طول جعبه استفاده شده است. جنس جعبه مورد استفاده از فلز صلب بوده و در یکطرف آن به منظور مشاهده رفتار ماسه، از پلاستیک فشرده شفاف استفاده شده است. در قسمت جلوی جعبه از دو جک و یک درب قابل چرخش و انتقال به منظور اعمال حرکت دیوار حائل استفاده شده است.

به منظور اندازه‌گیری تغییرمکان بالا و پایین دیوار از دو تغییرمکان‌سنج دیجیتال استفاده شده است. فشار ناشی از ماسه بر جداره دیوار در ۵ نقطه با استفاده از فشارسنج‌هایی که در ارتفاع دیوار نصب شده اندازه‌گیری شده است.

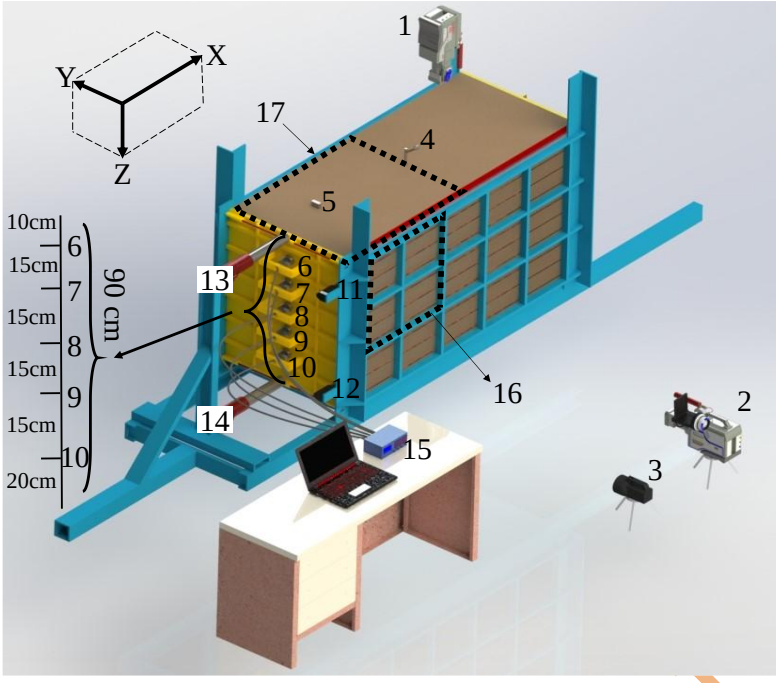
جهت اندازه‌گیری مکش موجود در خاک از دو دستگاه تنسیومتر با دقت 0.1kPa استفاده شده است. دوربین‌های ثبت تغییر شکل‌ها در بالا و کنار جعبه، عمود بر سطح مورد نظر مستقر شدند. تمامی تجهیزات ذکر شده در شکل ۱ نمایش داده شده است.

خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه بوده است. مشخصات فیزیکی، منحنی دانه‌بندی و نمودار SWCC ماسه مورد استفاده به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۲-الف و ۲-ب نشان داده شده است.

مدل‌های ساخته شده در این پژوهش با درصد رطوبت و تراکم نسبی‌های مختلف در جدول ۲ توضیح و نام‌گذاری شده است. در این نام‌گذاری سه قسمتی، در قسمت اول حروف لاتین RB، RT و T به ترتیب نماینده چرخش حول پاشنه، چرخش حول نقطه بالا و حرکت انتقالی می‌باشند.

UNCORRECTED PROOF

اعداد ۳۰ و ۸۰ در قسمت دوم نماینده درصد تراکم و قسمت سوم آن معرف درصد رطوبت نمونه‌ها است.



۱- دوربین نمای بالا
۲- دوربین نمای جانبی
۳- لامپ نورپردازی
۴و۵- تنسیومترها
۶- سنسور فشار خاک SP1
۷- سنسور فشار خاک SP2
۸- سنسور فشار خاک SP3
۹- سنسور فشار خاک SP4
۱۰- سنسور فشار خاک SP5
۱۱و۱۲- تغییرمکان سنج‌ها
۱۳و۱۴- جک‌ها
۱۵- دیتا لاگر
۱۶و۱۷- نواحی اندازه‌گیری با روش PIV

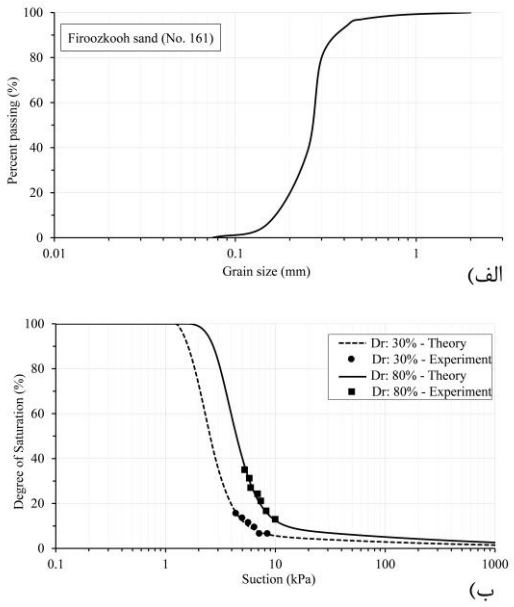
شکل 1 - شماتیک مدل فیزیکی و ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق

جدول 1 - مشخصات ماسه مورد استفاده

Passing #200	D10(mm)	D30(mm)	D50(mm)	D60(mm)	Cu	Cc	e_{max}	e_{min}	G_s
0.01	0.16	0.21	0.27	0.28	1.87	0.88	0.943	0.548	2.65

آماده‌سازی نمونه‌ها داخل جعبه و دستیابی به تراکم نسبی و رطوبت یکنواخت در کل بافت خاک، یکی از سخت‌ترین قسمت‌های کار بود که با دقت بالا و بهره‌گیری از تجربه پژوهش Vo et al. (2016) [۱۱] انجام شد.

