

بررسی همبستگی بین عدد اس پی تی، سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای شمال ایران

محمد هادی هاتفی، مهیار عربانی*، مقداد پایان، پیام زنگانه رنجبر، حسن احمدی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

سرعت موج برشی V_s و مدول برشی کرنش کوچک G_{max} ، از مهم ترین پارامترها برای تعیین خصوصیات لرزه ای یک ساختمان هستند. اگرچه چندین آزمایش میدانی برای اندازه گیری این دو پارامتر وجود دارند، اما انجام آن ها به علت پیچیدگی و هزینه بالا، همیشه بسادگی امکان پذیر نیست. از این رو، اندازه گیری V_s و G_{max} به طور غیرمستقیم و از طریق معادلات تجربی مرتبط با عدد SPT حائز اهمیت است. با توجه به قرار گیری مناطق شمالی ایران در منطقه لرزه خیز و توسعه سریع ساخت و ساز در آن، در این پژوهش برای اولین بار با انجام آزمایش های صحرایی (نفوذ استاندارد و درون چاهی) و با حفر ۱۱ گمانه، روابط همبستگی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و با مدول برشی کرنش کوچک برای سه نوع خاک رسی، ماسه ای و سیلتی برای این منطقه ارائه گردیدند. نتایج با استفاده از داده های ۳ گمانه در بخش دیگری از ناحیه شمالی ایران صحت سنجی شدند. براساس روابط همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک، میزان تاثیرپذیری مدول برشی کرنش کوچک، با تغییر وزن مخصوص لایه های خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان دادند که همبستگی خوبی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک وجود دارد. همچنین مشاهده شد حساسیت خاک های رسی نسبت به تغییرات وزن مخصوص هر لایه بیش از دو نوع خاک ماسه ای و سیلتی بوده و در تعیین روابط همبستگی برای خاک های رسی باید به وزن مخصوص خاک هر لایه توجه ویژه شود.

کلمات کلیدی

امواج لرزه ای، آزمایش نفوذ استاندارد، آزمایش درون چاهی، مدول برشی کرنش کوچک، شمال ایران

۱- مقدمه

تعیین سرعت امواج لرزه ای^۱ و مدول برشی کرنش کوچک^۲ در مهندسی عمران، به دلیل کاربرد آن ها در تحلیل لرزه ای سازه ها از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند [۱-۳]. با توجه به هزینه نسبتاً بالا و تجهیزات دقیق مورد نیاز برای انجام آزمایش های ژئوفیزیک، محققان همواره در تلاش بوده اند که رابطه ای بین سرعت امواج لرزه ای و مدول برشی کرنش کوچک با آزمایش های میدانی ساده مانند آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)^۳ برقرار کنند تا به کمک آن بتوانند مقادیر مورد نظر را بدون انجام آزمایش های ژئوفیزیکی تعیین نمایند. آزمایش SPT یکی از قدیمی ترین و متداول ترین آزمایش های صحرایی ژئوتکنیک است که از نتایج آن برای بدست آوردن پارامترهای مختلف خاک استفاده می شود. محققین روابط مختلفی برای همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی^۴ بخصوص برای مناطق زلزله خیز ارائه کردند. اکثر روابط ارائه شده توسط محققین، دارای یک تابع توانی^۵ $V_s = XN^Y$ بوده و ضرایب X و Y بر شکل تابع تجربی حاکم است. در بیشتر این روابط از عدد SPT اصلاح نشده استفاده شده است اما در برخی روابط مقدار اصلاح شده عدد SPT نیز بکار گرفته شده است [۴-۶]. روابط مربوط به خاک های رسی که توسط سایر محققین ارائه شده در جدول یک درج شده است. در این روابط ضریب رابطه همبستگی (X) از ۲۷ تا ۱۳۲ و توان آن (Y) از ۰/۲۳ تا ۰/۷۳ متغیر است. برای خاک های ماسه ای روابط

¹ Seismic waves velocity

² Small strain shear modulus (G_{max})

³ Standard penetration test

⁴ Shear wave velocity

⁵ Power function

بیشتری توسط محققین ارائه شده است که بجز روابط ارائه شده توسط فومل و تنسلی [۷] و کایابالی [۸] که شکل متفاوتی نسبت به سایر روابط دارند، این روابط دارای قانون توان پایه می باشند. در خاک‌های ماسه‌ای ضریب رابطه همبستگی SPT از ۳۱/۷ تا ۱۶۲ و توان از ۰/۱۷ تا ۰/۵۵ متغیر است. روابط مشابهی برای سیلت‌ها ارائه شده که دامنه تغییرات ضریب رابطه همبستگی عدد SPT از ۲۲ تا ۱۰۵/۶۴ و توان از ۰/۳۱۹ تا ۰/۷۷ متغیر است. همچنین بعضی از روابط برای همه خاک‌ها ارائه شده است که در آن‌ها ضریب عدد SPT از ۷۱/۲ تا ۱۰۴/۷۹ و توان از ۰/۲۶ تا ۰/۴۴ متغیر است. چترایی و همکاران [۹] با بررسی ۲۲ گمانه خط ۲ مترو اصفهان واقع در کشور ایران برای خاک‌های رسی و ماسه‌ای روابط همبستگی بین عدد SPT و V_s ارائه کردند و پیشنهاد کردند که همبستگی‌های ارائه شده برای میکروزون‌بندی لرزه‌ای منطقه استفاده شوند. عباس و همکاران [۱۰] با بررسی روابط همبستگی بین عدد SPT و V_s به اهمیت کالیبراسیون ویژه ساختمان، تأثیر زمین‌شناسی، رفتار وابسته به عمق، کنترل کیفیت داده‌ها و ادغام داده‌های V_s با سایر روش‌های ژئوفیزیکی تأکید کردند. در مطالعه لیثی و شادمنان [۱۱] با استفاده از اطلاعات ۷ گمانه یک روش کاربردی مبتنی بر وارون سازی لرزه‌ای و امیدانس صوتی برای تخمین سرعت موج برشی در یک مخزن نفتی ماسه سنگی ارائه شد.

تنوع زیاد این روابط نمایانگر ویژگی‌های متمایزی است که خاک‌های مناطق مختلف دارند. در واقع محققین تلاش نموده اند تا با توجه به منطقه مورد مطالعه روابط مورد نیاز را تعیین و اصلاح کنند. در جدول ۱ روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی ارائه شده در مطالعات پیشین درج شده است.

جدول ۱: روابط ارائه شده برای همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی

نوع خاک	فرمول برای سرعت موج برشی (m/s)	مرجع
تمامی خاک‌ها	$V_S = 478/75 N^{379/10}$	Sil & Haloi (2017)
تمامی خاک‌ها	$V_S = 5/95 N^{345/10}$	Kirar et al. (2016)
تمامی خاک‌ها	$V_S = 63/78 N_1^{37/10}$	Chatterjee & Choudhury (2013)
تمامی خاک‌ها	$V_S = 75/90 N_{\rho}^{304/10}$	Maheshwari et al. (2010)
تمامی خاک‌ها	$V_S = 75/78 N_{\rho}^{40/10}$	Sitharam & Anbazhagan (2008)
تمامی خاک‌ها	$V_S = 79/107 N_{\rho}^{26/10}$	Hasancebi & Ulusay (2007)
تمامی خاک‌ها	$V_S = 2/71 N_{\rho}^{44/10}$	Iyisan (1996)
رس	$V_S = 70/26 N^{422/10}$	Daag et al. (2022)
رس	$V_S = 70/99 N^{335/10}$	Sil & Haloi (2017)
رس	$V_S = 4/94 N^{379/10}$	Kirar et al. (2016)
رس	$V_S = 0.3/78 N_1^{38/10}$	Chatterjee & Choudhury (2013)
رس	$V_S = 3/89 N^{358/10}$	Uma Maheswari et al. (2010)
رس	$V_S = 44 N^{48/10}$	Dikmen (2009)
رس	$V_S = 6/107 N_{\rho}^{237/10}$	Hasancebi & Ulusay (2007)
رس	$V_S = 89/97 N^{269/10}$	Hasancebi & Ulusay (2007)
رس	$V_S = 27 N^{73/10}$	Jafari et al. (2002)
رس	$V_S = 132 N_{\rho}^{271/10}$	Pitilakis et al. (1999)

