Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

Investigation of Liquefiable Sandy Soil Improvement by Ordinary and Geotextile-Reinforced Stone Columns Using a Small-Scale Shaking Table

Parna Yarbakhti and Ali Akbar Golshani*

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
* corresponding author:(golshani@modares.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 28 April 2024

Revised: 18 June 2024

Accepted: 12 August 2024

Keywords:

Liquefaction,
shaking table,
stone column,
geotextile.

Abstract

The increase in construction in coastal cities, which are prone to liquefaction due to the high level of underground water and soil type, along with their soil conditions that do not meet the technical requirements, has led engineers to undertake soil improvement. Among the liquefaction mitigation methods, the stone column technique has been considered one of the most versatile and economical ground improvement techniques, including increasing the density of surrounding soil by vibration and replacement, expediting drainage, and reducing the shear stress of surrounding soil by introducing stiff elements. This study evaluated the seismic performance of stone columns and full- and partial-length geotextile-encased stone columns as a liquefaction countermeasure in the loose sample of Firoozkooh No. 161 sand. The sands were susceptible to liquefaction in a loose state, i.e., around 25% relative density, when subjected to a sinusoidal acceleration of 0.35g and 3Hz frequency. A group of nine ordinary and geotextile-reinforced stone columns with a diameter and length of 5 cm and 50 cm, respectively, has been created. In order to evaluate the seismic behavior, four reduced-scale 1-g model tests were conducted using a uniaxial shake table on a group of ordinary and geotextile-reinforced stone columns. Based on the obtained results, reinforcing the full length of the stone columns using geotextile has prevented liquefaction in the surface layers, reduced the excess pore water pressure ratio, increased the soil stiffness, and overall, has provided more effective performance than ordinary stone columns.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:
Yarbakhti, P. and Golshani, A.A. 2025. Investigation of liquefiable sandy soil improvement by ordinary and geotextile-reinforced stone columns using a small-scale shaking table, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(2), 42-57.
https://doi.org/10.24200/j30.2024.64343.3319

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

مطالعه‌ی بهسازی خاک ماسه‌ای روانگرا توسط ستون‌های سنگی سنتی و مسلح‌شده با ژئوتکستایل با استفاده از میز لرزان کوچک مقیاس

پرنا یاربختی و علی اکبر گلشنی *

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (golshani@modares.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۲/۰۹

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۵/۲۲

واژگان کلیدی:

روانگرایی،

میز لرزان،

ستون سنگی،

ژئوتکستایل.

چکیده

افزایش ساخت‌وساز در شهرهای ساحلی، مناطق مستعد روانگرایی به‌دلیل سطح بالای آب زیرزمینی و نوع خاک، و همچنین در مناطقی که شرایط ژئوتکنیکی الزامات فنی را برآورده نمی‌سازد، مهندسان را ناچار به انجام بهسازی خاک کرده است. در مطالعه‌ی حاضر، رفتار گروه ستون‌های سنگی سنتی و محصورشده توسط ژئوتکستایل به‌عنوان روشی جهت مقابله با روانگرایی خاک ارزیابی شده است. تسلیح ستون‌های سنگی در دو حالت، تسلیح تمام طول و تسلیح بخش فوقانی (به طول ۴ برابر قطر ستون سنگی) انجام شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد، چهار آزمایش میز لرزان روی گروه‌های ستون‌های سنگی سنتی و مسلح‌شده با آرایش مربعی انجام شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، تسلیح تمام طول ستون‌های سنگی توسط ژئوتکستایل، منجر به عدم وقوع روانگرایی در لایه‌های سطحی، کاهش نسبت فشار آب منفذی اضافی، افزایش سختی خاک، و در مجموع عملکرد مؤثرتر نسبت به ستون‌های سنگی سنتی شده است. ستون‌های سنگی محصورشده توسط ژئوتکستایل در مقایسه با ستون‌های سنگی سنتی، منجر به کاهشی در حدود ۳۰٪ بیشینه‌ی مقدار نسبت اضافه فشار آب منفذی در سطح و در حدود ۸٪ در عمق شده است. از سوی دیگر، افزایش سختی مدل در قالب افزایش دامنه‌ی شتاب در سطح، در صورت اجرای گروه ستون سنگی مسلح در حدود ۱۲٪ نسبت به گروه ستون سنگی سنتی افزایش داشته است.

۱. مقدمه

رشد روزافزون ساخت‌وساز در مناطق شهری و کلان‌شهرها، منجر به افزایش چشمگیر ارزش زمین و نبود زمین‌های مناسب جهت گسترش شده است. در نتیجه، در حال حاضر ساخت‌وساز در زمین‌هایی انجام می‌شود که به‌دلیل شرایط نامناسب ژئوتکنیکی، پیش از این از لحاظ اقتصادی، توجیهی برای گسترش نداشته‌اند. از جمله‌ی مناطق مذکور، شهرهای ساحلی هستند، که به‌دلیل نوع خاک و تراز بالای آب زیرزمینی، پتانسیل روانگرایی دارند. خطر روانگرایی و تغییرشکل‌های ناشی از آن با استفاده از انواع روش‌های بهسازی خاک، مانند: متراکم‌سازی درجای مصالح[1]، جایگزینی یا حذف خاک نامناسب، اختلاط عمیق خاک[2]، جامدسازی[3] (مثلاً سیمانتاسیون[4])، و استفاده از چاه‌های زهکش[5]، از جمله زهکش‌های شنی جهت کنترل فشار آب حفره‌ای، تراکم دینامیکی[6]، اشباع‌زدایی[7]، استفاده از ژئوکامپوزیت‌ها، ژئوگریدها، و غیره، می‌تواند کاهش یابد.[۱-۱۱] از میان روش‌های مختلف بهسازی زمین، احتمالاً رایج‌ترین آن‌ها، مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیکی و ستون‌های سنگی هستند. این موضوع عمدتاً به سهولت ساخت، سادگی، و صرفه‌ی اقتصادی آن‌ها مربوط می‌شود، که موردعلاقه‌ی مهندسان است.[۱۲] مطالعات گسترده‌ای روی کاهش پتانسیل روانگرایی با استفاده از ستون‌های سنگی به روش‌های تحلیلی،[۷ و ۱۳] مطالعات موردی میدانی،[۱۴] آزمایش‌های میدانی،[۱۵ و ۱۶] آزمایش‌های فیزیکی،[۲، ۵، و ۱۶] و شبیه‌سازی‌های عددی،[۷ و ۱۷] انجام شده است.

مطالعات موردی زمین‌لرزه‌ها، آزمایش‌های سانتریفیوژ و مطالعات عددی نشان داده‌اند که اجرای ستون‌های سنگی، روش بهسازی مؤثری جهت کاهش خطرهای روانگرایی است. برنان و مدابوشی[8] (۲۰۰۶)، کاهش پدیده‌ی روانگرایی را با استفاده از زهکش‌های عمودی با عمق نفوذ متغیر بررسی کرده‌اند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، در لایه‌های عمیق‌تر، خاک سریع‌تر و به‌طورکارآمدتری تحت تأثیر وجود زهکش قرار می‌گیرد.[۱۸] هوانگ[9] و همکاران (۲۰۱۶)، نشان داده‌اند

[1] In-situ material densification
[2] Deep soil mixing
[3] Solidification
[4] Cementation
[5] Relief wells
[6] Dynamic compaction
[7] Desaturation
[8] Brennan & Madabhushi
[9] Huang

استناد به این مقاله:

یاربختی، پرنا و گلشنی، علی‌اکبر، ۱۴۰۴. مطالعه‌ی بهسازی خاک ماسه‌ای روانگرا توسط ستون‌های سنگی سنتی و مسلح‌شده با ژئوتکستایل با استفاده از میز لرزان کوچک مقیاس. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۲)، صص.۴۲-۵۷. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64343.3319

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

که اثربخشی ستون‌های سنگی جهت کاهش خطر روانگرایی خاک حین زلزله، به زهکشی در امتداد ستون سنگی، کاهش تنش برشی تناوبی[10] خاک، و تراکم خاک اطراف بستگی دارد.[19] نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ نشان داده است که تراکم ناشی از اجرای ستون‌های سنگی، نه تا حد رضایت‌بخشی، اما تا حدی منجر به کاهش نشست دائمی فونداسیون و نیز موجب تقویت نیروها و شتاب‌های اعمالی به روسازه‌ها شده است.[20] بیاتی و باقری‌پور (۲۰۱۹)، با انجام آزمایش‌های میز لرزان، رفتار ماسه‌های اشباع بهسازی‌شده توسط ستون‌های سنگی را حین روانگرایی ارزیابی کرده‌اند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از ستون‌های سنگی منجر به تأخیر در زمان وقوع بیشینه‌ی نشست شده است. این موضوع در ماسه‌های سُست در مقایسه با ماسه‌های بسیار سُست، چشمگیرتر بوده است.[21] نتایج مطالعه‌ی قربانی و همکاران (۲۰۲۰)، نشان داده است که طول ستون‌های سنگی و زاویه‌ی اصطکاک بالاتر مصالح سنگ‌دانه‌ای، اثر قابل‌توجهی در مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای و تغییرشکل داشته است.[22]

اونو[11] و همکاران (۱۹۸۷)، نشان داده‌اند که حین روانگرایی، نفوذپذیری ستون‌های سنگی محصورشده با ژئوسنتتیک حدود ۶۰٪ کاهش یافته است. در حالی که کاهش نفوذپذیری ستون‌های سنگی سنتی، به‌دلیل گرفتگی، بیشتر از ۶۰٪ بوده است.[23] پوشش ژئوسنتتیک منجر به افزایش سختی محوری و برشی[12] ستون‌های سنگی و بازتوزیع[13] تنش‌های ناشی از زلزله یا تنش‌های از پیش موجود می‌شود. استفاده از ستون‌های سنگی محصورشده با ژئوسنتتیک به‌عنوان یک روش تسلیح خاک می‌تواند منجر به تغییر شرایط خاک، پاسخ شتاب اصلاح‌شده از نظر محتوای بسامدی و دامنه در جریان زلزله شود.[24]

بهسازی به کمک ستون سنگی محصورشده توسط ژئوسنتتیک، منجر به اتلاف کامل اضافه فشار آب منفذی با نرخ سریع‌تری نسبت به ستون‌های سنگی سنتی می‌شود. تحت گرادیان هیدرولیکی بالا، ستون سنگی مسلح می‌تواند تا ۴۴٪ منجر به کاهش مقدار بیشینه‌ی اضافه فشار آب شود. برای نسبت‌های بالای قطر به قطر مؤثر ستون سنگی، نفوذپذیری کم ستون سنگی می‌تواند در کاهش گرفتگی[14] تأثیرگذار باشد. پوشش تمام طول ستون سنگی در مقایسه با پوشش بخشی از طول آن، از نقطه‌نظر جلوگیری از آلودگی و گرفتگی ستون سنگی برتری دارد.[25] چاکرابورتی و ساوانت[15] (۲۰۲۲)، با بررسی تغییرات نسبت اضافه فشار آب منفذی در اعماق مختلف به این نتیجه رسیدند که برای نسبت ثابتی از فاصله‌ی مرکز به مرکز به قطر ستون‌های سنگی، افزایش قطر ستون‌های سنگی منجر به کاهش اثربخشی آن‌ها می‌شود. در حالی که برای نسبت ثابت، قطرهای بزرگ‌تر ستون‌های سنگی در مقایسه با قطرهای کوچک‌تر، تأثیر بیشتری در کاهش نشست خواهد داشت.[26] اسوکاواتی[16] و همکاران (۲۰۲۳)، با انجام مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار اُپنسیس[17] روی خاک ماسه‌ی سیلتی مستعد روانگرایی نشان داده‌اند که در مقایسه با میدان آزاد، اجرای ستون‌های سنگی محصورشده توسط ژئوسنتتیک، بیشینه‌ی مقدار اضافه فشار آب منفذی و نشست به ترتیب در حدود ۱۰ و ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.[27] ستون سنگی محصورشده توسط ژئوسنتتیک به‌طورمؤثری جهت کاهش تغییرشکل پی‌های مستقر روی خاک نرم استفاده شده است.[28 و 29] در حالی که پژوهش‌های کافی در زمینه‌ی کاهش پتانسیل روانگرایی لایه‌های ماسه‌ای بهسازی‌شده توسط ستون‌های سنگی مسلح انجام نشده است.