مدل‌های ساخته شده در این پژوهش در دو حالت خشک و مرطوب به منظور دستیابی به تراکم یکنواخت مدنظر با دو روش متفاوت ساخته شده‌اند. برای مدلسازی نمونه‌های خشک از روش بارش خشک ماسه استفاده شد. دو عامل موثر در تراکم خاک در این حالت ارتفاع ریزش ماسه و حجم خروجی ماسه بود، که قبل از ساخت مدل با استفاده از یک صفحه سوراخ شده و ظرفی با حجم مشخص ارتفاع ریزش ماسه برای رسیدن به هر تراکم نسبی صحت سنجی شد. به منظور حصول اطمینان کامل از رسیدن به تراکم نسبی مورد نظر، ارتفاع جعبه به ۹ لایه ۱۰ سانتیمتری تقسیم شد، تا با اندازه گیری وزن ماسه در هر لایه تراکم نسبی دقیق آن در



شکل 2 - الف) منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ب) منحنی SWCC برای درصد تراکم ۳۰ و ۸۰ درصد

UNCORRECTED

انتهای ساخت نمونه اندازه‌گیری شود. تراکم نسبی نهایی بدست آمده در هر مدل با مقدار هدف اندکی تفاوت داشت، که در جدول ۲ گزارش شده است.

برای نمونه‌های مرطوب از روش کوبش مرطوب استفاده شد. این روش بسیار حساس به مقدار رطوبت خاک می‌باشد. به همین منظور مقدار ۱۰ کیلوگرم از ماسه با مقدار مشخص آب، مخلوط و در کیسه‌های پلاستیکی به مدت یک هفته نگهداری می‌شدند. این عمل به منظور توزیع یکنواخت

جدول ۲- مشخصات آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق و نام گذاری آن‌ها

شماره آزمایش	کد آزمایش	تراکم نسبی هدف D_r: %	رطوبت نسبی هدف w: %	تراکم نسبی واقعی D_r: %	رطوبت نسبی واقعی w: %	نسبت تخلخل اولیه e_i	مکش موجود kPa
1	RB-30-0	30	0	29.7	0	0.826	-
2	RB-30-2	30	2	31.2	2.05	0.820	7
3	RB-30-4	30	4	30.7	3.9	0.822	5
4	RB-80-0	80	0	84.2	0	0.610	-
5	RB-80-2	80	2	81.8	1.98	0.620	9
6	RB-80-4	80	4	83.4	4.01	0.614	6
7	RT-30-0	30	0	30.2	0	0.824	-
8	RT-30-2	30	2	29.1	2.02	0.828	7
9	RT-30-4	30	4	29.8	3.95	0.825	5
10	RT-80-0	80	0	80.5	0	0.625	-
11	T-30-0	30	0	30.7	0	0.822	-
12	T-30-2	30	2	31.1	1.97	0.820	7
13	T-30-4	30	4	29.3	4.01	0.827	5
14	T-80-0	80	0	81.2	0	0.622	-

رطوبت در بافت ماسه انجام شده است. وزن کوبه، ارتفاع کوبش، ضخامت لایه‌ها، تعداد کوبش و اثر لایه‌های بالایی بر لایه‌های پایینی مهمترین عواملی بود که در ساخت این نمونه‌ها به منظور دستیابی به تراکم یکنواخت مورد توجه ویژه قرار گرفت. بین لایه‌های خاک در نزدیکی ضلع شفاف جعبه از ماسه رنگی به منظور اندازه‌گیری دقیق ارتفاع نهاییی هر لایه استفاده شد. نتیجه این روش دستیابی به نمونه‌هایی با تراکم نسبی یکنواخت و بسیار نزدیک به هدف بود.

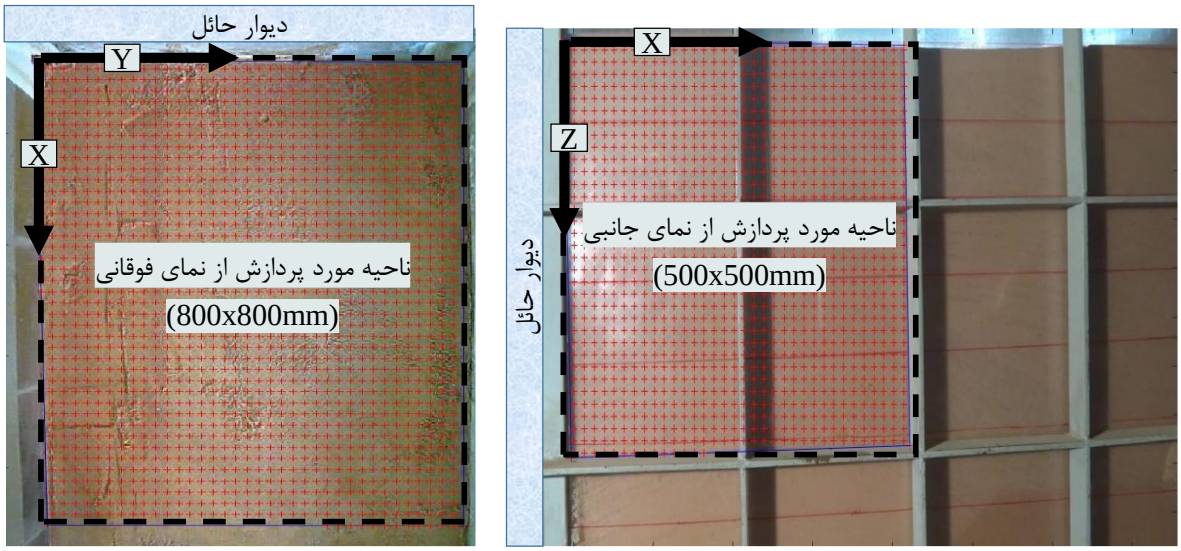
پس از ساخت نمونه‌ها، به منظور متعادل سازی رطوبت در بافت خاک، یک هفته مدل ساخته شده زیر نایلون محافظت شده است. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، تمامی تجهیزات شامل: سنسورهای اندازه‌گیری فشار، تغییرمکان سنج‌ها، تنسیومترها و دوربین‌ها به منظور ثبت اطلاعات فعال شدند. در ادامه بسته به نوع و مقدار مدنظر حرکت دیوار، جک‌های بالا، پایین ویا باهم (شکل ۱- موارد ۱۳ و ۱۴) بصورت کنترل شده اجازه تغییرمکان به دیوار دادند. در واقع نیروی محرک ماسه باعث حرکت دیوار شده ولی کنترل مقدار آن با جک‌ها بوده است.