Athanasopoulos (1995)	$V_S = 55/76 N^{445/0}$	رس
Lee (1990)	$V_S = 43/114 N^{31/0}$	رس
Yokota et al. (1981)	$V_S = 114 N^{31/0}$	رس
Imai (1977)	$V_S = 2/8 \cdot N^{292/0}$	رس
Daag et al. (2022)	$V_S = 70/45 N^{553/0}$	ماسه
Ataee et al. (2019)	$V_S = 69/18 N_{\rho}^{506/0}$	ماسه
Sil & Haloi (2017)	$V_S = 712/79 N^{369/0}$	ماسه
Kirar et al. (2016)	$V_S = 3/10 \cdot N^{338/0}$	ماسه
Chatterjee & Choudhury (2013)	$V_S = 44/56 N_1^{51/0}$	ماسه
Maheswari et al. (2010)	$V_S = 53/10 \cdot N^{265/0}$	ماسه
Maheswari et al. (2010)	$V_S = 29/96 N_{\rho}^{266/0}$	ماسه
Dikmen (2009)	$V_S = 73 N^{33/0}$	ماسه
Hasancebi & Ulusay (2007)	$V_S = 131 N_{\rho}^{205/0}$	ماسه
Hasancebi & Ulusay (2007)	$V_S = 82/90 \cdot N^{319/0}$	ماسه
Pitilakis et al. (1999)	$V_S = 145 N_{\rho}^{178/0}$	ماسه
Kayabali (1996)	$V_S = 75/3 + 175 N$	ماسه
Raptakis et al. (1995)	$V_S = 7/10 \cdot N^{24/0}$	ماسه
Pitilakis et al. (1992)	$V_S = 162 N^{17/0}$	ماسه
Lee (1990)	$V_S = 4/57 N^{49/0}$	ماسه
Okamoto et al. (1989)	$V_S = 125 N^{30/0}$	ماسه
Fumal & Tinsley (1985)	$V_S = 51 + 152 N^{27/0}$	ماسه
Sykora & Stokoe (1983)	$V_S = 5/10 \cdot N^{29/0}$	ماسه
Seed et al. (1983)	$V_S = 4/56 N^{50/0}$	ماسه
Imai (1977)	$V_S = 6/8 \cdot N^{331/0}$	ماسه
Ohta et al. (1972)	$V_S = 22/87 N^{36/0}$	ماسه
Shibata (1970)	$V_S = 7/31 N^{54/0}$	ماسه
Dikmen (2009)	$V_S = 60 N^{36/0}$	سیلت
Jafari et al. (2002)	$V_S = 22 N^{77/0}$	سیلت
Lee (1990)	$V_S = 64/105 N^{319/0}$	سیلت

مدول برشی نقش اساسی در تحلیل و طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی دارد. همچنین در کرنش‌های بسیار کوچک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، جایی که الاستیسیسته خالص بر رفتار خاک حاکم است [۱۲]. تعیین دقیق مدول برشی با کرنش کوچک خاک (G_{max})، اهمیت ویژه‌ای در تحقیقات گذشته داشته است. مدول برشی کرنش کوچک توسط آزمایش‌های

ژئوفیزیکی درجا، مانند درون چاهی^۱ و آزمایش‌های آزمایشگاهی مانند ستون تشدید^۲ و آزمایش المان خمشی^۳ در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳، ۱۴]. به علت گسترش آزمایش SPT در سراسر جهان طی دهه های اخیر و سرعت بالا و مقرون به صرفه بودن این آزمایش در محل، ایجاد همبستگی بین عدد نفوذ استاندارد و مدول برشی کرنش کوچک توسط محققین مختلف برای مناطق مختلف مورد توجه قرار گرفته است [۱۵-۱۹].

انبازغان و همکاران [۱۵] مطالعه‌ای را در مورد اهمیت اندازه‌گیری انرژی چکش^۴ (E_H) بر داده‌های حاصل از آزمایش SPT در برآورد مدول برشی کرنش کوچک ارائه کردند. آن‌ها همبستگی جدیدی بین مقادیر SPT - N و G_{max} برای انواع خاک ها ارائه دادند. یاه و همکاران [۲۰] با استفاده از معادلات قبلی، روابط بین مقادیر تصحیح شده N و مدول برشی کرنش کوچک در خاک‌های سیلتی چین را بررسی و رابطه همبستگی جدیدی با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده برای خاک‌های سیلتی کشور چین بیان کردند. آن‌ها نشان دادند که، در رابطه همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک، در نظر گرفتن یا نگرفتن ریزدانه تأثیری در روابط همبستگی ندارد و عدد SPT اصلاح شده نسبت به عدد SPT اصلاح نشده جوابی با دقت کمتر برای همبستگی با مدول برشی کرنش کوچک ارائه می دهد. در مطالعه انبازغان و همکاران [۱۴] آزمایش SPT در شش گمانه با اعماق مختلف انجام شد و انرژی چکش در تمامی آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. تأثیر انرژی چکش بر همبستگی بین عدد SPT و ویژگی‌های خاک مانند وزن مخصوص، مدول برشی کرنش کوچک و ظرفیت باربری خاک مورد بحث قرار گرفت. آن‌ها مشخص کردند که عمق برگشت در SPT به انرژی ارسالی از چکش بستگی دارد. روچا و همکاران [۲۱] همبستگی‌های کلاسیک برای تخمین G_{max} از داده‌های SPT در خاک‌های لاتریت و ساپرولیتی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که خاک‌های لاتریتی، متفاوت از خاک‌های ساپرولیتی رفتار می کنند و دو فرمول مجزا برای آن ها تعریف کردند. حسن و همکاران [۲۲] با استفاده و ارزیابی تکنیک‌های درون‌یابی وزن‌دهی فاصله معکوس (IDW) و ساخت مدل‌های ژئوتکنیکی خاک (GSM) طبق ۱۱۲ داده SPT-N بیان کردند مقادیر عدد SPT بالاتر به حضور گراول، شیل، آهک و سنگ ماسه‌ای مرتبط است، در حالی که مقادیر پایین‌تر با حضور لایه‌های آبرفتی مرتبط است. لیطیف و همکاران [۲۳] با هدف ارائه همبستگی بین MPT، CPT و SPT برای خاک‌های رسی با یکپارچگی‌های مختلف از پلاستیسیته کم تا زیاد تحقیق خود را بر روی دو سایت در شمال مرکزی الجزایر انجام دادند و ۹ معادله تجربی با دقت بالا برای این هدف پیشنهاد کردند. آصف و همکاران [۲۴] تأثیر توأمان تخلخل و میزان خاک رس را بر سرعت موج برشی در سنگ های شیلی^۵ بررسی کردند و یک معادله برای پیش بینی سرعت موج برشی به‌عنوان تابعی از هر دو مولفه تخلخل و محتوای رس ارائه دادند.

در جدول ۲ فرمول‌های همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک و عدد SPT در مطالعات گذشته ارائه شده است.