در مطالعه‌ی حاضر، به‌منظور ارزیابی اثر تسلیح ستون‌های سنگی با استفاده از پوشش ژئوتکستایل در کاهش پتانسیل روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای لایه‌ای، ۴ آزمایش میز لرزان کوچک‌مقیاس انجام شده است. نتایج جهت بررسی رفتار ماسه‌ی مستعد روانگرایی بهسازی‌شده به دو روش گروه‌های ستون‌های سنگی سنتی و محصورشده توسط ژئوتکستایل تجزیه‌وتحلیل شده است.

۲. مشخصات مصالح

۱.۲. خاک

استفاده از یک نوع خاک با شرایط و ویژگی‌های ثابت، که همگان بتوانند آزمایش‌های یکسان روی آن انجام دهند، قابلیت تکرارپذیری نتایج و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف را ممکن می‌سازد. خاک مناسب برای این منظور باید ویژگی‌های خاصی داشته باشد. مورد اول: در دسترس‌بودن خاک آزمایشی به میزان قابل‌توجه و با مشخصات فیزیکی ثابت است. مورد دوم: حتی‌الامکان مشخصات خاک آزمایشی به‌عنوان نمونه‌ی ماسه‌ای، مشابه ماسه‌های استاندارد شناخته‌شده در دنیا باشد، تا بتوان نتایج مطالعات را با نتایج مطالعات سایر پژوهشگران در جهان مقایسه کرد. با توجه به آنچه که بیان شده است، در پژوهش حاضر از ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه به‌عنوان مصالح استاندارد پایه برای مطالعات آزمایشگاهی استفاده شده است. ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه، ماسه‌ای تمیز با دانه‌های گوشه‌دار طلایی‌رنگ با دانه‌بندی یکنواخت است. خلاصه ای از مشخصات ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه در جدول ۱ ارائه شده است.[30]

۲.۲. ستون سنگی

از مصالح سنگ شکسته با اندازه‌ی دانه‌های ۲/۴ تا ۱۰ میلی‌متر با مشخصات فیزیکی ارائه‌شده در جدول ۲ به‌عنوان مصالح ستون سنگی استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای و مصالح ستون سنگی در شکل ۱ مشاهده می‌شود. طراحی دانه‌بندی ستون سنگی با هدف اطمینان از زهکشی مطلوب انجام شده است. بدین منظور از رابطه‌ی براون[18] جهت ارزیابی مصالح ستون سنگی استفاده شده است. براون (۱۹۷۷)، یک شاخص کمّی به نام عدد تناسب (S_N)[19]، جهت ارزیابی مصالح دانه‌ای ستون سنگی به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف کرده است:[30]

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

USCS classification	C_u	C_c	e_{min}	e_{max}
SP	1.87	0.88	0.548	0.943

جدول ۱. مشخصات مصالح ستون سنگی.

USCS classification	C_u	C_c	Percentage of gravel
GP	2.055	1.202	78.9

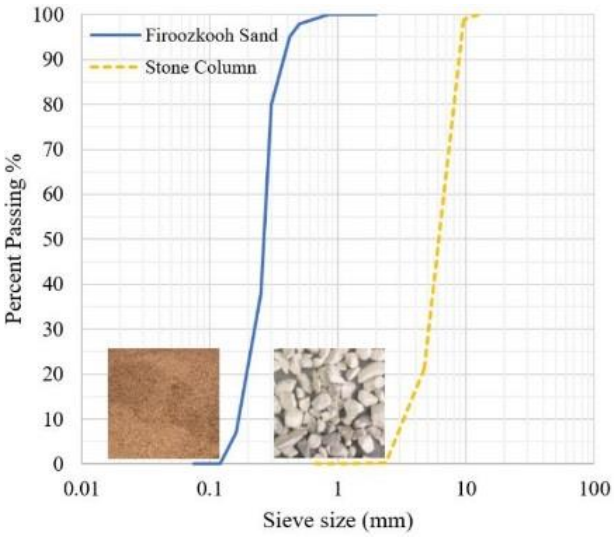
[10] Cyclic shear stress
[11] Onoue
[12] Axial and shear stiffness
[13] Redistribute
[14] Clogging
[15] Chakraborty & Sawant
[16] Asokawati
[17] OpenSees
[18] Brown
[19] Suitability Number

جدول ۲. عدد تناسب براون.[۳۰]

Suitability No.	0-10	10-20	20-30	30-50	>50
rating	Excellent	Good	Fair	Poor	Unsuitable

جدول ۳. مشخصات ژئوتکستایل.

Ultimate tensile strength (kN/m)	**Strain at ultimate strength** (%)	**Secant stiffness at ultimate Strain (J)** (kN/m)	**Thickness** (mm)
6.5	27.6	23.5	0.7



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح ستون سنگی و ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

$$S_N = 1.7\sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2}+\frac{1}{(D_{20})^2}+\frac{1}{(D_{10})^2}} \quad (1)$$

که در آن، D_{50}، D_{20}، و D_{10} قطرهایی در واحد میلی‌متر هستند، که به ترتیب ۵۰، ۲۰، و ۱۰ درصد دانه‌های خاک از آن‌ها کوچک‌تر هستند. هر چه مقدار S_N کمتر باشد، مصالح دانه‌ای معرفی‌شده برای ستون سنگی مناسب‌تر هستند. با توجه به منحی دانه‌بندی شکل ۱، مقدار S_N مصالح شنی برابر ۰/۸ به‌دست آمده است. مطابق اعداد تناسب متناظر با درجه‌بندی سنگ‌دانه‌ها، که در جدول ۲ ارائه شده است، مصالح انتخابی به عنوان ستون سنگی، در درجه‌ی عالی ارزیابی شده‌اند.

۳.۲. مصالح پوشش ستون سنگی

در عمل، ژئوتکستایل‌ها جهت پوشش عمودی ستون‌های سنگی، با قطرهای ۴۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر، بیشینه‌ی مقاومت کششی ۴۰۰ (kN/m) و سختی کششی ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ (kN/m) تولید می‌شوند.[۳۱] براساس قوانین اثر مقیاس، رابطه‌ی میان سختی مسلح‌کننده در نمونه‌ی اولیه (J_p) و سختی مسلح‌کننده در مدل (J_m) را می‌توان به‌صورت $J_p = J_p \times \mu^2$ محاسبه کرد، که در آن μ ضریب مقیاس است.[۳۲] در مطالعه‌ی حاضر، از ژئوتکستایل بافته‌شده جهت محصورکردن ستون‌های سنگی استفاده شده است. مشخصات مقاومت کششی ژئوتکستایل مذکور براساس آزمایش‌های کشش استاندارد مطابق با ISO:۱۳۹۳۴-۱:۲۰۱۳ تعیین شده است. در جدول ۳، خلاصه‌ای از مشخصات ژئوتکستایل مسلح‌کننده ارائه شده است.

۳. سازوکار زهکشی ستون‌های سنگی

نفوذپذیری زیاد ستون‌های سنگی منجر به کاهش رشد فشار آب حفره‌ای در آن‌ها می‌شود، که گرادیان فشاری بین ستون‌ها و خاک اطراف آن‌ها ایجاد می‌کند. این امر منجر به حرکت جریان آب به سمت ستون‌ها و در نتیجه باعث کاهش فشار آب حفره‌ای در خاک می‌شود.[۳۳] به‌طورکلی، طراحی ستون سنگی به منظور مقابله با روانگرایی، در درجه‌ی اول به تعیین فاصله‌ی مناسب ستون‌ها برای قطر انتخابی مربوط می‌شود. قطر ستون سنگی نیز عمدتاً به تجهیزات استفاده‌شده بستگی دارد.[۸] در مطالعه‌ی حاضر، به‌منظور ارزیابی مشخصات موردنیاز برای زهکش، از نمودارهای طراحی در نوشتار پال و دب[۲۰] (۲۰۱۸)،[۹] استفاده شده است، که راه‌حلی ساده جهت تعیین ظرفیت زهکش‌ها حین روانگرایی خاک با اعمال اثر نفوذپذیری محدود و سختی زهکش‌های شنی در مدل نوشتار سید و بوکر[۲۱] (۱۹۷۷)،[۱] پیشنهاد شده است. با استفاده از نمودارهای طراحی پال و دب (۲۰۱۸) و درنظرگرفتن r_u=۰/۳ و ۴= N_{eq}/N_l (نسبت تعداد سیکل معادل سیکل‌های تنش یکنواخت به تعداد سیکل موردنیاز تنش لرزه‌ای برای شروع روانگرایی)، مقادیر مناسب طول و قطر ستون‌های سنگی جهت ساخت در آزمایشگاه ارزیابی شده است.

با انتخاب قطر ۵ سانتی‌متری برای ستون سنگی (با توجه به امکانات ساخت و همچنین ابعاد جعبه)، فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌های سنگی از نمودارهای طراحی به‌دست می‌آیند. فاصله‌ی به‌دست‌آمده از نمودارهای طراحی، بیشینه‌ی مقدار است.[۳۴] برای قطر انتخابی ستون سنگی، با توجه به ابعاد جعبه‌ی آزمایش، فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌های سنگی باید به گونه‌ای انتخاب شود که درنهایت قطر مؤثر ستون‌های سنگی کاملاً در محیط خاکی و در فاصله‌ی مناسبی از دیواره‌های جعبه قرار گیرد. بنابر آنچه که بیان شد، برای قطر ۵ سانتی‌متر، فاصله‌ی مرکز به مرکز ستون‌های سنگی ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

۴. آزمایش میز لرزان

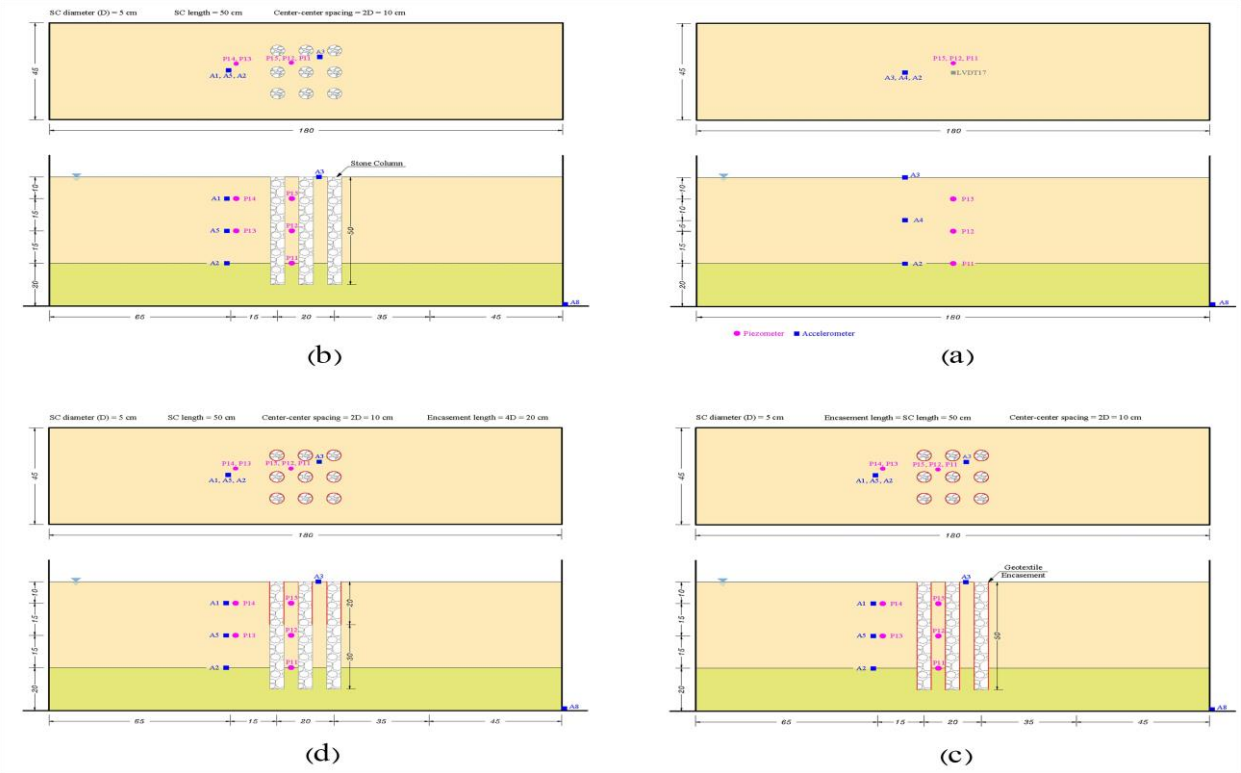
شبیه‌سازی زلزله برای ۴ مدل با استفاده از دستگاه میز لرزان دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران انجام شده است. دستگاه میز لرزان، امکان اعمال محدوده‌ی بسامد ۰/۰۱ تا ۱۵ هرتز با دامنه‌ی ±۱۲۵ میلی‌متر دامنه و شتاب ۱ g را فراهم

[20] Pal & Deb

[21] Seed & Booker

جدول ۴. خلاصه‌ی مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی.