تمامی حرکات ذرات ماسه‌ها از نمای کنار و بالا توسط دوربین‌ها ضبط و با استفاده از تکنیک PIV [۲۳] مورد پردازش قرار گرفت. این تکنیک در پژوهش‌های متعددی به منظور مطالعه حرکت ذرات خاک مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱, ۱۷, ۲۴-۲۶]. تصاویر نواحی تحت پردازش با روش PIV در آزمایش‌های این تحقیق از نمای بالا و کنار در شکل ۳ نمایش داده شده است.

۳- صحت سنجی

عملکرد صحیح تغییرمکان‌سنج‌ها، فشارسنج‌ها، تنسیومترها و پردازش تصویر ذرات خاک قبل از انجام آزمایش‌ها مورد صحت سنجی واقع شد. تغییرمکان سنج‌ها با استفاده از کولیس با دقت 0.02mm، تنسیومترها با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مکش واقع در مرکز تحقیقات دانشگاه علم و

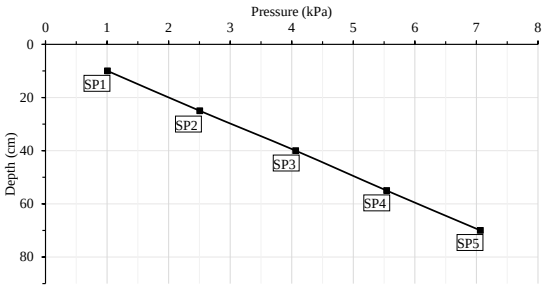
UNCORRECTED PROOF



(a) **(b)**

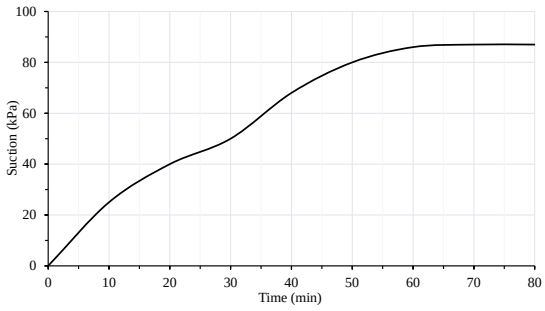
شکل 3 - نواحی مورد پردازش در مدل فیزیکی تحقیق حاضر به روش PIV از نمای فوقانی و جانبی

صنعت ایران با دقت 0.1kPa و پردازش تصویر با استفاده از تصاویر استاندرد صحت سنجی شدند. به منظور صحت سنجی عملکرد فشارسنج‌ها، داخل جعبه یک کیسه پلاستیکی پهن و پر از آب شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری فشار جانبی آب در شکل۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ - صحت سنجی فشارسنج‌ها با فشار جانبی آب

شکل۵ سرعت پاسخ تنسیومترها به تغییرات مکش را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مکش‌های موجود در ماسه مورد آزمایش این پژوهش کمتر از 10kPa است، زمان مورد نیاز برای اندازه‌گیری مکش در هر مرحله از حرکت دیوار ۵ دقیقه برآورد شده است. بنابراین برای هر مرحله اعمال حرکت به دیوار حائل، حداقل ۵ دقیقه زمان در نظرگرفته شده و پس از برداشت داده‌ها مرحله بعد تغییر مکان توسط جک‌ها به دیوار حائل اعمال شده است.