جدول ۲: روابط ارائه شده برای همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک توسط محققین مختلف

مرجع	فرمول $G_{max}(MPa)$	نوع خاک
Rocha et al. (2023)	$G_{max} = 3/5 N^{0.66}$	تمامی خاک‌ها
Rocha et al. (2023)	$G_{max} = 7/19 + 6/64 N$	تمامی خاک‌ها
Anbazhagan et al. (2022)	$G_{max} = 83/13 N_{60}^{0.65}$	تمامی خاک‌ها
Anbazhagan et al. (2021)	$G_{max} = 40/16 N_{78}^{0.65}$	تمامی خاک‌ها
Barros & Pinto (1997) (Lateritic soils)	$G_{max} = 2/55 N^{0.66}$	تمامی خاک‌ها

¹ Downhole seismic testing

² Resonant column test

³ Bender element test

⁴ Hammer energy

⁵ Shale rocks

Barros & Pinto (1997) (Lateritic soils)	$G_{max}=3/20+56N$	تمامی خاک‌ها
Barros & Pinto (1997) (Saprolitic soils)	$G_{max}=8/43N^{0.426/}$	تمامی خاک‌ها
Barros & Pinto (1997) (Saprolitic soils)	$G_{max}=3/2+94N$	تمامی خاک‌ها
Imai & Tonouchi (1982)	$G_{max}=12/14N^{0.68/}$	تمامی خاک‌ها
Ohsaki & Iwasaki (1973)	$G_{max}=77/11N^{1/}$	تمامی خاک‌ها
Imai & Tonouchi (1982)	$G_{max}=26/17N^{0.6/}$	رسی
Kramer (1996)	$G_{max}=56/15N^{0.68/}$	ماسه
Seed et al. (1983)	$G_{max}=20/6N$	ماسه
Imai & Tonouchi (1982)	$G_{max}=26/12N^{0.61/}$	ماسه
Ohsaki & Iwasaki (1973)	$G_{max}=374/6N^{0.94/}$	ماسه
Ya et al. (2021)	$G_{max}=0.5/12N^{0.53/}$	سیلت
Ya et al. (2021) (Without fines content correction)	$G_{max}=66/12N^{0.35/}$	سیلت
Ya et al. (2021) (With fines content correction)	$G_{max}=68/4N^{0.68/}$	سیلت
Anbazhagan & Sitharam (2010)	$G_{max}=28/24N^{0.55/}$	سیلت

پژوهش حاضر به درک روابط بین وزن مخصوص لایه‌های خاک و مدول برشی کرنش کوچک در خاک‌های رسی، ماسه‌ای و سیلتی می‌پردازد و همچنین مقدار حساسیت مدول برشی کرنش کوچک خاک‌های ماسه‌ای، سیلتی و رسی را به نسبت تغییرات وزن مخصوص بررسی می‌کند. به علاوه، این مطالعه با استفاده از روابط جدید همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی، برای اولین بار تأثیر وزن مخصوص هر لایه خاک را به طور جداگانه بررسی کرده و بدین ترتیب دقت مدلسازی را افزایش داده است. همچنین در این پژوهش برای نخستین بار در این منطقه، روابط همبستگی بومی بین عدد SPT، سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک ارائه شده است. این یافته‌ها با ارائه روابط همبستگی دقیق‌تر مبتنی بر وزن مخصوص لایه‌ها، دقت برآورد مدول برشی کرنش کوچک در پروژه‌های ژئوتکنیکی محلی را افزایش می‌دهد. با توجه به موارد فوق، در این پژوهش منطقه شمالی ایران که در حاشیه دریا خزر قرار دارد و به علت کم آبی در مناطق مرکزی ایران طی سالیان اخیر مورد توجه زیادی برای ساخت و ساز، مخصوصاً ساخت سازه‌های مرتفع قرار گرفته است، انتخاب گردید و برای اولین بار روابط همبستگی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و همچنین با مدول برشی کرنش کوچک با استفاده از انجام آزمایش‌های SPT و درون چاهی برای این منطقه ارائه شد. با مشخص کردن محل‌های حفاری و آماده کردن محل، حفاری در ۱۱ مکان صورت گرفت. آزمایش SPT از عمق یک متری به فواصل هر ۲ (m) حین حفاری در هر گمانه انجام شد. سپس بعد از ثابت گذاری چاله حفاری شده، ژئوفون به داخل لوله PVC ارسال شد. با تولید امواج طبق آزمایش درون چاهی و دریافت اطلاعات توسط گیرنده برای هر ۲ (m) فاصله، سرعت موج برشی و سرعت موج فشاری لایه‌های خاک تعیین شد. سپس داده‌ها مورد پالایش قرار گرفت و با توجه به نوع خاک دسته بندی شد. پس از آن همبستگی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و با مدول برشی کرنش کوچک بررسی و روابط جدیدی برای ناحیه شمالی ایران ارائه گردید. با توجه به تغییر وزن مخصوص هر لایه در عمق‌های مختلف و تأثیر آن در کنار سرعت موج برشی بر مدول برشی کرنش کوچک، تأثیر پذیری مدول برشی کرنش کوچک خاک‌های مختلف نسبت به تغییر وزن مخصوص هر لایه خاک مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش پژوهش

برای برقراری روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک از روش رگرسیون^۱ استفاده گردید. داده‌های اولیه بدست آمده از آزمایش‌ها مورد پالایش قرار گرفتند و پراکنده‌گی داده‌ها توسط انحراف معیار استاندارد^۲ (STD) مشخص گردید [۲۵]. داده‌ها به منظور قابل مقایسه بودن با مطالعات قبلی در سه دسته خاک‌های رسی، سیلتی و ماسه‌ای دسته بندی شدند. اکثر روابط ارائه شده توسط محققین قبلی برای همبستگی سرعت موج برشی و عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک به همان صورت که در جدول ۱ و ۲ نشان داده شد دارای یک تابع توانی $V_s = XN^Y$ است، که در آن X و Y ضرایبی هستند که توسط یک تابع تجربی کنترل می‌شوند. برای این مطالعه هم معادله تابع توانی استفاده شد. همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی برای سه نوع خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی ناحیه شمالی ایران بر اساس اطلاعات دقیق آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی بررسی شد و روابط ارائه گردید. برای بدست آوردن ارتباط مدول برشی کرنش کوچک G_{max} با سرعت موج برشی از رابطه ۱ استفاده شد.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (۱)$$

جایی که ρ وزن مخصوص نمونه دست نخورده و V_s سرعت موج برشی است که با استفاده از نتایج آزمایش درون چاهی در محل اندازه گیری می‌شود.

سه رابطه توانی برای همبستگی عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک برای سه نوع خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی ارائه شد. میزان دقت روابط ارائه شده توسط R^2 و خطای جذر میانگین مربعات^۳ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین RMSE از رابطه ۲ محاسبه شد [۲۶].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (۲)$$

در این رابطه، n تعداد نمونه‌ها و y_i میزان واقعی هر نمونه و $\hat{y}_i$ میزان میانگین انحراف است.

برای بررسی میزان تاثیر تغییرات وزن مخصوص لایه‌های خاک بر مدول برشی کرنش کوچک با جایگزینی روابط بدست آمده از همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مقایسه با نتایج حاصل از رابطه ۱، تاثیر تغییر وزن مخصوص لایه‌های خاک بر مدول برشی کرنش کوچک، بررسی شد.

۳. مطالعات صحرایی

شهرستان رشت به عنوان مرکز استان گیلان، محل اتصال خطوط ارتباطی مختلف بوده و هر روزه در حال گسترش است. در حال حاضر درک مناسبی از خصوصیت‌های ژئوتکنیکی این منطقه با توجه به رشد سریع عمران و آبادانی در آن یک ضرورت است. با توجه به محدوده این شهرستان، ۱۱ نقطه برای حفاری انتخاب گردید. با انجام آزمایش‌های SPT و درون چاهی و بررسی های میدانی، خصوصیات خاک ناحیه مورد مطالعه بررسی گردید. ناحیه مورد مطالعه، نحوه انجام آزمایش‌ها در محل و اطلاعات بدست آمده در ادامه این بخش ارائه شده است.

۳.۱. ناحیه مورد مطالعه

^۱ Regression

^۲ Standard deviation (STD)

^۳ The root-mean-squared error (RMSE)

ناحیه مورد مطالعه شهرستان رشت واقع در مرکز استان گیلان در شمال ایران است. استان گیلان سرزمینی سرسبز و حاصلخیز واقع در جنوب دریای خزر و شمال رشته کوه البرز است. سطح آب زیرزمینی در بیشتر ناحیه مورد مطالعه به دلیل نزدیکی با دریای خزر و میزان بارندگی بالا در این گستره، به سطح زمین نزدیک است. این منطقه بر روی دشت وسیعی از خاک‌های رسوبی شامل رس، سیلت، ماسه و شن با آب زیرزمینی کم عمق واقع شده است.