No. Test	Test Description
1	Free Field
2	Improvement using group of ordinary stone columns
3	Improvement using group of encased stone columns (full-length encasement)
4	Improvement using group of encased stone columns (partial-length encasement)



شکل ۲. نما و مقطع عرضی: (a) مدل ۱، (b) مدل ۲، (c) مدل ۳، و (d) مدل ۴.

کرده است. عرشه‌ی میز با ابعاد ۱/۲×۱/۸ (بر حسب متر) می‌تواند بیشینه‌ی بار عمودی ۵۰ کیلو نیوتن را تحمل کند.

۱.۴. جعبه‌ی[۲۲] آزمایش

از جعبه‌ی صلب با ابعاد ۷۰×۴۵×۱۸۰ (ارتفاع×عرض×طول) سانتی‌متر استفاده شده است. محفظه‌ای که از صفحه‌هایی با جنس پلاستیک شیشه‌ای[۲۳] به ضخامت ۲ سانتی‌متر ساخته و توسط یک قاب فولادی در بالا، پایین، و اطراف جعبه مهار شده است.

ورق‌های پلاستیکی شفاف، رفتار مدل حین آزمایش را قابل مشاهده می‌سازد. جعبه‌ی مذکور، جهت شبیه‌سازی شرایط میدان آزاد، در دو وجه داخلی خود در راستای عرضی، دو لایه‌ی فوم پلی‌استایرن جاذب به ضخامت ۲۵ میلی‌متر دارد، که مرزهای ویسکوزی را در شرایط میدان آزاد ایجاد می‌کنند.[۳۵] در جدول ۴، مشخصات کلی مدل‌ها ارائه شده است. همچنین، در شکل ۲، به‌طورشماتیک هندسه‌ی مدل‌های آزمایشگاهی و موقعیت حسگرها[۲۴] مشاهده می‌شود.

۵. مدل‌سازی فیزیکی

در آزمایش‌های فیزیکی جهت بررسی روانگرایی خاک، استفاده از ماسه‌های سُست، یعنی بسیار سُست‌تر از ماسه‌ی درجا پیشنهاد شده است.[۳۶] در مطالعه‌ی حاضر، از تیپ III قانون مقیاس‌بندی تعمیم‌یافته‌ی نوشتار ایای[۲۵] و همکاران (۲۰۰۵)،[۳۲] استفاده شده است. با توجه به ابعاد جعبه‌ی صلب، ضریب مقیاس هندسی (نسبت نمونه‌ی اولیه به مدل)، ۱۲= μ در نظر گرفته شده است.

۱.۵. ساخت بستر خاکی

بستر خاکی به روش بارش خشک و در لایه‌های یکنواخت ۵ سانتی‌متری ایجاد شده است. مدل خاکی شامل لایه‌ی غیرروانگرا به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و تراکم نسبی ۸۵٪ در بخش تحتانی و لایه‌ی روانگرا به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر و تراکم نسبی ۲۵٪ در بخش فوقانی بوده است. وزن مخصوص خشک ماسه نیز به ترتیب برابر با ۱۴/۱۰ و ۱۶/۱۷ (kN/m^3) متناظر با تراکم نسبی ۲۵ و ۸۵ درصد بوده است. در تمام آزمایش‌ها، پس از تکمیل ساخت مدل،

[22] Box
[23] Plexiglas
[24] Instruments
[25] Iai



شکل ۳. شابلون استفاده‌شده جهت ساخت ستون‌های سنگی.

دی‌اکسیدکربن از شیرهای تعبیه‌شده در کف مدل به داخل محیط خاکی منتشر شده است. این روش جهت اطمینان از اشباع بهتر محیط خاک انجام شده است. زیرا دی‌اکسیدکربن با آب واکنش می‌دهد تا اسید کربنیک (H_2CO_3) تشکیل دهد، در حالی که هوای داخل حفره‌های خاک با آب مخلوط نمی‌شود و به شکل حباب درون آب باقی می‌ماند و منجر به رفتار سخت‌تر خاک می‌شود. در مرحله‌ی بعد، ورود آب به محفظه تا رسیدن به ترازی برابر تراز پروفیل خاک ادامه یافته است.

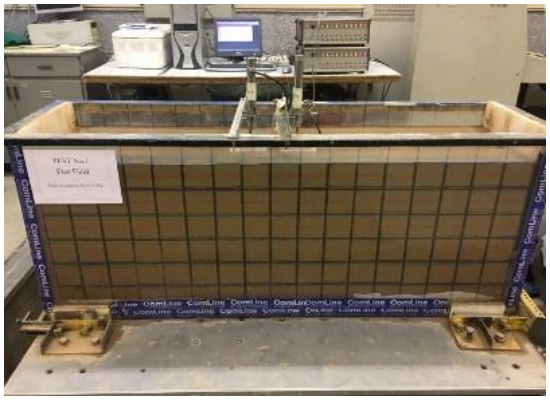
۲.۵. ساخت ستون سنگی

روش رایج ساخت ستون سنگی در مدل‌سازی‌های فیزیکی، که شامل تعبیه‌ی لوله در جعبه و ساخت ستون پیش از انجام خاکریزی است، هیچ‌گونه تطابقی با شرایط واقعی اجرا ندارد. بنابراین فرایندی جهت ساخت ستون‌های سنگی با بالاترین کیفیت مد نظر قرار گرفته است. در روش مذکور، پس از اتمام ساخت بستر خاکی، به‌منظور ساخت ستون‌های سنگی از لوله‌های توخالی و ته‌باز از جنس PVC، به قطر خارجی ۵۰ (برابر با قطر ستون سنگی) و ضخامت ۱/۸ میلی‌متر استفاده شده است. جهت حفظ فاصله‌ی دقیق مرکز به مرکز ستون‌ها و همچنین اجرای شاقول آن‌ها، شابلونی مطابق شکل ۳ ساخته شده است. شابلون در دو تراز با فاصله‌ی حدود ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر ساخته شده است، که سبب کمینه‌سازی انحراف محور قائم ستون‌های سنگی هنگام ساخت می‌شود. شابلون به کمک دو گیره در دو طرف به جعبه‌ی مدل متصل و ثابت نگه داشته شده است. پس از ثابت‌کردن شابلون روی جعبه، لوله‌ی توخالی توسط چکش لاستیکی به داخل لایه‌ی ماسه‌ای کوبیده شده است، تا به تراز انتهای ستون سنگی برسد.

سپس از اوگری مارپیچ به قطر ۴۵ میلی‌متر جهت تخلیه‌ی ماسه‌ی نفوذکرده به داخل لوله استفاده شده است. گمانه‌ی ایجادشده با استفاده از سنگ‌دانه‌ها در ۱۰ لایه با ضخامت یکسان پُر شده است. وزن سنگ‌دانه‌ها برای هر لایه براساس وزن مخصوص خشک ۱۶/۴ (kN/m^3) محاسبه شده است. هر لایه با استفاده از یک میله‌ی چوبی به خوبی متراکم شده است، تا ضخامت ۵ سانتی‌متر (برابر قطر ستون سنگی) به‌دست آید. پس از کوبش هر لایه، لوله به آرامی به مقدار کمتر از ۵ سانتی‌متر (جهت حفظ همپوشانی لایه‌ها و جلوگیری از نفوذ سنگ‌دانه‌ها به خاک اطراف ناشی از کوبش هر لایه) به بالا کشیده و ساخت لایه‌ی بعد انجام شده است. این روند تا زمان ساخت ستون سنگی به طول ۵۰ سانتی‌متر ادامه یافته است. مراحل مذکور تا ساخت گروه، شامل ۹ ستون سنگی با آرایش مربعی با نسبت جایگزینی سطح[26] ۱۹٪/۶ تکرار شده است (شکل ۴).



شکل ۴. نمای پلان گروه سنگی ساخته‌شده (نسبت ابعاد مدل به ابعاد نمونه‌ی واقعی: ۱ به ۱۲).



شکل ۵. مدل ۱ پیش از اعمال تحریک و شروع آزمایش.

زهکش‌هایی که تا عمیق‌ترین بخش لایه‌ی روانگرا ادامه نمی‌یابند، به زمان بیشتری جهت شروع انتقال جبهه‌های جریان از بخش تحتانی خود نیاز دارند؛ زیرا به جای مصالح زهکش، ماسه‌ی ریز با نفوذپذیری پایین‌تر در زیر آن‌ها قرار دارد. در نتیجه، ستون‌های سنگی جهت حفظ عملکرد زهکشی مطلوب، باید تا عمق لایه‌ی روانگرا ادامه یابند.[۱۸ و ۳۷] بنابراین در مطالعه‌ی حاضر، ستون‌های سنگی از لایه‌ی روانگرا عبور کرده و ۱۰ سانتی‌متر در لایه‌ی غیرروانگرای تحتانی نفوذ داشته است.

۳.۵. ساخت ستون سنگی مسلح

از میان مسلح‌کننده‌های مسطح و سلولی[27]، نوع سلولی در بهبود مقاومت مؤثرتر است.[۱۲] به‌منظور ساخت ستون سنگی مسلح، ژئوتکستایل پلی‌پروپیلن بافته شده[28] به شکل مستطیل بریده و با استفاده از چسب حرارتی به استوانه‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر/ ۲۰ سانتی‌متر با درز طولی تبدیل شده است. قطر غلاف ژئوتکستایل برابر قطر ستون سنگی بوده و البته در هنگام برش، حدود ۱۵ میلی‌متر هم‌پوشانی در محل درز در نظر گرفته شده است. توجه به این نکته ضروری است که در عملیات بهسازی میدانی، غلاف بدون درز ساخته شده است، تا هیچ نقطه‌ضعفی وجود نداشته باشد.[۳۸] پس از تخلیه‌ی خاک داخل لوله‌ها، غلاف ژئوتکستایل به سمت داخل لوله رانده شده است. سپس ساخت ستون سنگی مطابق توضیحات بخش ۲.۵. ساخت ستون سنگی (زیربخش ۰) انجام شده است. غلاف ژئوتکستایلی قادر به اعمال اثر محصورکنندگی برای دانه‌های ستون‌های سنگی است، که آن‌ها را در موقعیت خود نگه می‌دارد و تاب‌خوردگی حین لرزش را به میزان کمینه می‌رساند.[۳۷] در شکل‌های ۵ و ۶، تصاویری از مدل پیش از انجام آزمایش مشاهده می‌شود.