شکل ۵- زمان پاسخگویی تنسیومترها به مکش

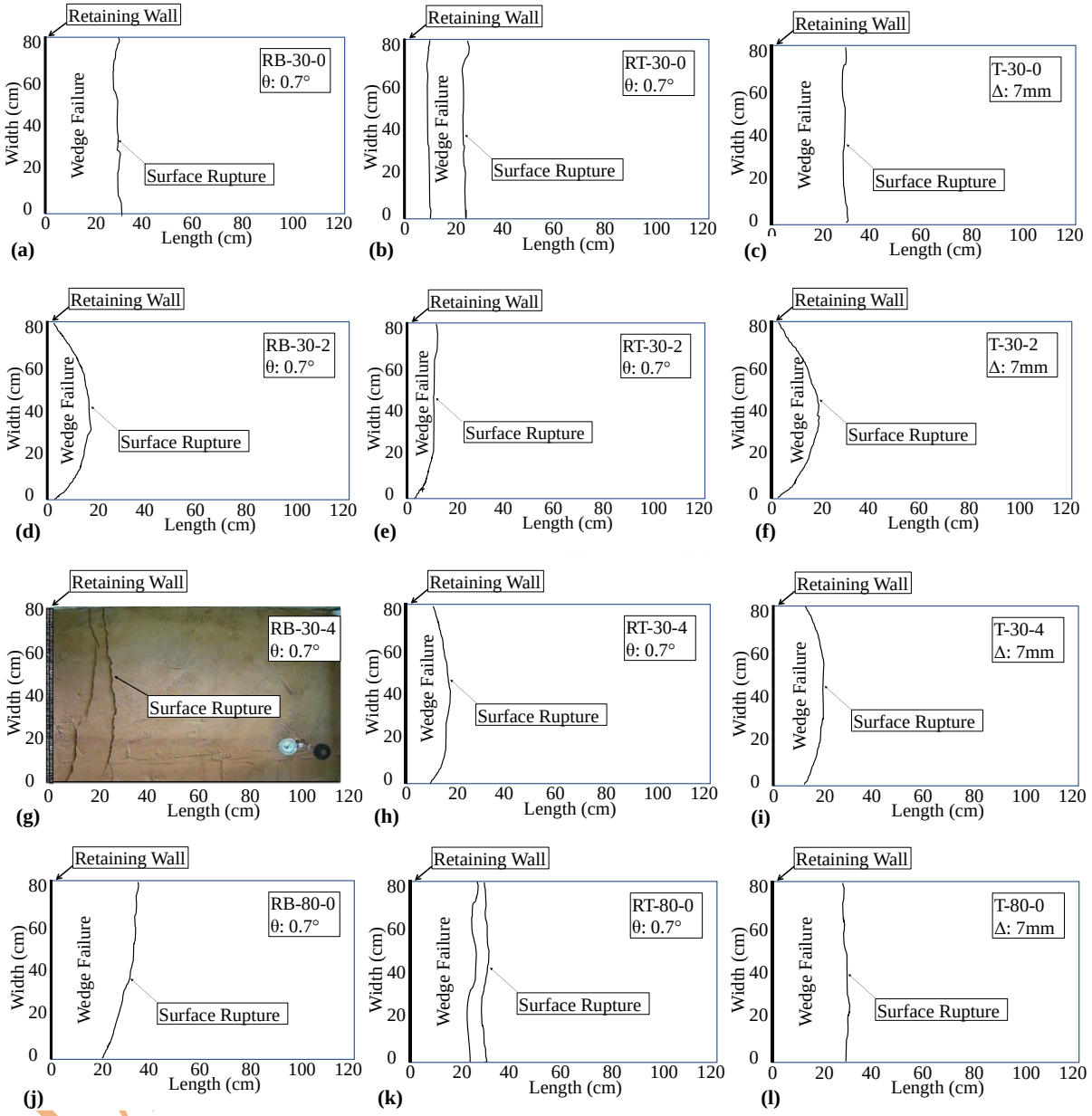
۴- نتایج آزمایش‌ها

برای تمامی آزمایش‌های انجام شده، کرنش‌های سطحی از نمای فوقانی و جانبی و همچنین سطوح گسیختگی خاک برای این دو نما برداشت شده است. آزمایش‌های ۵ و ۶ با کدهای RB-80-2 و RB-80-4 که نماینده‌های ماسه متراکم غیراشباع در تحقیق حاضر بودند، به دلیل عمق پایداری بحرانی بیش از ارتفاع مدل فیزیکی ساخته شده، هیچ گسیختگی و تغییر شکلی از نمای بالا و جانب نداشتند. همین امر باعث شد که در این تحقیق حالت‌های دیگر حرکت دیوار فقط با ماسه سست غیراشباع مدلسازی شود. این موضوع نشان دهنده اثر قابل توجه مکش بر فشار جانبی ماسه درحالت متراکم است.

در باقی آزمایش‌های صورت گرفته به وضوح مشخص است که وجود مکش، سطوح گسیختگی خاک را به طور کامل تحت تاثیر قرار داده است.

UNCORRECTED PR

سطوح گسیختگی شکل گرفته در سطح فوقانی خاک در انتهای آزمایش‌ها، که از پردازش PIV استخراج شده است، در شکل۶ نمایش داده شده است. در این تصاویر برای مدل‌هایی که دیوار حائل حرکت انتقالی داشته است از علامت Δ برای تغییر مکان دیوار نسبت به حالت اولیه استفاده شده و برای مدل‌هایی که دیوار چرخشی حول نقطه بالا یا پایین داشته است از علامت θ برای نشان دادن زاویه چرخش دیوار نسبت به حالت اولیه استفاده شده است.