۳-۲- محل گمانه ها

۱۱ محل برای انجام عملیات حفاری و انجام آزمایش‌های صحرایی در نظر گرفته شد. بعد از آماده سازی محل و تراز نمودن سطح کار، حفاری گمانه‌ها تا عمق ۳۰ متر با دستگاه حفاری دورانی^۱ انجام گرفت. در هر ۲ متر حفاری آزمایش SPT انجام و نتایج ثبت گردید. اولین آزمایش SPT در عمق یک متری انجام شد و پس از آن در هر ۲ به ۲ متر آزمایش تکرار گردید. برای انجام آزمایش درون چاهی، بعد از اتمام عملیات حفاری، لوله توخالی از جنس PVC^۲ به قطر بیرونی ۶۳(mm) تا عمق حفاری شده، در چاه قرار داده شد.

۳-۳- آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

این آزمون بر اساس استاندارد ASTM D1586 [۲۷] انجام شد. در این آزمایش، طبق استاندارد، وزنه ای به وزن (kg) ۶۳/۵ از ارتفاع (cm) ۷۶ به داخل هر گمانه رها شد و تعداد ضربه‌های شمارش شده از نفوذ نمونه‌گیر به عمق (cm) ۱۵ به خاک در سه قطعه ثبت شد. در نهایت، تعداد کل دو مرحله آخر به عنوان عدد نفوذ استاندارد (N) در نظر گرفته شد.

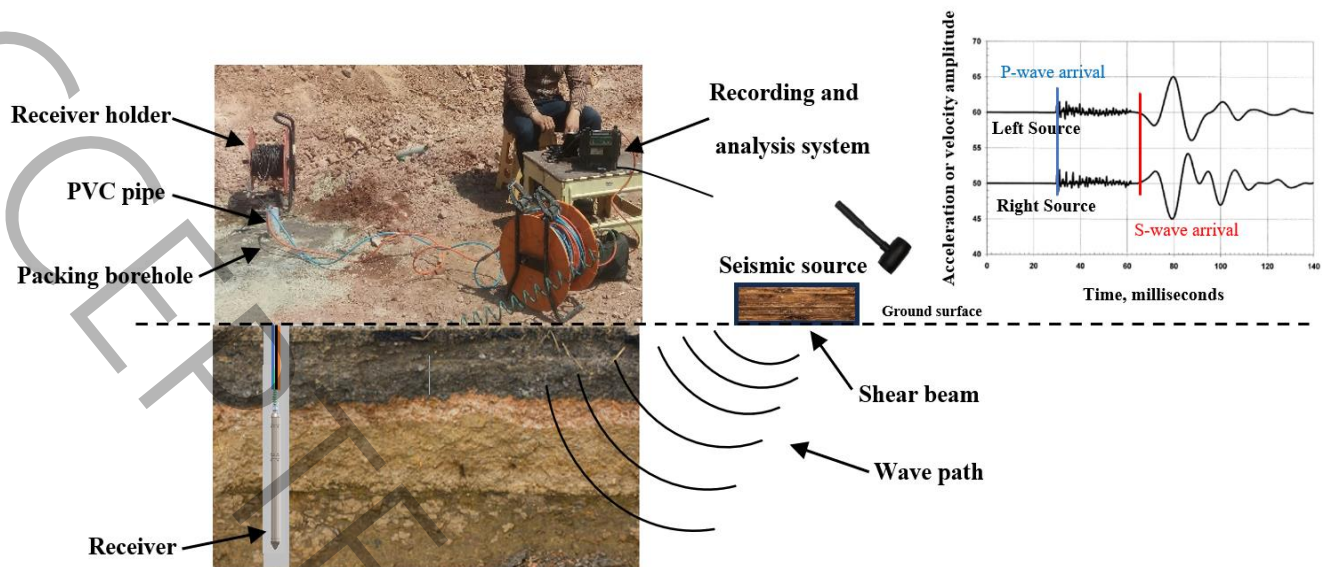
۳-۴- آزمایش درون چاهی

آزمایش‌های درون چاهی بر اساس ASTM D7400 [۲۸] انجام شدند. برای انجام این آزمایش، پس از حفر هر گمانه، لوله PVC در راستای گمانه حفاری شده قرار داده شد. قبل از شروع هر آزمایش محل و اطراف آن به صورت دقیق بررسی شد تا هیچ گونه ارتعاشی که بر ثبت داده‌ها تاثیر بگذارد، مانند عبور و مرور وسایل نقلیه و یا هرگونه چشمه تولید ارتعاش، وجود نداشته باشد. یک الوار چوبی بر روی سطح زمین و در نزدیکی دهانه هر گمانه قرار گرفت و ثابت شد. قبل از شروع آزمایش اتصال‌های دستگاه کاملاً کنترل گردیدند. همچنین قبل از ارسال ژئوفون گیرنده به داخل گمانه، در سطح زمین میزان حساسیت به ضربه‌های مکانیکی ایجاد شده بر الوار چوبی، کنترل گردید. برای تعیین سرعت امواج لرزه‌ای، ژئوفون به داخل گمانه برای ثبت اطلاعات از عمق (m) ۱ و در فواصل (m) ۲ فرستاده شد. سپس توسط ضربات مکانیکی بر الوار چوبی در سطح زمین، امواج برشی و فشاری (امواج P و امواج S) تولید شد. امواج دریافتی از ژئوفون توسط کابل به پردازشگر^۳ منتقل و ثبت گردید. شکل ۱ نحوه انجام مطالعات ژئوفیزیک در این مطالعه را نشان می دهد. ثابت گذاری گمانه توسط لوله PVC و نحوه ایجاد موج و سیستم‌های دریافت و آنالیز و همچنین دریافت کننده، در این شکل نشان داده شده است.

¹ Rotary

² PVC

³ Analysis system



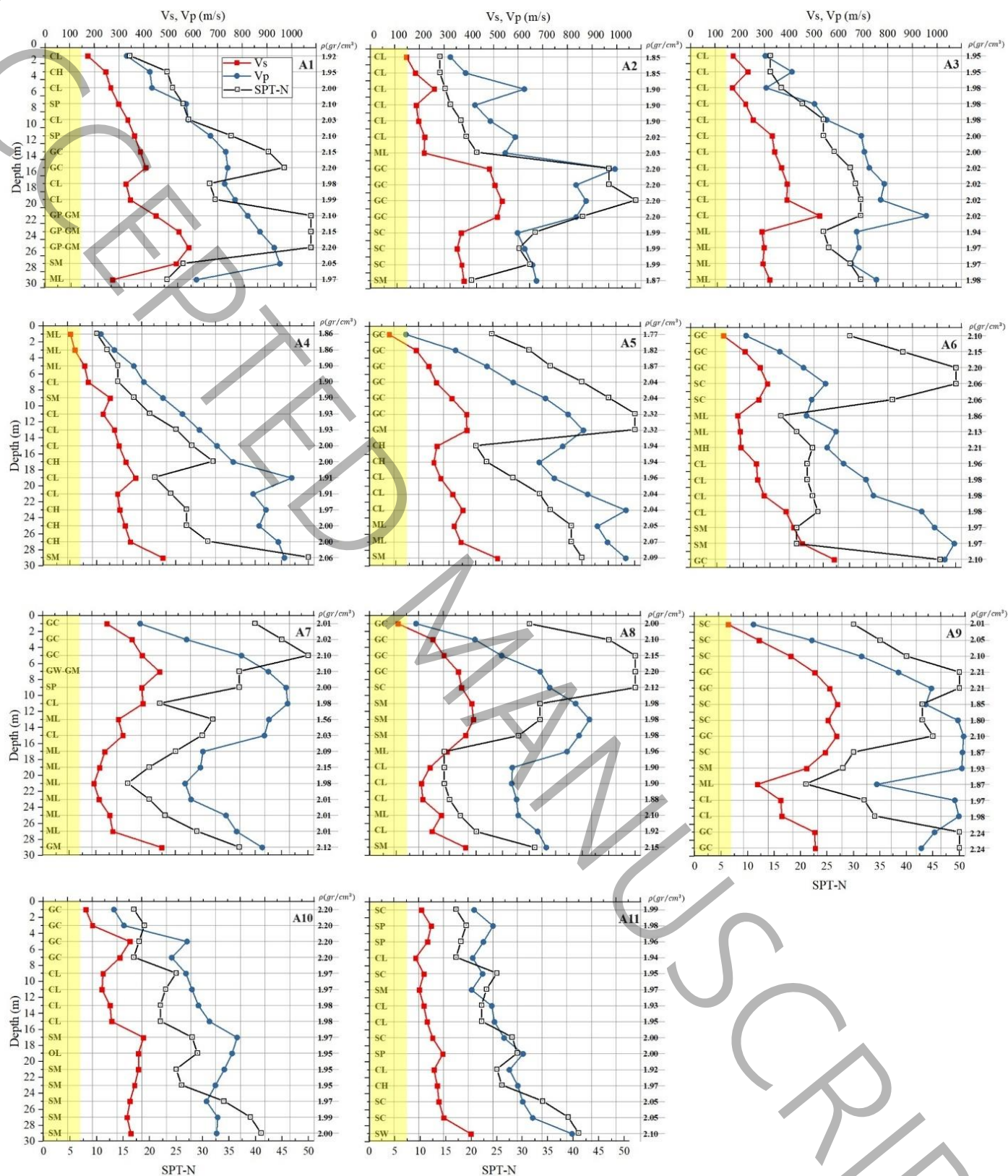
شکل ۱: نحوه انجام آزمایش درون چاهی و ابزارهای آن