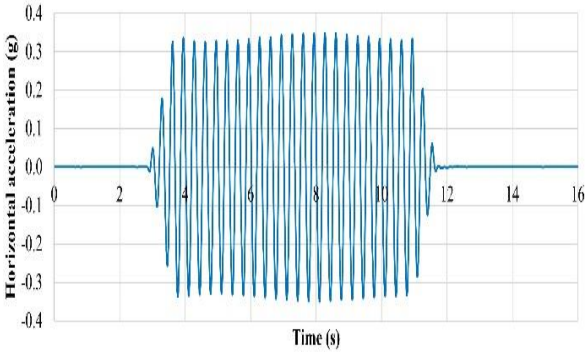
[26] Area Replacement Ratio (Arr)

[27] Cellular

[28] Woven



شکل ۶. مدل ۴ پیش از ورود آب و انجام آزمایش.



شکل ۷. تحریک ورودی به عرشه‌ی دستگاه میز لرزان.

۶. تحریک اعمالی

سوابق پیشین زمین لرزه‌ها نشان می‌دهند اغلب زلزله‌هایی که خسارت شدیدی به بار آورده‌اند، دارای PGA در محدوده‌ی ۲/۹۴ تا ۴/۹۰ (m/s^2) بوده‌اند.[۳۶] با توجه به قابلیت میز لرزان موجود و این واقعیت که هر تابع تناوبی (به‌عنوان مثال حرکت ورودی زلزله) را می‌توان با استفاده از تحلیل فوریه، به‌صورت مجموع چند سری تابع هارمونیک ساده بیان کرد، بارگذاری هارمونیک به‌عنوان تحریک ورودی انتخاب شده است.[۳۵] در مطالعه‌ی حاضر، تحریک ورودی به‌صورت تابع هارمونیک سینوسی با دامنه‌ی g ۰/۳۵ و بسامد Hz ۳ در ۲۴ سیکل در جهت طولی میز لرزان اعمال شده است. بسامد ۳ هرتز به‌دلیل نزدیکی آن به بسامد معمول زمین‌لرزه‌ها،[۳۵] استفاده شده است، که بسیار کمتر از بسامد اصلی مدل بوده است. تحریک ورودی به عرشه‌ی دستگاه میز لرزان در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

۷. نتایج آزمایش‌ها

۱.۷. اثر گرفتگی

با جریان آب در خاک ماسه‌ای، دانه‌های خاک توسط نیروهای هیدرودینامیکی از هم جدا و سپس با تراوش آب منتقل می‌شوند. انتقال ذرات ریز خاک ماسه‌ای به منافذ زهکش شنی، منجر به گرفتگی در ستون‌های سنگی می‌شود. پس از اتمام آزمایش، مدل ۲ برای تشخیص پدیده‌ی گرفتگی به‌دقت بررسی شده است. مقطع عرضی ستون‌های سنگی در مدل ۲ پس از اعمال تحریک در شکل ۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مقدار قابل‌توجهی از ماسه‌ی ریز به داخل ستون‌های سنگی نفوذ کرده است. بنابراین، اثربخشی ستون‌های سنگی به‌عنوان یک مسیر زهکشی با پدیده‌ی گرفتگی کاهش می‌یابد.

۲.۷. تاریخچه‌ی زمانی شتاب افقی

در شکل‌های ۹ الی ۱۲، تاریخچه‌ی زمانی شتاب برای ۴ مدل مشاهده می‌شود. متأسفانه رکوردی از ACC۵ در مدل ۴ به دست نیامده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، دامنه‌ی شتاب پایه در اثر انتقال به سطح زمین تا پیش از



شکل ۸. پدیده‌ی گرفتگی در مدل ۲.

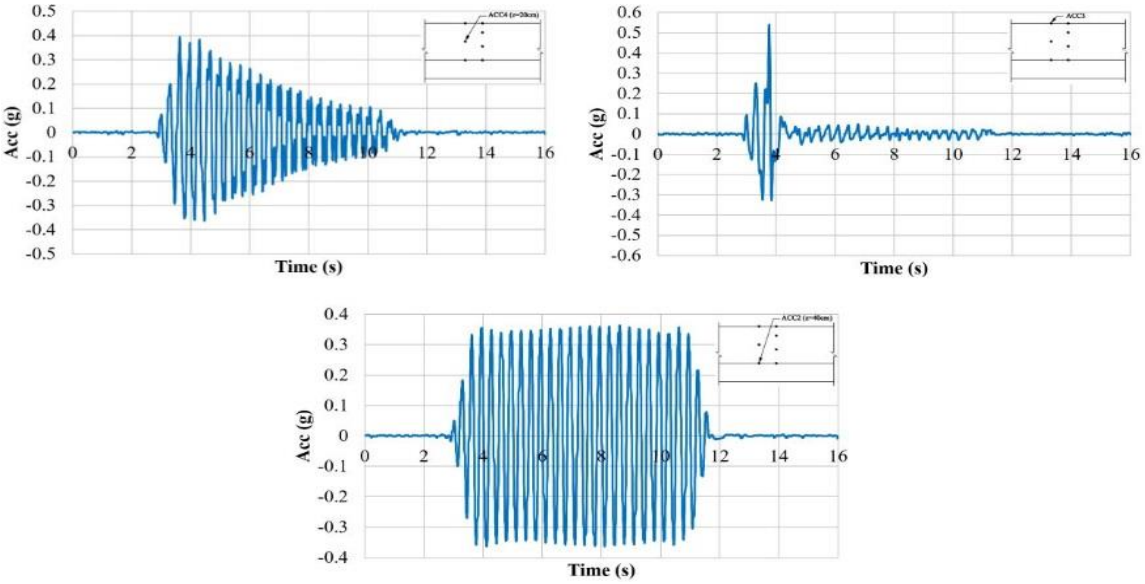
روانگرایی افزایش یافته است. با وقوع روانگرایی، روند شتاب به گونه‌ای تغییر کرده است که دامنه‌ی شتاب به‌تدریج در اثر از دست‌رفتن مقاومت خاک ناپدید شده است. از لحاظ زمانی، در لایه‌های سطحی‌تر، دامنه‌های شتاب نسبت به لایه‌های عمیق‌تر به دلیل فشار محصورکننده‌ی کمتر، زودتر کاهش یافته است. کاهش شدید دامنه‌ی شتاب با گذشت زمان نشان داده است که روانگرایی ابتدا در سطح یا در نزدیکی سطح رخ داده و آثار روانگرایی از سطح به سمت عمق مدل پیشروی کرده است. نتیجه‌ی مشابه توسط فیلم‌های ضبط‌شده از عملکرد هر آزمایش نیز تأیید شده است.

به‌دلیل عدم روانگرایی لایه‌ی متراکم تحتانی، رکورد شتاب در مرز بین دو لایه (ACC۲)، روندی شبیه به تاریخچه‌ی زمانی شتاب پایه (شکل ۷) با تقویت جزئی را تجربه کرده است. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های مطالعات انجام‌شده توسط برخی نوشتارها،[۳۹-۴۱] مطابقت داشته است. در تمام مدل‌ها، نتایج ACC۱ و ACC۳ نشان داده‌اند که به‌دلیل مقاومت ذاتی پایین در برابر روانگرایی ناشی از تنش محصورکننده‌ی بسیار کم در مجاورت سطح، روانگرایی در دو شتاب‌سنج رخ داده است. روند مشابهی در برخی مطالعات،[۲، ۳۴، و ۴۲] مشاهده شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده مشهود است که با توجه به روانگرایی و در نتیجه از دست‌دادن مقاومت برشی خاک، دامنه‌ی رکوردهای شتاب در لایه‌ی روانگراشونده در مراحل اولیه‌ی تحریک به‌طورقابل‌توجهی کاهش یافته است. کاهش چشمگیر شتاب پس از سیکل سوم در ACC۳ در مدل ۱، نشان‌دهنده‌ی نرم‌شدگی خاک و روانگرایی بسیار شدید است. با وجود اینکه همین رفتار در تراز مشابه، در مدل‌های ۲ و ۳ نیز رخ داده است، اما دامنه‌ی شتاب تا سیکل هفتم کاهش نیافته است. مشاهده می‌شود که وجود ستون‌های سنگی منجر به تأخیر در فاز نرم‌شدگی خاک شده است، اما کاملاً از آن جلوگیری نکرده است. مدل ۳ در مقایسه با مدل ۲، به‌دلیل سختی بیشتر، افزایش دامنه‌ی بیشتری را تجربه کرده است. اثر افزایش سختی در اعماق سطحی‌تر بیشتر بوده است، به گونه‌ای که برای سطح، عمق ۱۰ و ۲۵ سانتی‌متری، به ترتیب مدل ۳ در حدود ۱۲، ۷، و ۵ درصد افزایش دامنه را نسبت به مدل ۲ تجربه کرده است.

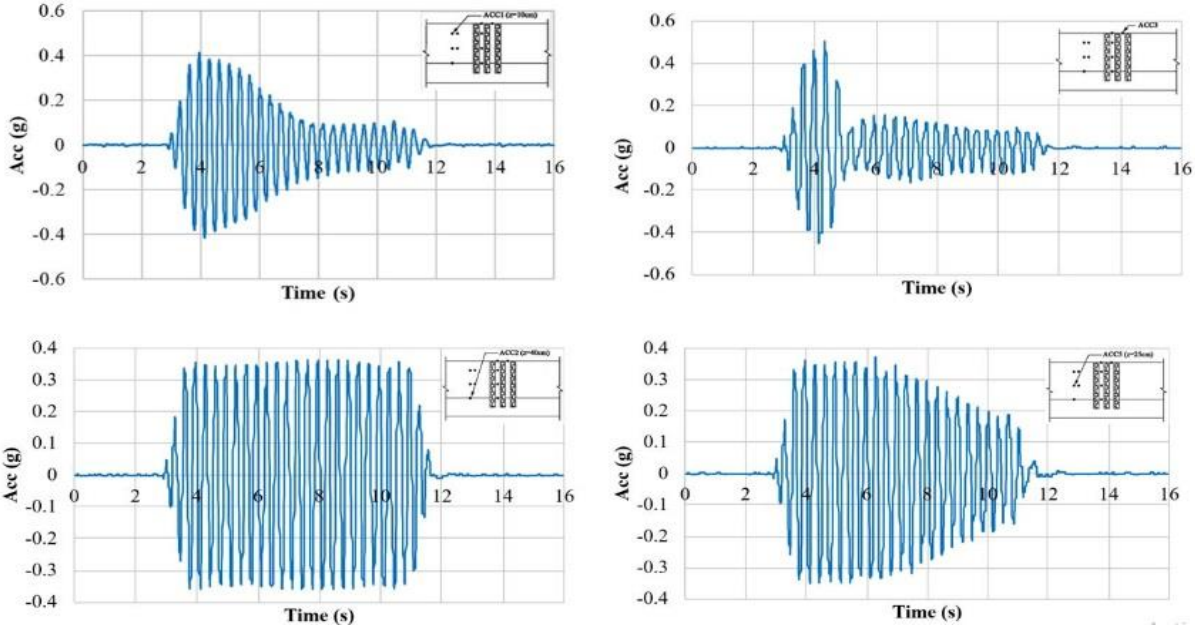
کاهش دامنه‌ی شتاب در نتیجه‌ی نرم‌شدگی خاک در مدل ۳ در مقایسه با مدل ۲، به‌تدریج و با تأخیر رخ داده است در حالی که کاهش مذکور در مدل ۲ زودتر اتفاق افتاده است. براساس نتایج مدل‌های ۳ و ۴، تسلیح تمام طول ستون سنگی در مقایسه با تسلیح بخش فوقانی، منجر به رفتار سخت‌تر مدل شده است.