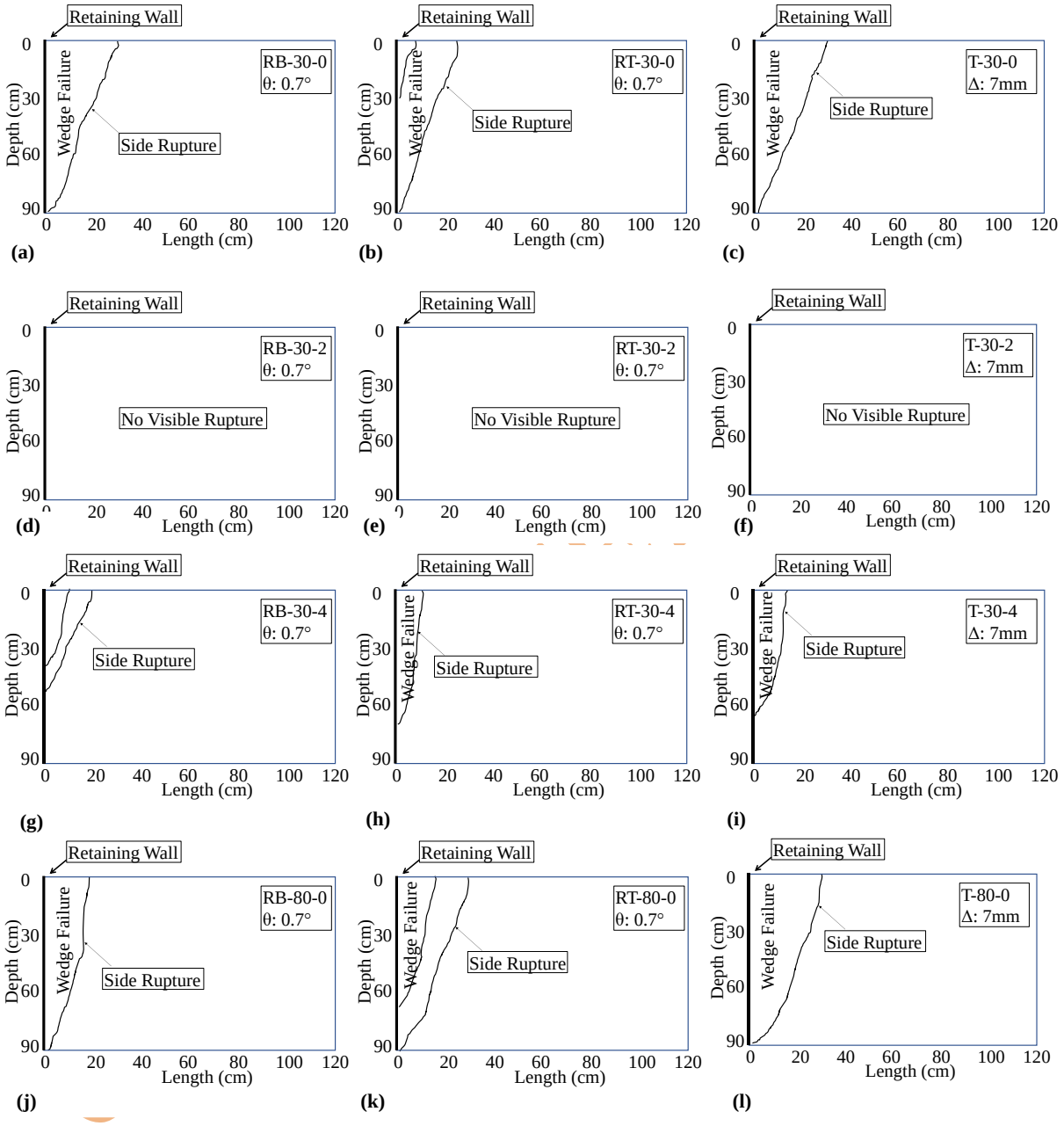


شکل ۶- سطوح گسیختگی خاک از نمای فوقانی

سطح ناحیه گسیختگی در حالت غیراشباع خصوصا با درصد رطوبت ۲درصد که بافت خاک مکش بیشتری داشته، به طور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر از حالت خشک است. این به معنی اعمال فشار جانبی کمتر خاک به دیوار حائل در حالت غیراشباع نسبت به خشک است. همچنین کاهش ناحیه تاثیرپذیر روی سطح خاک از حرکت دیوار، با افزایش مکش خاک به وضوح قابل ملاحظه است.

برای مشخص شدن وضعیت کامل گوه گسیختگی، سطوح گسیختگی شکل گرفته در انتهای آزمایش در نمای جانبی تمامی آزمایش‌ها که با استفاده از تکنیک PIV بدست آمده است، در شکل۷ نمایش داده شده است. با مشاهده سطوح گسیختگی خاک از نمای جانبی به همراه نمای فوقانی، قضاوت در مورد گوه گسیختگی شکل گرفته در پشت دیوار حائل و تاثیر مکش بر این گوه، دقیق‌تر می‌شود.

نتایج ارائه شده در شکل۷ کوچک شدن گوه گسیختگی در ارتفاع با افزایش مکش داخلی خاک را نشان می‌دهد. در این تصاویر گوه گسیختگی از نمای جانبی برای نمونه‌های با رطوبت نسبی ۲درصد قابل ملاحظه نیست. علت این موضوع قاشقی شدن گوه گسیختگی و نرسیدن سطح جانبی گوه به جداره مدل در این آزمایش‌ها است، که این موضوع در نمای فوقانی آن‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۷- سطوح گسیختگی خاک از نمای جانبی

نتایج پردازش تصویر، کوچک شدن گوه گسیختگی در پلان و نیمرخ با افزایش مکش خاک را گزارش می‌کند.

تحلیل جابه‌جایی خاک در مدل فیزیکی با استفاده از روش *Particle Image Velocimetry (PIV)* نشان می‌دهد که رفتار گوه گسیختگی در ماسه غیر اشباع به‌شدت تحت تأثیر ایجاد مکش درون بافت خاک قرار دارد. در حالت ماسه خشک، گوه گسیختگی به‌صورت پیوسته و تا پای دیوار حائل توسعه یافته و در هر دو نمای بالا و جانبی به‌وضوح قابل تشخیص است. با ایجاد مقدار اندکی مکش در خاک، که متناظر با افزایش جزئی رطوبت می‌باشد، ابعاد گوه