۳-۵- اطلاعات بدست آمده

در شکل ۳ اطلاعات مربوط به هر ۱۱ گمانه از ۱A تا ۱۱A که شامل عمق، سرعت امواج برشی و لرزه‌ای، عدد اس پی تی، وزن مخصوص و نوع خاک است نشان داده شد. همانگونه که از این شکل مشاهده می‌شود لایه‌های خاکی دارای تنوع نسبتاً زیادی هستند و از رسوبات مختلف ریز دانه‌ی رسی و سیلتی تا رسوبات درشت دانه‌ی شنی و ماسه‌ای تشکیل یافته‌اند. سطح آب زیرزمینی در تمامی گمانه‌ها نزدیک به سطح زمین است. گمانه‌های A1 تا A3 نشان می‌دهند که لایه‌های سطحی از خاک‌های رسی (CL) با چگالی حدود ۱.۹ (g/cm³) تا ۲.۰ (g/cm³) مکعب تشکیل شده‌اند. در گمانه‌های A1 و A2 با افزایش عمق، این لایه‌ها به خاک‌های ماسه‌ای (SC) (SP) و مخلوطی از ماسه و شن (GC) تغییر می‌کنند. در گمانه A2، افزایش قابل توجه سرعت موج برش (Vs) و عدد SPT در عمق حدود ۱۶ متری نشان‌دهنده وجود لایه‌ای مقاوم‌تر مانند سنگ است. گمانه A3 در عمق ۲۴ متری از خاک لای (ML) تشکیل شده است. در این عمق کاهش سرعت موج برشی و عدد SPT نیز مشاهده شد.

گمانه‌های A4 تا A6 نیز تنوع زیادی در لایه‌بندی خاک نشان می‌دهند. در گمانه A4، لایه‌های سطحی از خاک‌های لای (ML) تشکیل شده‌اند که با افزایش عمق به خاک‌های رسی (CL) و ماسه‌ای (SM) تبدیل می‌شوند. گمانه‌های A5 و A6 نیز لایه‌هایی از خاک‌های رسی (CL)، ماسه‌ای (SC) و مخلوطی از ماسه و شن (GC) را نشان می‌دهند. در گمانه A6، افزایش ناگهانی SPT-N در عمق حدود ۲۶ متری ناشی از وجود لایه‌ای سخت‌تر است.

در گمانه‌های A7، A8 و A10، مشاهده می‌شود که لایه‌های سطحی شامل مخلوطی از ماسه و شن (SC) (GC) هستند. گمانه‌های A8 و A9 نیز لایه‌هایی از خاک‌های ماسه‌ای (SC) و لای (ML) را نشان می‌دهند. در گمانه A10، یک لایه خاک آلی (OL) در عمق حدود ۱۸ متری وجود دارد. در نهایت، گمانه A11 نیز لایه‌هایی از خاک‌های ماسه‌ای (SP) و رسی (CL) را نشان می‌دهد. این تنوع در لایه‌بندی خاک منطقه نیاز به بررسی دقیق و جامع از خواص خاک و شرایط زمین‌شناسی برای طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: اطلاعات سرعت موج برشی و فشاری، نوع خاک، عدد SPT و وزن مخصوص ۱۱ گمانه حفاری شده

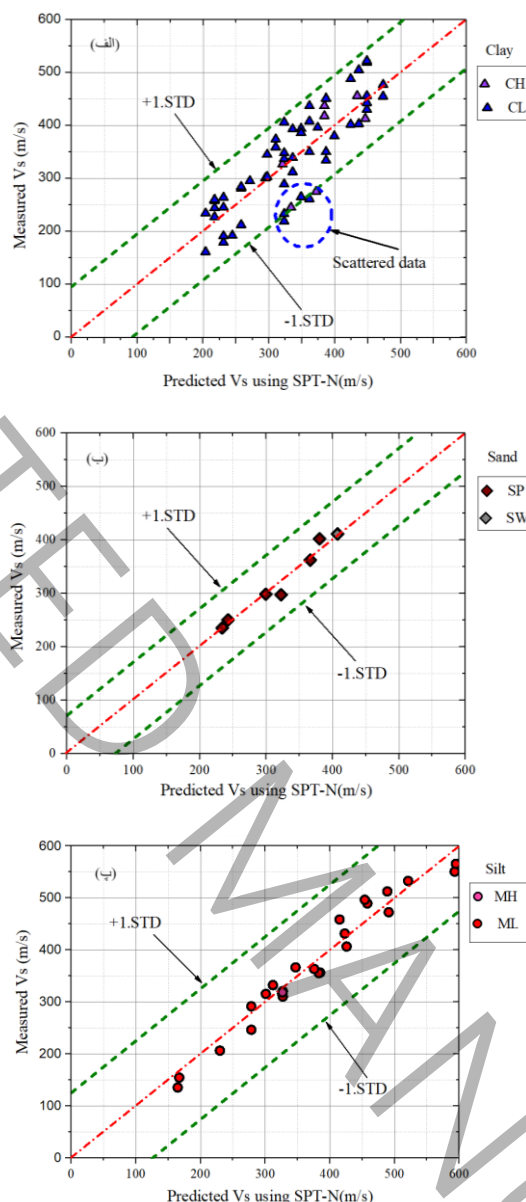
۴- نتایج و بحث

داده‌های مربوط به خاک‌های رسی، سیلتی و ماسه‌ای از میان داده‌ها، برای تعیین رابطه همبستگی بین سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک با عدد SPT به تفکیک انتخاب گردیدند. برای پالایش داده‌ها از انحراف معیار استاندارد^۱ (STD) استفاده گردید. STD به معنای مقدار متوسط تنوع در مجموعه داده‌ها است، همچنین این معیار، میزان انتشار هر داده در یک مجموعه داده را کمی می‌کند. STD بیان می‌کند به طور متوسط هر داده چقدر از میانگین فاصله دارد. انحراف استاندارد بالا به این معنی است که مقادیر داده‌ها به میزان قابل توجهی از میانگین فاصله دارند، در حالی که انحراف استاندارد پایین نشان می‌دهد که مقادیر داده‌ها نزدیک به میانگین خوشه بندی شده‌اند [۲۵]. STD از رابطه ۳ محاسبه شد، در این رابطه n تعداد داده‌ها و $\bar{x} - x_i$ میزان انحراف هر داده نسبت به میانگین است [۶].