۳.۷. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای

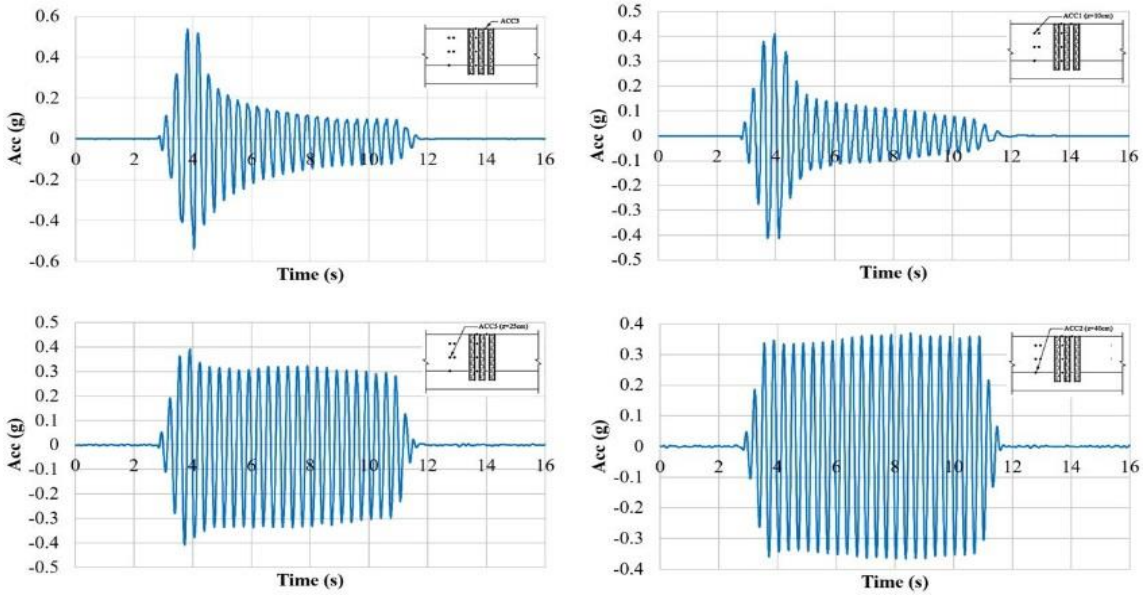
در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶، تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب منفذی ($r_u = \Delta u/\sigma'_{vo}$) برای ۴ مدل مشاهده می‌شود. یادآور می‌شود که Δu اضافه



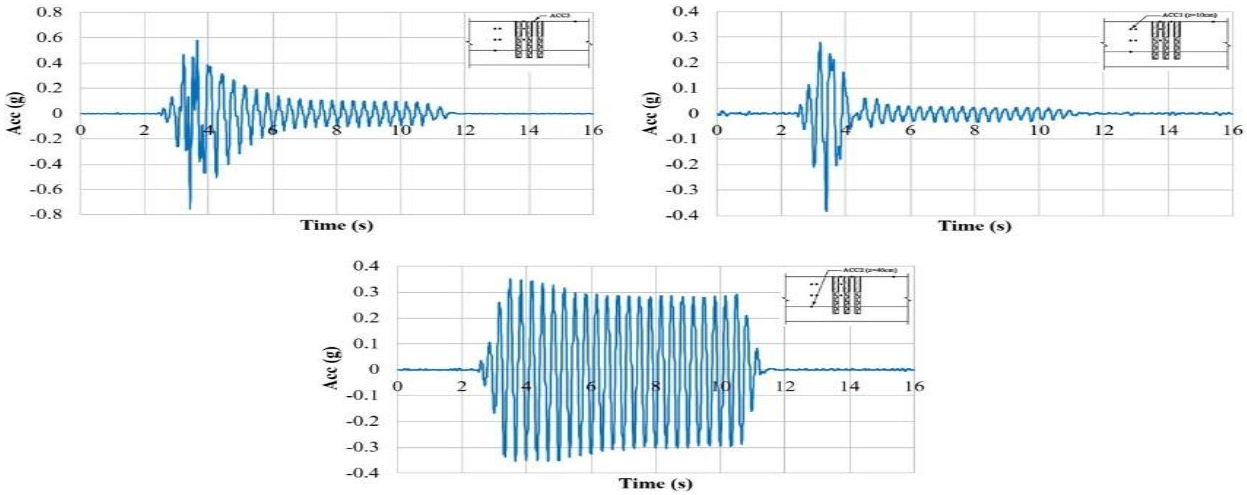
شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی شتاب افقی (مدل ۱).



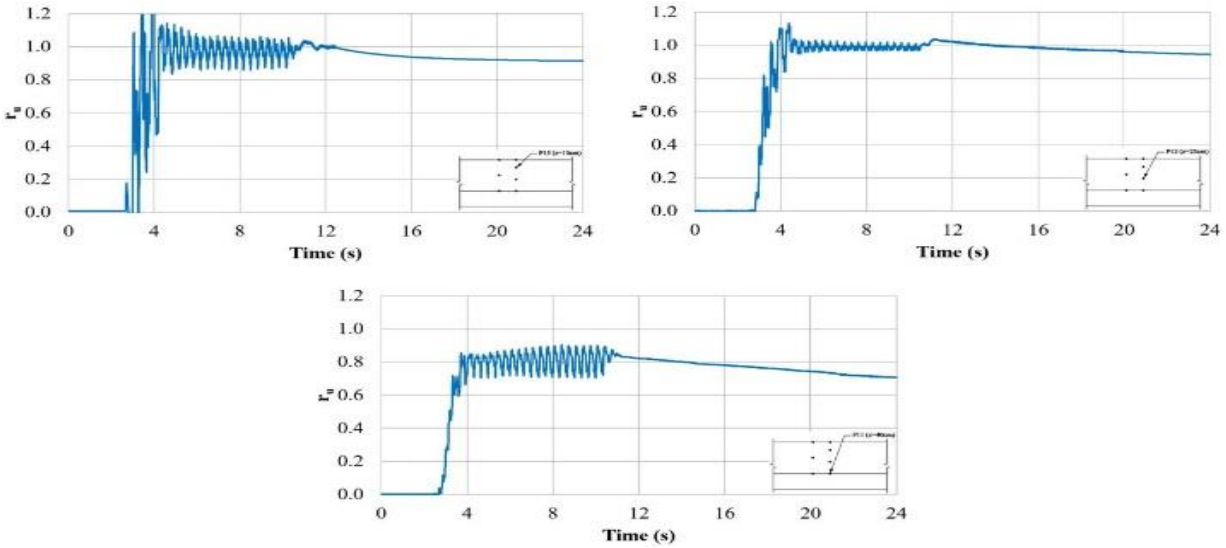
شکل ۱۰. تاریخچه‌ی زمانی شتاب افقی (مدل ۲).



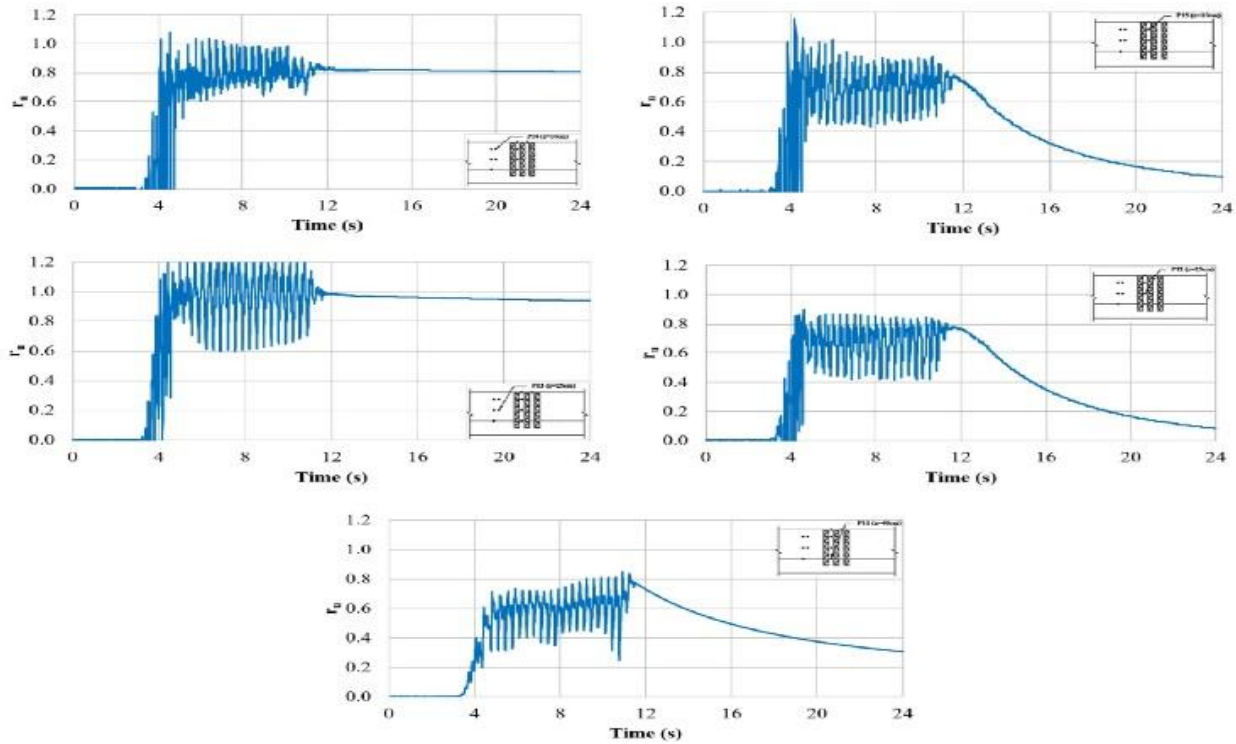
شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی شتاب (مدل ۳).



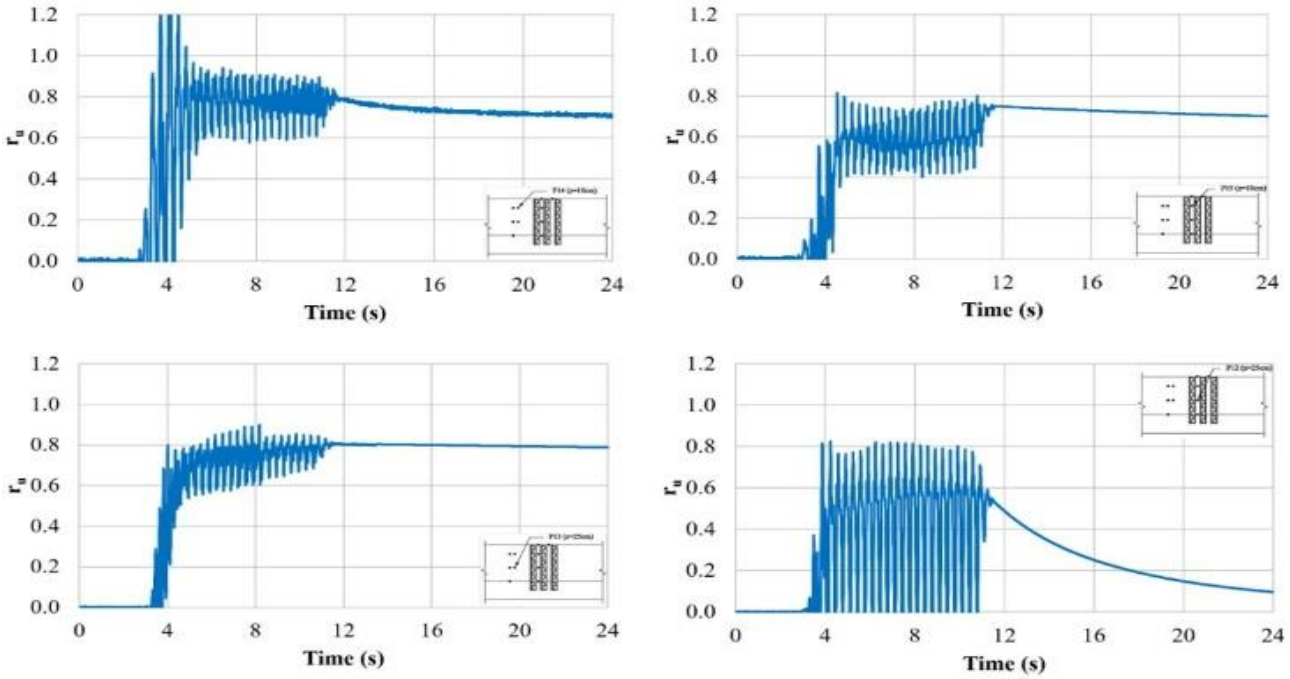
شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی شتاب (مدل ۴).