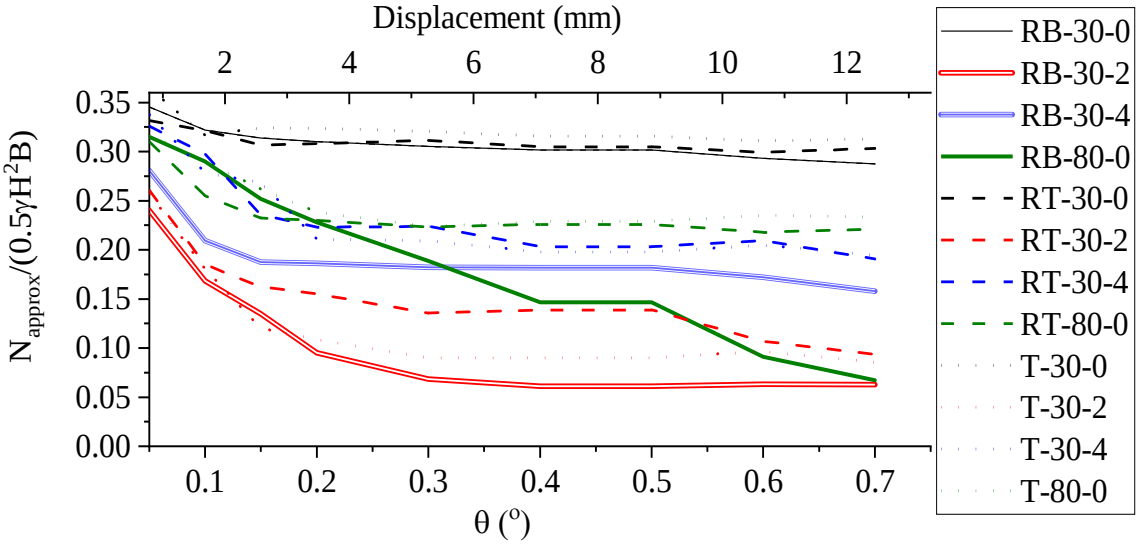
گسیختگی به‌طور محسوسی کاهش یافته و مرزهای ناحیه گسیخته محدودتر می‌شوند. با افزایش بیشتر مکش، این کاهش ابعاد تشدید شده و در نهایت، در مقادیر بالاتر مکش، گوه گسیختگی در نمای جانبی عملاً قابل مشاهده نیست، در حالی که در نمای بالا تنها تغییر مکان‌های محدود و موضعی ثبت می‌شود. این تفاوت رفتاری بیانگر کاهش چشمگیر حجم ناحیه فعال خاک و محدود شدن مکانیزم گسیختگی است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تأثیر مکش ناشی از رطوبت در خاک ماسه‌ای غیر اشباع، به‌مراتب مهمتر و تاثیرگذارتر از پارامترهایی نظیر درصد تراکم در کنترل شکل و ابعاد گوه گسیختگی بوده و این پدیده مستقیماً منجر به کاهش فشار جانبی فعال وارد بر دیوار حائل می‌شود.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل جابه‌جایی خاک و کاهش محسوس گوه گسیختگی در اثر افزایش مکش، که مستقیماً منجر به کاهش فشار جانبی فعال وارد بر دیوار حائل می‌شود، در ادامه به‌منظور بررسی دقیق‌تر این پدیده، تحلیل تنش‌ها و فشارهای اعمال‌شده بر دیوار حائل مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور، از داده‌های به‌دست‌آمده از سنسورهای فشار نصب‌شده بر روی دیوار حائل استفاده شده و تغییرات نیروی وارد بر دیوار در شرایط مختلف مکش خاک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این تحلیل امکان مقایسه‌ی مستقیم رفتار نیروهای جانبی در حالات مختلف رطوبت و مکش را فراهم کرده و زمینه‌ی مناسبی برای بررسی کمی اثر مکش بر کاهش فشار جانبی فعال ایجاد می‌کند. در ادامه، نتایج نیروهای اندازه‌گیری‌شده علاوه بر مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، مبنایی برای ارائه یک رابطه‌ی پیشنهادی به‌منظور پیش‌بینی فشار و نیروی جانبی وارد بر دیوار حائل در خاک‌های ماسه‌ای غیر اشباع قرار می‌گیرند. برای بررسی این موضوع، نیروی وارد بر دیوار که حاصل فشارجانبی خاک در عمق دیوار است، به صورت نرمال شده با تعریف رابطه۱ محاسبه و برای آزمایش‌های مختلف در شکل۸ نمایش داده شده است.

$$\frac{N_{approx}}{0.5\,\gamma H^2 B} \qquad (۱)$$

در این رابطه N_{approx} مقدار نیروی وارد بر دیوار حائل محاسبه شده با استفاده از فشارهای ثبت شده توسط فشارسنج‌هاست. γ وزن مخصوص ماسه، H ارتفاع دیوار حائل و B عرض دیوار می‌باشد.

کاهش نیروی وارد بر دیوار با افزایش مکش خاک که در تحلیل‌های پردازش تصویر مشاهده شده بود، در مقایسه صورت گرفته با استفاده از فشارسنج‌ها (شکل۸)، به وضوح



شکل8 - تغییرات نیروی وارد بر دیوار حائل با حرکت دیوار برای تمامی آزمایش‌ها

قابل مشاهده و تایید کننده نتایج حاصل از شکل‌های ۶و۷ است.

نتایج تحلیل نیروهای وارد بر دیوار حائل (شکل۸) نشان می‌دهد که اگرچه هر دو پارامتر مکش و تراکم نسبی خاک بر مقدار نیروی جانبی فعال تأثیرگذار هستند، اما شدت و

PROOF

نقش این تأثیرات یکسان نیست. بررسی داده‌های به‌دست‌آمده از سنسورهای فشار حاکی از آن است که افزایش تراکم نسبی منجر به تغییر قابل ملاحظه‌ای در نیروی وارد بر دیوار می‌شود، با این حال، اثر مکش ایجادشده در خاک ماسه‌ای غیر اشباع به‌مراتب غالب‌تر بوده و به‌عنوان پارامتر کنترل‌کننده اصلی رفتار نیروهای جانبی عمل می‌کند. در مقابل، مقایسه‌ی نتایج حاصل از حالات مختلف حرکت دیوار شامل چرخش و انتقال نشان می‌دهد که نوع مود حرکتی دیوار تأثیر معناداری بر مقدار نیروی جانبی نرمال‌شده ندارد. این موضوع بیانگر آن است که در خاک‌های ماسه‌ای غیر اشباع، شرایط رطوبتی و مکش درون خاک نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به نحوه‌ی حرکت دیوار در کنترل فشار جانبی فعال و نیروی وارد بر دیوار حائل ایفا می‌کند. یکی از نقاط قابل توجه در شکل ۸، مقدار جابجایی لازم تا رسیدن به حالت فعال خاک است. تغییرات فشار برای نمونه RB-30-0 بعد از چرخش ۰/۱ درجه تقریبا ثابت شده است. این مقدار برای نمونه‌های با رطوبت ۴و۲ درصد به ترتیب ۰/۱۵و۰/۳ درجه است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش مکش داخلی خاک، مقدار جابجایی لازم برای رسیدن خاک به حالت فعال بیشتر می‌شود.