$$\text{انحراف معیار استاندارد} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

طبق شکل ۳ اکثر داده‌ها برای هر نوع سه خاک در داخل خطوط ± 1 انحراف استاندارد (STD) است. برای خاک رسی که سرعت موج برشی در محدوده $150 (m/s)$ تا $523 (m/s)$ بود مقدار انحراف استاندارد $94 (m/s)$ است. برای خاک‌های ماسه‌ای که سرعت موج برشی در محدوده $220 (m/s)$ تا $411 (m/s)$ بود مقدار انحراف استاندارد $72 (m/s)$ است. همچنین برای خاک‌های سیلتی که سرعت موج برشی در محدوده $135 (m/s)$ تا $565 (m/s)$ بود مقدار انحراف استاندارد $126 (m/s)$ بدست آمد. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌شود بیش از ۹۵٪ داده‌های هر سه نوع خاک مورد استفاده برای همبستگی در محدوده داخلی ± 1 انحراف استاندارد قرار دارند. فقط در خاک‌های رسی ۶ داده در نزدیکی خط STD-۱ قرار داشتند که دو عدد از آن‌ها مربوط به خاک CH و ۴ عدد، مربوط به خاک CL هستند.

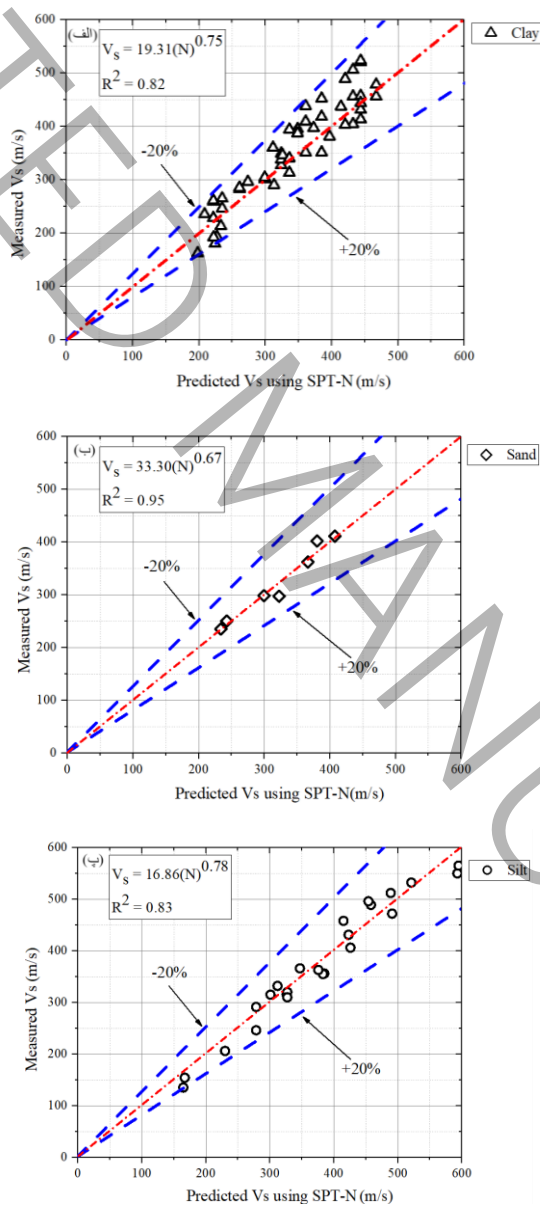
¹ Standard deviation (STD)



شکل ۳: بررسی پراکندگی داده‌های خاک رسی، ماسه‌ای، سیلتی بر اساس STD، (الف) رس، (ب) ماسه، (پ) سیلت

داده‌هایی که در هر سه گروه خاک خارج از داخل دامنه مثبت و منفی مقدار STD بود، حذف گردید. طبق شکل ۴ با حذف داده‌های در خارج از محدوده بین ± 1 STD، فرمول‌های همبستگی بین سرعت موج برشی با عدد SPT برای هر سه گروه محاسبه شد. همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، تمامی داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های پیش‌بینی شده در محدوده بین ± 0.2 خط برابری قرار دارند. این شکل شامل سه نمودار است که نسبت بین سرعت موج برشی (V_s) اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مقادیر SPT-N، برای سه نوع خاک مختلف، شامل رس، ماسه و سیلت را بررسی می‌کند. در نمودار اول (شکل ۳. الف) که به خاک رس مربوط می‌شود، داده‌ها با مثلث‌های تیره نشان داده شده‌اند. این نمودار همبستگی خوبی را با معادله $V_s = 31/19 N^{0.75/0}$ نشان می‌دهد و R^2 آن برابر با ۰.۸۲ است، که نشان‌دهنده رابطه نسبتاً قوی بین V_s واقعی و پیش‌بینی شده است. خطوط آبی که به شکل خط‌چین وجود دارند، انحراف‌های $\pm 20\%$ از خط تطابق (خط قرمز) را نشان می‌دهند. نمودار دوم (شکل ۳. ب)

برای خاک ماسه است که با داده‌های مربع و لوزی نمایان شده و نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی است. معادله $V_s = 30.33N^{0.71}$ با $R^2 = 0.95$ نشان می‌دهد که نقاط داده‌ها به‌طور عمده در نزدیکی خط تطابق قرار دارند و این معادله از دقت بالایی در برآورد سرعت موج برشی برخوردار هست. در نهایت، نمودار سوم (شکل ۳. پ) مربوط به خاک سیلت با داده‌های دایره‌ای نشان داده شده است که همبستگی مناسبی را نشان می‌دهد. معادله $V_s = 16.86N^{0.78}$ و $R^2 = 0.83$ نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌ها برای خاک سیلت نیز نسبتاً دقیق هستند. همچنین در جدول ۳ فرمول‌های بدست آمده برای رابطه همبستگی سرعت موج برشی و عدد SPT برای ناحیه شمالی ایران به همراه مقادیر R^2 و RMSE ارائه شده است.

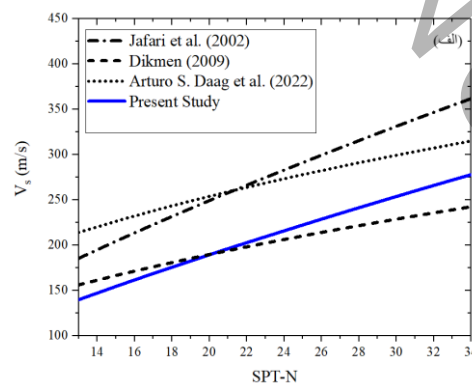


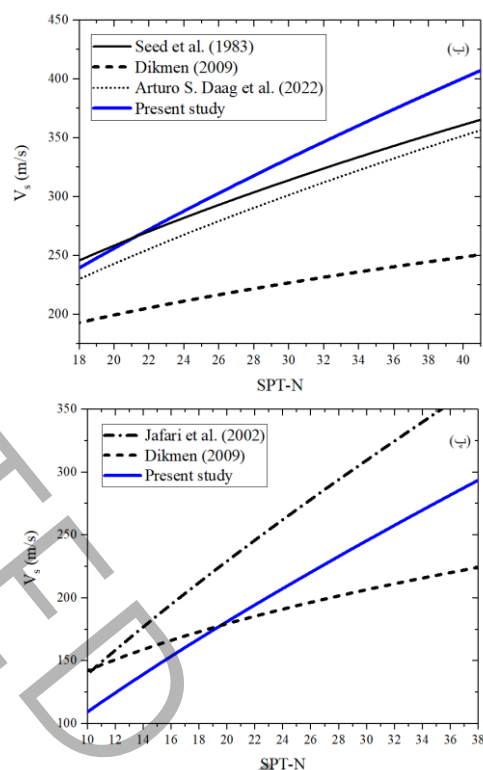
شکل ۴: سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در مقابل سرعت موج برشی پیش‌بینی شده بر اساس همبستگی با اس پی تی، (الف) رس، (ب) ماسه، (پ) سیلت