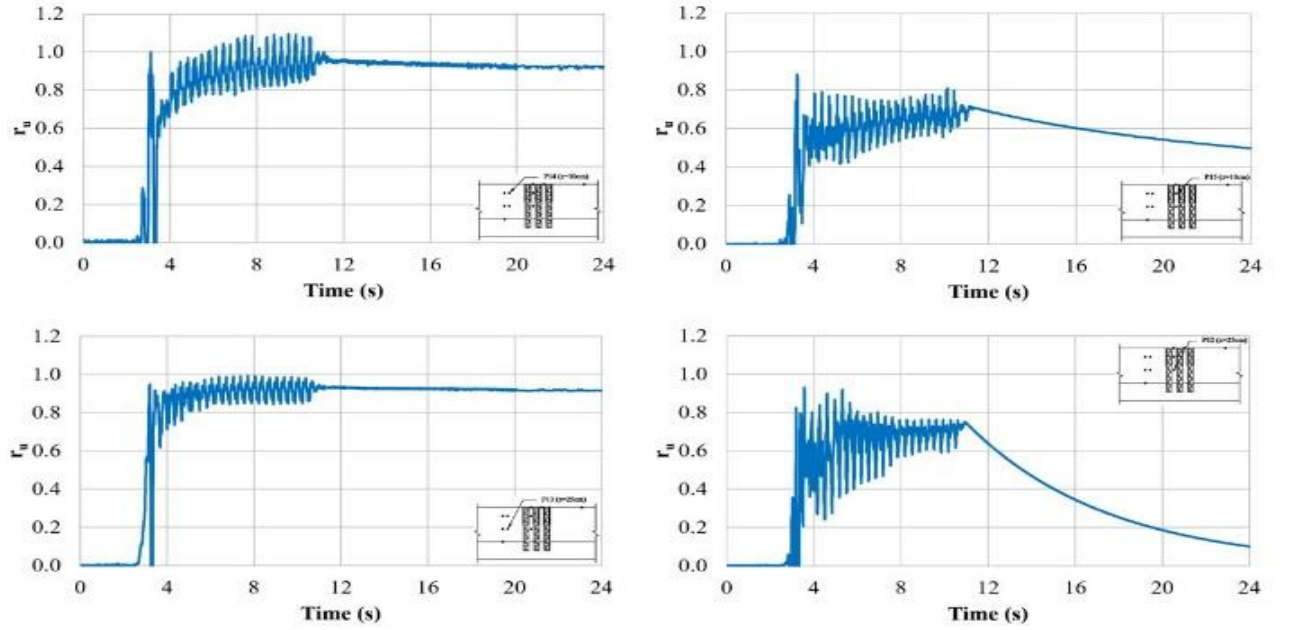
شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (مدل ۱).



شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (مدل ۲).



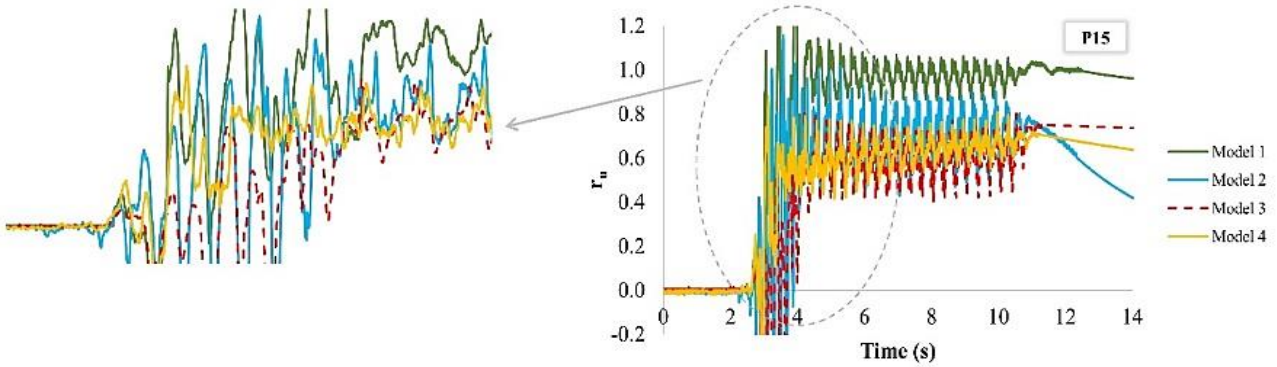
شکل ۱۵. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (مدل ۳).



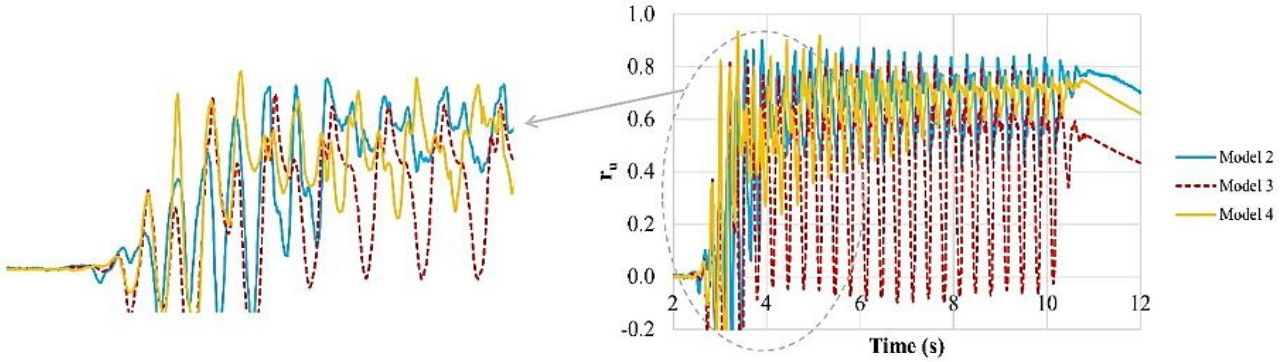
شکل ۱۶. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای (مدل ۴).

فشار آب منفذی و σ'_{vo} تنش مؤثر عمودی اولیه در موقعیت قرارگیری حسگر است. مقدار بیش از ۰/۹۵ برای r_u، نشانگر وقوع روانگرایی است.[۴۳] مطابق شکل ۱۳، P۱۲ و P۱۵ به ترتیب پس از ۲/۵ و ۱ سیکل از شروع تحریک، روانگرایی خاک را در میدان آزاد نشان داده‌اند.

با افزایش عمق، زمان لازم جهت دستیابی به ۹۵٪ اضافه فشار آب منفذی افزایش یافته است؛ که نشان می‌دهد روانگرایی ابتدا در مجاورت سطح رخ داده و سپس به سمت عمق پیش رفته است. مطابق شکل ۱۴، در منطقه‌ی بهسازی‌شده، هر چه حسگر به سطح مدل نزدیک‌تر بوده است، با سرعت کمتری زهکشی انجام شده است. با این حال، P۱۳ و P۱۴ تا حدی نرخ زوال مشابهی را نشان می‌دهند. علاوه‌بر این، مقایسه‌ی رکوردهای P۱۳ و P۱۲ و همچنین رکوردهای P۱۴ و P۱۵ نشان می‌دهند که ستون‌های سنگی، نرخ زوال اضافه فشار آب منفذی را سرعت بخشیده‌اند. پس از پایان تحریک، اضافه فشار آب منفذی در محدوده‌ی بهسازی‌شده (P۱۲ و P۱۵) به سرعت کاهش یافته است؛ که نشانگر اثربخشی ستون‌های سنگی در موارد غیردینامیکی، به معنای کاهش مؤثر روانگرایی ثانویه در نتیجه‌ی جریان آب پس از زلزله است. در حالی که برای مدت طولانی پس از اتمام تحریک، P۱۴ و P۱۳ همچنان وجود اضافه فشار آب منفذی را نشان می‌دهند. حتی اگر ستون‌های سنگی از وقوع روانگرایی جلوگیری نکنند، زمانی که خاک در حالت روانگرایی باقی می‌ماند، را کاهش می‌دهند. وجود ستون‌های سنگی منجر به افزایش مقاومت در برابر روانگرایی می‌شود. در نتیجه، در مقایسه با میدان آزاد، تعداد سیکل بیشتری جهت دستیابی به مقدار ۰/۹۵ برای r_u نیاز است. به‌عنوان مثال، با توجه به نتایج P۱۵ در شکل ۱۴، در حالی که روانگرایی پس از سه سیکل رخ داده است، فقط یک سیکل برای مدل ۱ در حسگر مرتبط کافی است. تسلیح ستون سنگی



شکل ۱۷. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق ۱۰ سانتی‌متری در مدل‌های ۱ الی ۴.



شکل ۱۸. تاریخچه‌ی زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در عمق ۲۵ سانتی‌متری در مدل‌های ۱ الی ۴.

توسط ژئوتکستایل می‌تواند از روانگرایی در P۱۵ جلوگیری کند. در مدل ۳، نسبت به مدل ۲، محدوده‌ی وسیع‌تری تحت اثر بهسازی و افزایش سختی قرار گرفته است، که این موضوع با مقایسه‌ی روند تغییرات P۱۳ در دو مدل اخیر مشهود است.

مطابق شکل‌های ۱۴ الی ۱۶، پس از اتمام تحریک، زوال اضافه فشار آب منفذی در ترازهای پایین‌تر در محدوده‌ی بهسازی‌شده با نرخ بیشتری رخ داده است. زیرا تخلیه از لایه‌های عمیق‌تر، زمان لازم برای شروع زهکشی لایه‌های سطحی‌تر را طولانی‌تر می‌کند، لذا می‌توان استدلال کرد که حسگرهای عمیق‌تر از تمام ظرفیت زهکش استفاده می‌کنند و لایه‌های سطحی‌تر باید تا آزادشدن مسیر زهکشی منتظر بمانند. در لایه‌های سطحی‌تر، آب در عوض حرکت به سمت زهکش، به حرکت خود از میان سطح ادامه می‌دهد. برخی مطالعات،[۳۳ و ۴۲] نیز روند مشابهی را گزارش کرده‌اند. در مدل ۴ در مقایسه با مدل ۳، لایه‌های سطحی محدوده‌ی بهسازی‌نشده (P۱۴)، مدت زمان بیشتری در حالت روانگرایی باقی مانده‌اند. مقایسه‌ی شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهد که تسلیح تمام طول ستون‌های سنگی در مقایسه با تسلیح بخش فوقانی، سبب رفتار سخت‌تر مدل شده است. با تسلیح ستون سنگی توسط ژئوتکستایل، بیشینه‌ی مقدار r_u در اعماق ۱۰ و ۲۵ سانتی‌متری محدوده‌ی بهسازی‌شده، به ترتیب در حدود ۳۰ و ۸ درصد نسبت به ستون سنگی سنتی کاهش یافته است. بنابراین، اثر افزایش سختی مسلح‌کننده در اعماق سطحی‌تر بیشتر بوده است. مطابق شکل ۱۴، مقایسه‌ی رکوردهای P۱۳ و P۱۲ نشان می‌دهد که در مدل ۲، بیشینه‌ی مقدار r_u در محدوده‌ی داخل گروه ستون سنگی در حدود ۳۳٪ کمتر از مقدار متناظر در محدوده‌ی بهسازی‌نشده بوده است. در حالی که مطابق شکل ۱۵، با تسلیح ستون سنگی، مقدار کاهش صورت‌گرفته در حدود ۸٪ بوده است. این موضوع با توجه به عدم روانگرایی در عمق ۲۵ سانتی‌متری در مدل ۳ نشان می‌دهد که تسلیح ستون سنگی، ناحیه‌ی وسیع‌تری در اطراف گروه را تحت اثر افزایش سختی قرار داده است. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، در شروع تحریک، تغییرات r_u در عمق ۱۰ سانتی‌متری در مدل‌های ۱ و ۳ به ترتیب بیشترین و کمترین نرخ افزایش را در میان تمام مدل‌ها داشته‌اند. در حالی که نرخ تغییرات در مدل‌های ۲ و ۴، تقریباً مشابه بوده است. با توجه به شکل ۱۸، در عمق ۲۵ سانتی‌متری، مشابه عمق ۱۰ سانتی‌متری، نرخ تغییرات r_u در مدل‌های ۲ و ۴ همچنان برابر و بالاتر از نرخ تغییرات در مدل ۳ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت نرخ تغییرات r_u در مدل‌ها، در عمق ۲۵ سانتی‌متری بسیار کمتر از عمق ۱۰ سانتی‌متری بوده است.