با توجه به روند منظم تغییر بارهای تقریبی، رابطه ۲ برای تخمین نیروی وارد شده به دیوار حائل در هر مرحله از جابجایی دیوار، بدون توجه به نوع حرکت دیوار، پیشنهاد شد.

$$F_{a,ap} = 0.5\, B\, \gamma\, H^2 K_{ap} \qquad (۲)$$

که $F_{a,ap}$ نیروی تقریبی وارد بر دیوار حائل در شرایطی که دیوار از خاک دور می‌شود، می‌باشد. B و H به ترتیب عرض و ارتفاع دیوار، γ وزن مخصوص خاک و K_{ap} مطابق رابطه۳ تعریف می‌شود.

$$K_{ap} = -\,a.\ln\frac{\Delta H}{H} + b \qquad (۳)$$

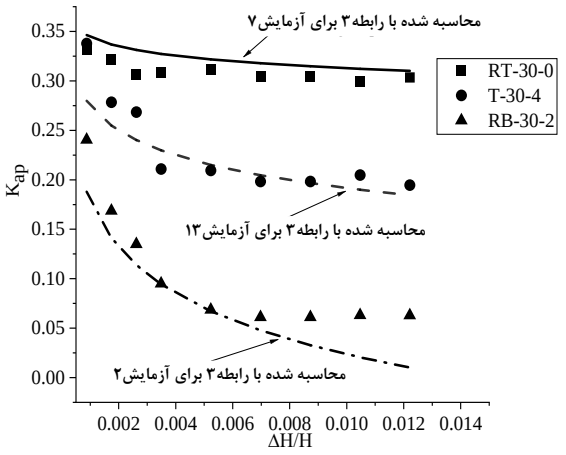
ΔH تغییرمکان دیوار نسبت به حالت سکون، H ارتفاع دیوار و پارامترهای a و b ضریب‌های برازشی هستند که به ترتیب در روابط ۴ و ۵ تعریف شده است.

$$a = \tan^{7.8}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) + \frac{\chi^{-4.7}}{1000} \qquad (۴)$$

$$b = \frac{3}{4}\tan^{2}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) - \frac{\chi^{-4.7}}{100} \qquad (۵)$$

که ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک و χ پارامتر تنش موثر است که بطور جامع و مفصل توسط خلیلی و خباز (۱۹۹۸)[۱۵] توضیح داده شده است.

مقادیر K_{ap} محاسبه شده با استفاده از رابطه۳ به همراه مقادیر بدست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق برای خاک خشک و غیراشباع در شکل۹ نشان داده شده است.



شکل۹ - نتایج تجربی سه آزمون انجام شده در تحقیق حاضر در مقایسه با مقادیر تخمینی رابطه۳

همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی برای پیش‌بینی نیروی جانبی فعال وارد بر دیوار حائل، تطابق بسیار مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از مدل فیزیکی نشان می‌دهد. این هم‌خوانی بیانگر آن است که مکش ماتریسی خاک و ویژگی‌های استخراج‌شده از منحنی مشخصه آب–خاک *(SWCC)* نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت این رابطه ایفا می‌کنند. از آنجا که رابطه‌ی پیشنهادی بر پایه‌ی پارامترهای حاکم بر رفتار هیدرو–مکانیکی خاک، به‌ویژه مکش ماتریسی و مشخصات *SWCC*، توسعه یافته است، توانایی مناسبی در بازنمایی تغییرات نیروی جانبی در شرایط مختلف رطوبتی از خود نشان می‌دهد. بر این اساس، استفاده از این رابطه به‌طور ویژه برای تحلیل و پیش‌بینی نیروی وارد بر دیوارهای حائل در خاک‌های ماسه‌ای غیر اشباع پیشنهاد می‌شود.

۵-نتیجه گیری

با بررسی تجربی صورت گرفته در خصوص فشار جانبی فعال ماسه در حالت خشک و مرطوب برای انواع مختلف حرکت دیوار، چرخش حول نقطه بالا، چرخش حول نقطه پایین و حرکت انتقالی دیوار، نتایج حاصله به شرح زیر می‌باشد:

۱- با افزایش مکش خاک، خط گسیختگی سطحی خاک در بالای دیوار حائل در حالت فعال به دیوار نزدیک‌تر شده است. به عبارت دیگر ناحیه تحت

UNCORRECTED PROOF

تاثیر تغییر مکان خاک ناشی از حرکت دیوار با افزایش مکش، کاهش پیدا کرده است.

۲- عمق گوه گسیختگی خاکریز پشت دیوار در حالت فعال، با افزایش مکش خاک کاهش پیدا کرده است. در واقع حجم گوه‌ای از خاک که پشت دیوار حائل حرکت می‌کند، با افزایش مکش بطور چشم‌گیری کاهش پیدا کرده و منجر به کاهش محسوس فشار جانبی خاک پشت دیوار حائل در حالت غیراشباع شده است.

۳- اندازه‌گیری فشار جانبی خاک با استفاده از سنسورهای فشارسنج، نتیجه بند ۲ را تایید کرده و نشان داده است که فشار جانبی خاک با افزایش مکش، کاهش پیدا کرده است.

۴- تغییر مکان مورد نیاز برای رسیدن خاک به حالت فعال، با افزایش مکش خاک افزایش پیدا کرده است. این مورد در طراحی دیوارهای حائل و استفاده از ضرایب فشارجانبی خاک در حالت فعال یا سکون قابل اهمیت است.

۵- مقایسه نتایج حاصل از رابطه‌ی پیشنهادی (رابطه۲) با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این رابطه توانایی مناسبی در پیش‌بینی نیروی جانبی فعال ماسه غیراشباع بر دیوار حائل داشته و استفاده از آن برای خاک‌های ماسه‌ای غیر اشباع معتبر و قابل توصیه است.