جدول ۳: جدول روابط همبستگی بین سرعت امواج برشی و عدد SPT برای ناحیه شمالی ایران

نوع خاک	فرمول ها	R ²	RMSE
رس	$V_s = 31.19 N^{0.50}$	۰/۸۲	۶۲/۴۰
ماسه	$V_s = 30.33 N^{0.50}$	۰/۹۵	۱۵/۴۱
سیلت	$V_s = 86.16 N^{0.50}$	۰/۸۳	۵۷/۵۰

در شکل ۵ روابط ارائه شده با مطالعات قبلی مقایسه شده است. در شکل ۵، الف برای خاک‌های رسی بازه ۱۳ تا ۳۴ عدد SPT طبق داده‌های بدست آمده، در نظر گرفته شد. در شکل ۵، ب برای خاک‌های ماسه‌ای بازه ۱۸ تا ۴۱ و در شکل ۵، ث برای خاک‌های سیلتی بازه ۱۰ تا ۳۸ با توجه به داده‌های آزمایش صحرایی برای عدد SPT لحاظ شد. رابطه ارائه شده برای خاک‌های رسی با مطالعه جعفری و همکاران [۲۹]، دیکمن [۳۰] و دگ و همکاران [۳۱] مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد که میزان تغییر سرعت موج برشی با عدد SPT شبیه به مطالعه دیکمن و همچنین دگ و همکاران است. همچنین شکل ۵، الف نشان می‌دهد که رابطه بین Vs و SPT-N در تمامی موارد خطی است. نمودار مطالعه حاضر (خط آبی) در مقادیر SPT کمتر از ۲۰، حداکثر ۱۰ درصد و در مقادیر SPT بیشتر از ۲۰، حداکثر ۱۲ درصد اختلاف را در مقایسه با نتایج کار دیکمن نشان می‌دهد. برای خاک‌های ماسه‌ای همبستگی ارائه شده در این مطالعه با سه مطالعه سید و همکاران [۱۳]، دیکمن [۲۴] و دگ و همکاران [۲۴] مقایسه گردید و روند تغییرات به مطالعه سید و همکاران [۱۸] نزدیک است. در شکل ۵-ب، خط مطالعه جدید (خط آبی) در مقادیر SPT-N کمتر از ۲۲، حداکثر ۳ درصد و در مقادیر SPT-N بیشتر از ۲۲، حداکثر ۱۰ درصد اختلاف نسبت به نتایج کار سید و همکاران نشان می‌دهد. مطالعات جعفری و همکاران [۲۹] و دیکمن [۲۴] برای مقایسه با رابطه ارائه شده برای سیلت‌ها استفاده گردید. در در شکل ۵، پ، خط مطالعه جدید (خط آبی) نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های پایین‌تری برای Vs در SPT-N کم تر از ۱۸ در مقایسه با دیگر مطالعات است. خط مطالعه جدید (خط آبی) برای SPT-N بالای ۲۲، بین خطوط مطالعات جعفری و همکاران [۲۳] و دیکمن [۳۰] قرار دارد و در محدوده SPT-N ۱۹ با کار دیکمن مطابقت بالایی دارد. این اختلاف‌های جزئی ناشی از روش‌های مختلف نمونه‌برداری، معیارهای تجربی و شرایط زمین‌شناسی هر مطالعه هستند. همچنین، تجزیه و تحلیل این نمودارها نشان می‌دهد که در نظر گرفتن تمایزهای بین انواع مختلف خاک می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی‌ها داشته باشد. دسته‌بندی خاک‌ها به سه گروه رسی، سیلتی و ماسه‌ای در افزایش دقت همبستگی‌ها مؤثر است.





شکل ۵: مقایسه نتایج بدست آمده برای همبستگی $SPT - N$ و V_s با مطالعات گذشته: (الف) رس، (ب) ماسه و (پ) سیلت

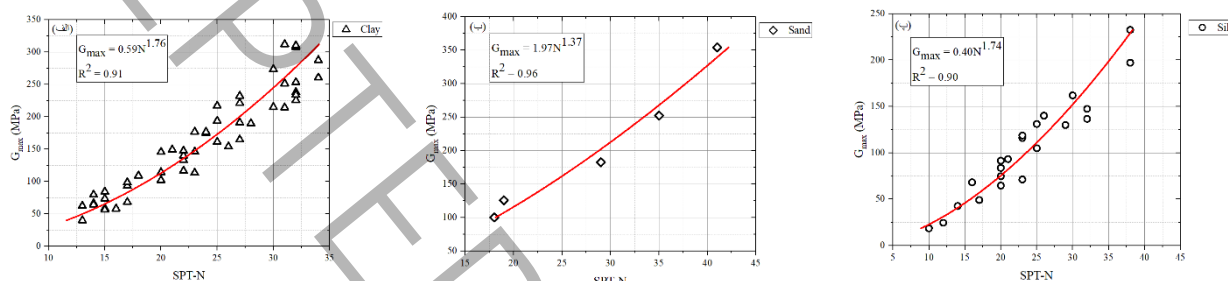
همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک با عدد SPT با استفاده از رابطه ۱ و با جایگذاری سرعت موج برشی حاصل از آزمایش درون چاهی و وزن مخصوص هر لایه مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۶ خط روند نمایی^۱ به همراه میزان دقت و روابط مربوط به همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک و عدد SPT برای سه گروه خاک رسی، سیلتی و ماسه‌ای ارائه شده است. در شکل ۶ الف که مربوط به خاک رس است، داده‌ها با مثلث‌های توخالی مشخص شده‌اند. معادله $G_{max} = 59/0 \cdot N^{0.76/1}$ با $R^2 = 0.91$ نشان‌دهنده همبستگی مناسب و دقت خوب این مدل برای پیش‌بینی مدول برشی در خاک‌های رسی است. مدول برشی کرنش کوچک برای خاک‌های رسی این مطالعه بین محدوده ۳۰ تا ۲۸۷ MPa است.

شکل ۶ ب به خاک ماسه‌ای اختصاص دارد. معادله $G_{max} = 97/1 \cdot N^{0.77/1}$ با $R^2 = 0.96$ نشان‌دهنده همبستگی مناسب این مدل برای پیش‌بینی مدول برشی کرنش کوچک در خاک‌های ماسه‌ای است. تا $SPT-N$ برابر با ۲۲ مقادیر بالاتری برای مدول برشی برای ماسه نسبت به خاک رسی بدست می‌آید اما با افزایش $SPT-N$ به بیش از ۲۲، مقادیر مقادیر مدول برشی خاک رسی بیشتر است. مدول برشی کرنش کوچک برای خاک‌های ماسه‌ای این مطالعه بین محدوده ۹۰ تا ۳۵۴ MPa است.

در شکل ۶ پ که مربوط به خاک سیلت است معادله $G_{max} = 40/0 \cdot N^{0.74/1}$ با ضریب تعیین $R^2 = 0.90$ نشان داده شده است. این معادله نشان می‌دهد که رابطه بین G_{max} و $SPT-N$ برای خاک سیلت نزدیک به خاک رس است اما در یک $SPT-N$ مشابه، مقادیر G_{max} برای خاک رس و خاک ماسه از خاک سیلتی بیشتر است. مدول برشی کرنش کوچک برای خاک‌های سیلتی این مطالعه بین محدوده ۲۴ تا ۲۳۲ MPa است.

¹ Exponential trendline

این نتایج نشان می‌دهند که نوع خاک تأثیر مستقیمی بر رابطه بین مدول برشی بیشینه (G_{max}) و عدد SPT-N دارد. در تراکم‌های پایین (SPT-N)، خاک ماسه‌ای به دلیل ساختار دانه‌ای خود سختی بیشتری نسبت به خاک رس نشان می‌دهد، اما با افزایش تراکم (SPT-N)، خاک رس به دلیل ساختار ریزدانه و چسبندگی ذرات، سختی بالاتری از خود نشان می‌دهد. خاک سیلتی که دارای ماهیت بینابینی است، رفتار مشابهی با خاک رس دارد، اما مقادیر مدول برشی آن در تمام محدوده‌های SPT-N پایین‌تر است. به طور کلی همه معادلات ارائه شده از دقت بالایی برخوردارند ($R^2 \geq 0.90$) که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان این مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار مکانیکی خاک‌ها می‌باشد.