۸. نتیجه‌گیری

یافته‌های اصلی مطالعه‌ی حاضر به این شرح هستند:

۱. وجود ستون‌های سنگی، مقاومت در برابر روانگرایی را افزایش می‌دهند، به گونه‌ای که نسبت به میدان آزاد (۱ سیکل)، تعداد سیکل‌های بیشتری (۳ سیکل) برای دستیابی به مقدار بیش از ۰/۹۵ برای پارامتر r_u نیاز است.

۲. تسلیح ستون‌های سنگی، بیشترین تأثیر را در لایه‌های سطحی دارد. در ترازهایی که حتی وجود ستون سنگی سنتی از وقوع روانگرایی جلوگیری نکرده است.

۳. ساخت ستون‌های سنگی به‌طور قابل‌توجهی مقاومت رسوب‌های ماسه‌ای سُست را در برابر روانگرایی افزایش می‌دهد. علاوه‌بر این، محصورکردن ستون‌های سنگی با ژئوتکستایل نیز این مقاومت را بیش از پیش افزایش می‌دهد. در مطالعه‌ی حاضر، در یک عمق مشخص، با اجرای گروه ستون‌های سنگی،

تعداد سیکل لازم برای شروع روانگرایی از ۱ سیکل به ۳ سیکل نسبت به میدان آزاد افزایش یافته است. در حالی استفاده از روکش ژئوتکستایل برای تمام ستون‌های سنگی، از روانگرایی در همان عمق جلوگیری کرده است.

۴. عملکرد ستون‌های سنگی روکش‌شده توسط ژئوتکستایل، به‌دلیل جلوگیری از آلودگی ستون ناشی از گرفتگی و همچنین تأمین محصورکنندگی کافی، بسیار مؤثرتر از ستون‌های سنگی سنتی بوده است.

۵. تسلیح تمام طول ستون‌های سنگی توسط ژئوتکستایل، از نقطه‌نظر کاهش نرخ و مقدار اضافه فشار آب منفذی، بهترین عملکرد را جهت جلوگیری از روانگرایی داشته است. به گونه‌ای که با تسلیح ستون سنگی، بیشینه‌ی مقدار r_u تا ۳۰٪ در سطح و تا ۸٪ در عمق نسبت به ستون سنگی سنتی کاهش داشته است.

۶. در صورت وجود ستون‌های سنگی سنتی/ مسلح، نرخ اتلاف اضافه‌فشار آب منفذی در اعماق پایین‌تر بیشتر بوده است. می‌توان گفت سیال در اعماق پایین‌تر از تمام ظرفیت ستون‌های زهکش استفاده می‌کند و آب در لایه‌های سطحی‌تر باید تا فراهم‌آمدن امکان زهکشی منتظر بماند.

۷. با تسلیح ستون سنگی توسط ژئوتکستایل، که منجر به افزایش سختی می‌شود، اعماق سطحی‌تر که تنش همه‌جانبه‌ی بسیار کمی دارند، در برابر روانگرایی مقاومت می‌کنند. اثر این افزایش سختی حتی در خارج محدوده‌ی بهسازی‌شده هم مشاهده می‌شود. به گونه‌ای که با وجود عدم وقوع روانگرایی در عمق ۲۵ سانتی‌متری، همچنان بیشینه‌ی مقدار r_u در محدوده‌ی بهسازی‌شده توسط گروه ستون‌های سنگی مسلح، حدود ۸٪ کمتر از خارج محدوده‌ی بهسازی بوده است.

References- منابع

1. Pakbaz, H. and Pirmoradian, M., 2012. Investigation on the quality of rainfall-induced runoffs in watersheds. Proceedings of the First Conference on Iran's Reservoirs [In Persian]. https://ircsa.ir/files/site1/maghalate_hamayesh/50.pdf
2. Ardeshir, A., 2016. Management of surface water collection system and urban flood control. AmirKabir University of Technology Publications, First Edition, page 230 [In Persian]. http://publication.aut.ac.ir/fa/book/show/5192
3. Wang, Y., 2015. A diagnostic decision support system for selecting best management practices in urban/suburban watersheds. Ph.D. thesis, University of Maryland, 301 P.
4. Helmrich, A., Markolf, S., Li, R., Carvalhaes, T., Kim, Y., Bondank, E., Natarajan, M., Ahmad, N. and Chester, M., 2021. Centralization and decentralization for resilient infrastructure and complexity. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, *1*(2), p. 021001. https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac0a4f
5. Taylor, A. and Wong, T., 2002. Non-structural stormwater quality best management practices – an Overview of their use, value, cost and evaluation. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Technical Report 02/11.
6. NZWERF, 2004. On-site stormwater management guideline. *New Zealand Water Environment Research Foundation*.
7. Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S. and Viklander, M. 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, *12*(7), pp. 525-542. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314
8. Seo, M., Jaber, F., Srinivasan, R. and Jeong, J., 2017. Evaluating the Impact of Low Impact Development (LID) Practices on Water Quantity and Quality under Different Development Designs Using SWAT. *Water*, *9*(3), p. 193. https://doi.org/10.3390/w9030193
9. Michael, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, SB. and Djordjevic, S., 2004. Potential and limitations of LID modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, *299*(3-4), pp. 284-299. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.014
10. Chen , J., Liu, Y., Gitau, M. W.,Engel, B. A., Flanagan, D.C. and Harbor, J. M., 2019. Evaluation of the effectiveness of green infrastructure on hydrology and water quality in a combined sewer overflow community. *Science of the Total Environment*, *665*, pp. 69-79. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.416
11. Reid, M., 1982. Lessons of history in the design and acceptance of rainwater cistern systems. In: Proceedings of the International Conference on Rainwater Catchment Systems, F.N. Fujimura (Editor). International Rainwater Catchment Systems Association, Honolulu, Hawaii, pp. 1-8.
12. Glendenning, C.J. and Vervoort, R.W., 2010. Hydrological impacts of rainwater harvesting (RWH) in a case study catchment: The Arvari River, Rajasthan, India. Part 1: Field-Scale Impacts. *Agricultural Water Management* *98*(2), pp. 331-340. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.09.003
13. Herrmann T. and Schmida, U., 1999. Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water*

1(4), pp. 307-316. https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00024-8

14. Nolde, E., 2007. Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination*, *215*(1-3), pp. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.033

15. Furumai, H., 2008. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Physics and Chemistry of the Earth*, *33*(5), pp. 340-346. https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.029

16. https://santacruzpermaculture.com/2019/06/rainwater-harvesting-tanks-cisterns/

17. Hosseini, S. H., 2015. Utilizing low-impact development (LID) method in urban runoff management to reduce urban costs with an emphasis on tehran. International Conference on Advances in Civil Engineering, Architecture, Environmental Engineering, and Urban Management, Tehran, https://civilica.com/doc/389566 CAECONF01_033 [In Persian].

18. Barrett, M., 2015. *International low impact development conference 2015*. American Society of Civil Engineers/ASCE. http://dx.doi.org/10.1061/9780784479025

19. Steffen J., Jensen, M., Pomeroy, C. A., Burian, S. J., 2013. Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in U.S. cities. *Journal of the American Water Resources Association*, *49* (4), pp. 810-824. http://dx.doi.org/10.1111/jawr.12038

20. Lye, D.J., 1992. Microbiology of rainwater cistern systems: A review: (Cistern, Rainwater, Microorganisms). *Journal of Environmental Science & Health Part A*, *27*(8), pp.2123-2166. https://doi.org/10.1080/10934529209375845

21. https://www.usace.army.mil/Media/Images/igphoto/2000758566/

22. Alyaseri, I., Zhou, J., 2016. Stormwater volume reductionin combined sewer using permeable pavement: city of St. Louis. *Journal of Environmental Engineering*, *142* (4), p.04016002, https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001056

23. Selbig, W.R., Buer, N. and Danz, M.E., 2019. Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems. *Journal of Environmental Management*. *1*(251), p. 109510. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109510

24. Cheng, Y. Y., Lo, S. L., Ho, C. C., Lin, J. Y. and Yu, S. L., 2019. Field testing of porous pavement performance on runoff and temperature control in Taipei city. *Water*, *11* (12), p. 2635, https://doi.org/10.3390/w11122635

25. Stagge, J. H., Davis, A. P., Jamil, E. and Kim, H., 2012. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. *Water Research*, *46*(20), pp. 6731-6742. https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.037

26. Gavrić, S., Leonhardt, G., Marsalek, J. and Viklander, M., 2019. Processes improving urban stormwater quality in grass swales and filter strips: A review of research findings. *Science of the Total Environment*, *669*, 431-447. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.072

27. MDE, Maryland Department of the Environment, 2009. 2000 Maryland stormwater design manual Volumes I & II.

28. NHDES (New Hampshire Department of Environmental Services), 2011. Pollutant removal efficiencies for best management practices for use in pollutant loading analysis.

29. Birch, G. F., Fazeli, M. S. and Matthai, C. 2005. Efficiency of an infiltration basin in removing contaminants from urban stormwater. *Environmental Monitoring and Assessment*,101, pp. 23–38. https://doi.org/10.1080/15730620600855894

30. Lee, J. G., Borst, M., Brown, R. A., Rossman, L. and Simon, M. A., 2014. Modeling the hydrologic processes of a permeable pavement system. *Journal of Hydrologic Engineering*, *20* (5), p. 04014070. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001088

31. https://wiki.sustainabletechnologies.ca/wiki/Infiltration_Trench:_Life_Cycle_Costs

32. Kratky, H., Li, Z., Chen, Y., Wang, C., Li, X. and Yu, T., 2017. A critical literature review of bioretention research for stormwater management in cold climate and future research recommendations. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *11*, pp.1-15. http://dx.doi.org/10.1007/s11783-017-0982-y

33. https://www.deeproot.com/blog/blog-entries/3-questions-about-bioretention-soils-and-infiltration/

34. Damodaram, Chandana, Marcio H. Giacomoni, C. Prakash Khedun, Hillary Holmes, Andrea Ryan, William Saour, and Emily M. Zechman, 2010. Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management 1, *Journal of the American Water Resources Association*, *46*(5), pp. 907-918. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00462.x

35. Mahab Qhods Consulting Engineering Company (2011). Comprehensive plan for surface water Management in Tehran, Volume Eight, Modern Approach (LID/BMP Techniques). Technical and Engineering Consultancy Organization of Tehran Municipality, Technical and Civil Deputy [In Persian].