تقدیر و تشکر

تعارض منافع

نویسنده اعلام می کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

UNCORRECTED PROOF

مراجع

[۱] Z. Zhang, J. Zhu, and X. Yang, "Three-dimensional active earth pressures for unsaturated backfills with cracks considering steady seepage," *International Journal of Geomechanics*, vol. ۲۳, no. ۲, p. ۰٤۰۲۲۲۷۰, .۲۰۲۳

[۲] F. Vahedifard, B. A. Leshchinsky ,K. Mortezaei, and N. Lu, "Active earth pressures for unsaturated retaining structures," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. ۱٤۱, no. ۱۱, p. ۰٤۰۱٥۰٤۸, .۲۰۱٥

[۳] B. Deng and M. Yang, "Analysis of passive earth pressure for unsaturated retaining structures," *International Journal of Geomechanics*, vol. ۱۹, no. ۱۲, p. ۰٦۰۱۹۰۱٦, .۲۰۱۹

[٤] Z. Li and X. Yang, "Active earth pressure from unsaturated soils with different water levels," *International Journal of Geomechanics*, vol. ۱۹, no ,۷ .p. ۰٦۰۱۹۰۱۳, .۲۰۱۹

[٥] Z. Li and X. Yang, "Three-dimensional active earth pressure for retaining structures in soils subjected to steady unsaturated seepage effects," *Acta Geotechnica*, vol. ۱٥, no. ۷, pp. ۲۰۲۹-۲۰۱۷, .۲۰۲۰

[٦] G. Speranza, A. Ferrari, and L. Laloui, "A physical model for the interaction between unsaturated soils and retaining structures," in *E۳S Web of Conferences*, ۲۰۲۰, vol. ۱۹٥, no. ۳۰۱۳: EDP Sciences, pp. -۱ ٦, .۰۳۰۱۳

[۷] J. Chai and P. Khaimook, "Prediction of soil-water characteristic curves using basic soil properties," *Transportation Geotechnics*, vol. ۲۲, p. ۱۰۰۲۹٥, .۲۰۲۰

[۸] S. L. Houston, "It is Time to Use Unsaturated Soil Mechanics in Routine Geotechnical Engineering Practice," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. ۱٤٥, no. ٥, p. ۰۲٥۱۹۰۰۱, .۲۰۱۹

[۹] T. Vo and A. R. Russell, "Interaction between retaining walls and unsaturated soils in experiments and using slip line theory," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. ۱٤۳, no. ٤, p. ۰٤۰۱٦۱۲۰, .۲۰۱۷

[۱۰] T .Vo and A. Russell, "Rigid Retaining Walls Interacting with Unsaturated Soils in Axial Symmetry," in *Congrès International de Géotechnique–Ouvrages–Structures*, ۲۰۱۷: Springer, pp. .۷۸٥-۷۷٥

[۱۱] T. Vo, H. Taiebat, and A. Russell, "Interaction of a rotating rigid retaining wall with an unsaturated soil in experiments," *Géotechnique*, vol. ٦٦, no. ٥, pp. ۳۷۷-۳٦٦, .۲۰۱٦

[۱۲] T. Vo and A. R. Russell, "Slip line theory applied to a retaining wall–unsaturated soil interaction problem," *Computers and Geotechnics* ,vol. ٥٥, pp. ٤۲۸-٤۱٦, .۲۰۱٤

[۱۳] I. A. Abd, M. Y. Fattah, and H. Mekkiyah, "Relationship between the matric suction and the shear strength in unsaturated soil," *Case Studies in Construction Materials*, vol. ۱۳, p. e۰۰٤٤۱, .۲۰۲۰

[۱٤] S. Shahrokhabadi, F. Vahedifard, E. Ghazanfari, and M. Foroutan, "Earth pressure profiles in unsaturated soils under transient flow," *Engineering Geology*, vol. ۲٦۰, p. ۱۰٥۲۱۸, .۲۰۱۹

[۱٥] N. Khalili and M. Khabbaz, "A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils," *Geotechnique*, vol. ٤۸, no. ٥, pp. ٦۸۷-٦۸۱, .۱۹۹۸

[۱٦] Y.-Z. Wang, "Distribution of earth pressure on a retaining wall," *Geotechnique*, vol. ٥۰, no. ۱, pp. -۸۳ ۸۸, .۲۰۰۰

[۱۷] N. Salehi Alamdari, M. H. Khosravi, and H. Katebi" ,Distribution of lateral active earth pressure on a rigid retaining wall under various motion modes," *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, vol. ٥٤, no. ۱, pp. ۲٥-۱٥, .۲۰۲۰

[۱۸] Y.-S. Fang and I. Ishibashi, "Static earth pressures with various wall movements," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. ۱۱۲, no. ۳, pp. ۳۳۳-۳۱۷, .۱۹۸٦

[۱۹] D. G. Fredlund and H. Rahardjo, *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, .۱۹۹۳

[۲۰] N. Lu and W. J. Likos, *Unsaturated soil mechanics*. Wiley, .۲۰۰٤

[۲۱] J. P. Sahoo and R. Ganesh, "Active earth pressure on retaining walls with unsaturated soil backfill," in *International Congress and Exhibition" Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"*, ۲۰۱۷: Springer, pp .۱۹-۱ .

[۲۲] F. Chen, Y. Lin, and D. Li, "Solution to active earth pressure of narrow cohesionless backfill against rigid retaining walls under translation mode," *Soils and Foundations*, vol. ٥۹, no. ۱, pp. ۱٦۱-۱٥۱, .۲۰۱۹

[۲۳] D. White, W. Take, and M. Bolton, "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry," *Geotechnique*, vol. ٥۳, no. ۷, pp. ٦۳۱-٦۱۹, .۲۰۰۳

[۲٤] T. Vo and A. R. Russell, "Unsaturated soil interacting with a rotating model wall," *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, vol. ۱۳, no. ۲, pp. ۷۸-٦۳, .۲۰۱۳

UNCORRECTED PROOF

[۲۵] M. S. Morse, N. Lu, A. Wayllace, J. W. Godt, and W. Take, "Experimental test of theory for the stability of partially saturated vertical cut slopes," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. ۱٤۰, no. ۹, p. ۰٤۰۱٤۰۵۰, .۲۰۱٤

[۲٦] M. Khosravi, T. Pipatpongsa, and J. Takemura, "Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode," *Géotechnique*, vol. ٦۳, no. ۱۲, pp. .۲۰۱۳ ,۱۰۲۸-۱۰۲۰

UNCORRECTED PROOF