36. Tang, S., Jia, Z., Xu, Q., Luo, W. and Shan, Z., 2020. Examining the first flush effect based on the relationship between concentrations and discharge rates in a rain garden inflow. *Desalination and Water Treatment*, *180*, pp.174-184. https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25080

37. Vijayaraghavan, K., Kumar Biswal, B., Adam, M. G., Hong Soh, H., Lee Tsen-Tieng, D., Davis, A. P., Chew, S., H., Tan, P.Y., Babovic, V. and Balasubramanian, R., 2021. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects, *Journal of Environmental Management*, *292*, p. 112766. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766

38. Hsieh, C. h., Davis and A. P., 2005. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff. *Journal of Environmental Engineering*, *131* (11), pp. 1521–1531. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:11(1521)

39. Fassman-Beck, E., Wang, S., Simcock, R. and Liu, R., 2015. Assessing the effects of bioretention's engineered media composition and compaction on hydraulic conductivity and water holding capacity. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, *1* (4), p. 04015003. https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000799

40. Hunt, W. F., Hathaway, J. M., Winston, R. J. and Jadlocki, S. J., 2010. Runoff volume reduction by a level spreader-vegetated filter strip system in suburban Charlotte, *Journal of Hydrologic Engineering*, *15* (6), pp. 499–503. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000160

41. Roy-Poirier, A., Champagne, P. and Filion, Y., 2010. Review of bioretention system research and design: past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering* *136* (9), 878–889. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000227

42. Goh, H. W., Lem, K. S., Azizan, N. A., Chang, C. K., Talei, A., Leow, C. S., Zakaria, N. A., 2019. A review of bioretention components and nutrient removal under different climates—future directions for tropics. *Environmental Science and Pollution Research*. *26* (15), pp. 14904–14919. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05041-0

43. Vijayaraghavan, K., Kumar Biswal, B., Adam, M. G., Hong Soh, H., Lee Tsen-Tieng, D., Davis, A. P., Chew, S., H., Tan, P.Y., Babovic, V. and Balasubramanian, R., 2021. Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects, *Journal of Environmental Management*, *292*, p.112766. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766

44. Wang, J., Chua, L. H. C. and Shanahan, P., 2017a. Evaluation of pollutant removal efficiency of a bioretention basin and implications for stormwater management in tropical cities. *Water Research and Technology*, *3*(1), 78–91. https://doi.org/10.1039/C6EW00285D

45. https://www.wake.gov/departments-government/water-quality-programs/watershed-management-erosion-sedimentation-control-floodplain-and-stormwater-management/stormwater-plan-review-and-permitting/stormwater-control-measures

46. Livingston, E. H., Shaver, E., Skupien, J. J., Horner, R. R., 1997. Operation, maintenance, and management of stormwater management systems. Watershed Management Institute, Inc; August 1997. https://stormwater.ucf.edu/wp-content/uploads/2014/09/stormwaterOMM.pdf

47. Fortunato , C., McDonough, O. and Chambers, R., 2012. The effectiveness of dry and wet stormwater detention basins as sediment and nutrient processors. In: *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges*. pp. 1-12. https://doi.org/10.1061/40763(178)98

48. Ivanovsky, A., Belles, A., Criquet, J., Dumoulin, D., Noble, P., Alary, C. and Billon, G., 2018. Assessment of the treatment efficiency of an urban stormwater pond and its impact on the natural downstream watercourse. *Journal of Environmental Management*, *226* (1), pp. 120-130. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.015

49. Nayeb Yazdi, Scott, D., Sample, D. J. and Wang, X., 2021. Efficacy of a retention pond in treating stormwater nutrients and sediment. *Journal of Cleaner Production*, 290, p. 125787. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125787

50. Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, Ch., Bray, R. and Shaffer, P., 2007. The SUDS manual (C697). CIRIA. http://www.scotsnet.org.uk/documents/NRDG/CIRIA-report-C753-the-SuDS-manual-v6.pdf

51. Vishwakarma, S. and Dharmendra, D., 2024. Evaluating domestic wastewater treatment efficiency of field scale hybrid flow constructed wetland in series. *Pollution*, *10* (1), pp. 392-403. https://doi.org/10.22059/POLL.2023.364339.2041

52. https://waterprojectsonline/custom_case_study/clifton-icw-2022/

53. Shafique, M., Kim, R. and Lee, D., 2016. The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas. *Nature Environment and Pollution Technology*, *15*, pp. 715– https://doi.org/719. 10.1111/j.1747-6593.2009.00174.x

54. Morgan, S., Celik, S. and Retzlaff, W., 2012. Green roof storm-water runoff quantity and quality. *Journal of*

Environmental Engineering. *139*, pp. 471–478. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000589)

55. Getter, K.L., Rowe, D.B. and Andresen, J.A., 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*. *31*, pp. 225–231. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004

56. Vijayaraghavan K., 2016. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. *57*, pp. 740–52. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119

57. Shafique, M., Kim, R. and Kyung-Ho, K., 2018. Green Roof for Stormwater Management in a Highly Urbanized Area: The Case of Seoul, Korea. *Sustainability*, *10*, p. 584; https://doi.org/10.3390/su10030584

58. Stovin, V., Vesuviano, G. and Kasmin, H., 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*. *414*, pp. 148–161. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022

59. Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Wong, T. and Binning, P. J., 2015. Determining the extent of groundwater interference on the performance of infiltration trenches. *Journal of Hydrology*, *529*, pp. 1360 –1372. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.047

60. Copeland, C., 2016. Green Infrastructure and Issues in Managing Urban Stormwater. Congressional Research Service 7-5700 R43131. www.crs.gov

61. EPA, 2017. Clean Water Act Methods Update Rule for the Analysis of Effluent. U.S. Environmental Protection Agency (EPA-HQ-OW-2014-0797, FRL-9957-24-OW).

62. Marks, A. A. C., 2014. Stormwater management in Boston: to what extent are demonstration projects likely to enable citywide use of green infrastructure? (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

63. Kayhanian, M. and Stenstrom, M. K., 2005. Mass loading of first flush pollutants with treatment strategy simulations. *Transportation Research Record*, *1904*, pp. 133–143. https://doi.org/10.3141/1904-14

64. Pati, A. and Sahoo, B., 2022. Effect of Low-Impact Development Scenarios on Pluvial Flood Susceptibility in a Scantily Gauged Urban–Peri-Urban Catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, *27*(1), p. 05021034. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002147

65. Ontario Ministry of Environment, 2003. Stormwater Management Planning and Design Manual.

66. Roseen, R. M., Ballestero, T. P., Houle, J. J., Avellaneda, P., Briggs, J., Fowler, G. and Wildey, R., 2009. Seasonal performance variations for storm-water management systems in cold climate conditions. *Journal of Environmental Engineering*, *135*(3), pp. 128-137.

https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(128)

67. EU, 2016. The EU floods directive. http://ec.europa.eu/environment/water/ï,ood_risk/implem.html

68. Maigne, J., 2006. Sustainable management of ‘alternative techniques’ in stormwater purification. École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF - National School of Rural Water and Forestry Engineering). Centre de Montpellier, France. https://www.agroparistech.fr/IMG/doc/Version_finale_anglais_Maigne.doc

69. OIEau, 2014. Centre National de Formation aux Métiers de l’Eau (CNFME) e De nouvelles plates-formes pédagogiques dédiées à la gestion intégrée des eauxpluviales (in French). http://www.oieau.fr/oieau/notre-actualite-et-avancement-de/article/cnfme-de-nouvelles-plates-formes?lang¼fr

70. Schuetze, T. and Chelleri, L., 2013. Integrating decentralized rainwater management in urban planning and design: flood resilient and sustainable water management using the example of coastal cities in The Netherlands and Taiwan. *Water*, 5, pp. 593-616. https://doi.org/10.3390/w5020593

71. Jeong, H., Kim, H., Teodosio, B., Ramirez, R. and Ahn, J., 2015. A review of test beds and performance criteria for permeable pavements. In: Chang, et al. (Eds.), *Advances in Civil Engineering and Building Materials IV*. Taylor and Francis, London. https://doi.org/10.1201/b18415-58

72. ARSI, 2016. Association for rainwater storage and infiltration technology, Japan, Membership. http://arsit.or.jp/membership_list

73. Imbe, M., 2013. Stormwater treatment from the road in Japan. In: Regional Workshop on Eco-Efficient Water Infrastructure towards Sustainable Urban Development and Green Economy in Asia and the Pacific, 12-13 December 2013, Bangkok, Thailand.

http://www.unescap.org/sites/default/files/3.2%20Japan_Imbe.pdf

74. Lee, J. G., Selvakumar, A., Alvi, Kh., Riverson, J., Zhen, J.X., Shoemaker, L. and Lai, F., 2012. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Environmental Modelling and Software*, *37*, pp. 6-18. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.04.011

75. Mosleh, L. and Negahban-Azar, M., 2021. Role of models in the decision-making process in integrated urban water management: a review. *Water*, *13*(9), p.1252. https://doi.org/10.3390/w13091252

76. Jia, H. F., Lu, Y. W., Zhen, X. and Yu, S. L., 2012. Planning of LID-BMPs for urban runoff control: the case of Beijing Olympic village. *Separation and Purification Technology*, *84*, pp. 112–119.

https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.026

77. Shoemaker, L., Riverson, J., Khalid, A., Zhen, J., Sabu, P. and Rafi, T., 2009. SUSTAIN, a framework for placement of best management practices in urban watersheds to protect water quality. Report EPA/600/R-09/095, USEPA, Washington, DC, USA.

https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/sustain_complex_tools.pdf

78. Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S.L., Zhen, J.X. and Lu, Y., 2013. Development of a multi-criteria index ranking system for urban runoff best management practices (BMPs) selection. *Environmental Monitoring and Assessment*. *185*, pp. 7915–793. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3144-0

79. Zoppou, C. 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling and Software*, *16*(3), pp. 195–231. https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0

80. Holt, E., Koivusalo, H., Korkealaakso, J., Sillanpää, N. and Wendling, L., 2018. Filtration systems for stormwater quantity and quality management, Guideline for Finnish implementation. *VTT technical Research Centre of Finland Ltd*, p. 95.

81. Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Setälä, H. and Koivusalo, H. 2014. Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. *512*, pp. 482–497. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.013

82. ForutanDanesh, 2021. Quantity and quality evaluation of urban runoff based on best management practices low-impact development (BMPs/LID) in gorgan. Ph.D thesis of watershed management. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University Faculty of Natural Resources, [in Persian].

83. Choi, Sumin, Seongsim Yoon, Byongju Lee, and Youngjean Choi, 2015. Evaluation of high-resolution QPE data for urban runoff analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*. *48*(9), pp. 719-728. https://doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.9.719

84. Kim, J., Lee, J., Song, Y., Han, H. and Joo, J., 2018. Modeling the runoff reduction effect of low impact development installations in an industrial area, South Korea. *Water*, *10* (8), p. 967. https://doi.org/10.3390/w10080967

85. Kamali, M., Tajrishi, M. and Nazari Alavi, A., 2012. Investigation of surface runoff characteristics in Tehran. https://civilica.com/doc/166096.ICCE09_1029 [In Persian].

86. Taghizadeh, S., 2017. Performance evaluation and optimization of innovative management methods (LID-BMP) in improving the quality and quantity of surface runoff in Tehran: case study of region 22. Master's Thesis, University of Qom [In Persian]. https://sid.ir/paper/381460/fa

87. Rajabnezhad, M., 2017. Utilizing innovative methods (LID-BMPs) in urban runoff management with a focus on pollution reduction. Master's Thesis, University of Qom [In Persian]. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9208bd2d9ddda5875cde861d60a7a627

88. Binesh, 2015. Investigating the effect of applying the best management practices on the quantity and quality of urbun stormwater. Third National Conference on Flood Management and Engineering with Urban Floods Approach [in Persian].

89. Movahedinyia, M., Vali Samani, J. M. and Barakhshi, F., 2017. Investigating the effect of low-impact development (LID) rain barrel method on reducing urban flooding. *Water and Irrigation Management*, *7*(1), pp. 1-16. [InPersian]

https://doi.org/10.22059/jwim.2017.63736

90. Arjenaki, M. O., Sanayei, H. R. Z., Heidarzadeh, H. and Mahabadi, N. A., 2021. Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City). *Modeling Earth Systems and Environment*, *7*(1), pp. 1-16. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00870-2

91. Nazari, A., Roozbahani, A. and Hashemy Shahdanu, S.M., 2023. Integrated SUSTAIN-SWMM-MCDM approach for optimal selection of LID practices in urbun stormwater systems. *Water Resource Management*, *37*, pp. 3769-3793. https://doi.org/10.1007/s11269-023-03526-9

92. Naeimi, G., 1394. Integrated storm water and groundwater management, a case study: Isfahan metropolis. Master thesis, Isfahn Industrial University, Civil Engineering Faculty, [in Persian].

93. Valipour, J., 2018. Designing Permeable Pavement and Urban Runoff Management (case study: Khorramabad City). Master thesis of Urban Design, Payam Noor University, East Tehran Branch [in Persian].

94. Ahmadi, H., 2023. Optimization of runoff management using metaheuristic algorithm. Master thesis of Business Managemen, Mashhad University [in Persian]