شکل ۶: خط روند نمایی همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک G_{max} با عدد اس پی تی: (الف) رس، (ب) ماسه و (پ) سیلت

روابط بدست آمده برای همبستگی عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک از اطلاعات بدست آمده از آزمایش SPT و آزمایش درون چاهی برای خاک شمالی ایران در جدول ۴، به همراه میزان R^2 و RMSE مربوط به هر رابطه نشان داده شده است.

جدول ۴: روابط همبستگی مدول برشی کرنش کوچک G_{max} با عدد SPT برای سه خاک رسی، ماسه و سیلتی ناحیه شمالی ایران

نوع خاک	فرمول‌ها	R^2	RMSE
رس	$G_{max} = 59/0 \cdot N^{1.76/1}$	۰/۹۱	۴۶/۲۴
ماسه	$G_{max} = 97/1 \cdot N^{1.37/1}$	۰/۹۶	۵۷/۱۴
سیلت	$G_{max} = 40/0 \cdot N^{1.74/1}$	۰/۹۰	۱۵/۵۰

در مطالعات قبلی در محاسبات رابطه همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک با توجه به اثر وزن مخصوص در روابط، تأثیر تغییرات وزن مخصوص هر لایه خاک به صورت مجزا بررسی نشده است. در این پژوهش با جایگزینی روابط بدست آمده از همبستگی سرعت موج برشی با عدد SPT در رابطه $G_{max} = \rho V_s^2$ ، تأثیر تغییرات وزن مخصوص خاک بر مدول برشی کرنش کوچک، بررسی شد.

در جدول ۵ رابطه همبستگی G_{max} برای خاک‌های ماسه‌ای توسط ارتباط مستقیم G_{max} با عدد SPT و همچنین با جایگذاری رابطه همبستگی بین سرعت موج برشی با عدد SPT براساس رابطه ۱ ارائه شده است. ستون A روابط همبستگی مدول برشی کرنش کوچک حاصل از جایگذاری رابطه همبستگی V_s با عدد SPT حاصل از این پژوهش در رابطه ۱ است. در ستون B رابطه مستقیم حاصل از همبستگی بین عدد SPT و G_{max} قرار دارد. در ستون C وزن مخصوص (ρ) حاصل از برابری دو ستون A و B درج شده است.

همچنین در جدول ۵ نتایج این پژوهش با کار سید و همکاران [۱۳] مقایسه گردیده است. در مطالعه این محققین هم، برای خاک‌های ماسه‌ای، بطور همزمان روابط همبستگی بین سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک با یک سری از داده‌های آزمایش SPT و درون چاهی بررسی شده است.

جدول ۵: مقایسه رابطه ارائه شده از جایگزینی روابط همبستگی موج برشی و عدد SPT در رابطه $G_{max} = \rho V_s^2$ برای خاک‌های ماسه‌ای با کار سید و همکاران [۱۳]

	A	B	C
نوع خاک	G_{max} by $V_s (N)$		
ماسه (سید و همکاران) [۱۳]	$G_{max} = 12/3 \rho N^{0.7/1}$	$G_{max} = 20/6 N^{0.7/1}$	$\rho = 98/1$
ماسه	$G_{max} = 1/1 \rho N^{0.7/1}$	$G_{max} = 97/1 N^{0.7/1}$	$\rho = 79/1 N^{0.7/1} \approx 79/1$

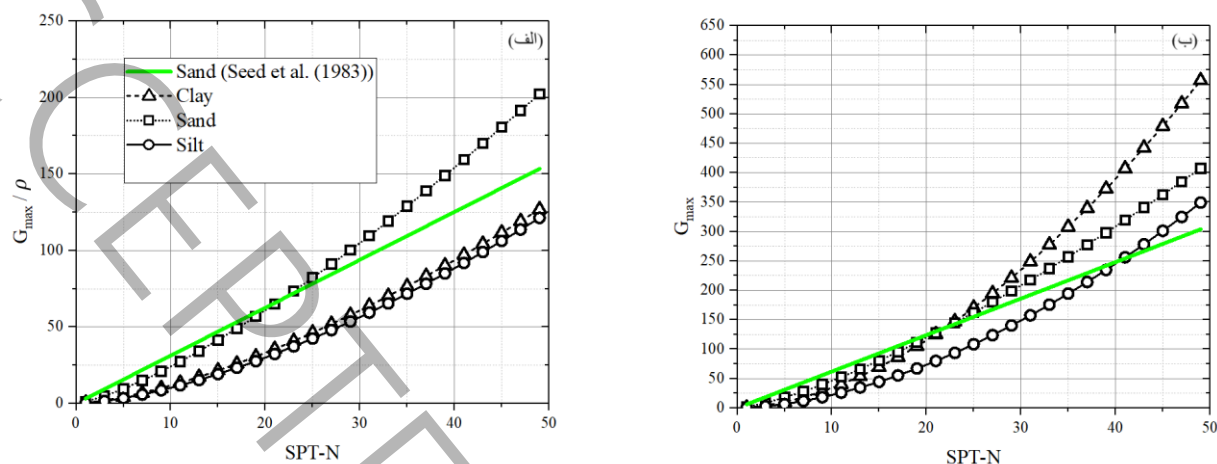
مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعه سید و همکاران [۱۸] برای خاک‌های ماسه‌ای نشان داد که تغییرات مدول برشی کرنش کوچک تحت تاثیر تغییرات وزن مخصوص به صورت خطی است و برای محاسبه مدول برشی کرنش کوچک خاک‌های ماسه‌ای می‌توان به جای تاثیر وزن مخصوص هر لایه، یک عدد میانگین قرار داد. برای بررسی تاثیر تغییرات وزن مخصوص بر G_{max} برای خاک‌های رسی، ماسه‌ای و سیلتی روابط طبق جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶: بررسی تاثیر تغییرات وزن مخصوص بر G_{max} برای خاک‌های رسی، ماسه‌ای و سیلتی

	A	B	C
نوع خاک	G_{max} by $V_s (N)$		
رس	$G_{max} = 37/0 \rho N^{0.6/1}$	$G_{max} = 59/0 N^{0.6/1}$	$\rho = 59/1 N^{0.6/1}$
ماسه	$G_{max} = 1/1 \rho N^{0.7/1}$	$G_{max} = 97/1 N^{0.7/1}$	$\rho = 79/1 N^{0.7/1} \approx 79/1$
سیلت	$G_{max} = 28/0 \rho N^{0.6/1}$	$G_{max} = 40/0 N^{0.6/1}$	$\rho = 43/1 N^{0.6/1}$

در شکل ۷ تغییرات مدول برشی کرنش کوچک نرمال شده با وزن مخصوص (G_{max}/ρ) و همچنین تغییرات مدول برشی کرنش کوچک به تغییرات عدد SPT نشان داده شده است. در شکل ۷ الف به علت نرمالیز شدن مدول برشی کرنش کوچک با وزن مخصوص، تغییرات غیر خطی مشاهده نمی‌گردد. شکل ۷ ب تاثیر پذیری غیر خطی مدول برشی کرنش با در نظر گرفتن وزن مخصوص نسبت به عدد SPT را نشان می‌دهد. طبق شکل ۷ ب منحنی خاک‌های رسی با افزایش عدد SPT تغییرات بیشتری (شیب تندتر) نسبت به خاک‌های ماسه‌ای دارند. این موضوع تاثیر بیشتر وزن مخصوص هر لایه، در رابطه همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک و عدد SPT برای خاک‌های رسی را نشان می‌دهد و ضرورت در نظر گرفتن وزن مخصوص هر لایه در محاسبات را برای خاک‌های رسی آشکار می‌سازد. در واقع در ایجاد روابط همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک خاک‌های رسی باید به پارامترهای دیگر این نوع خاک مانند درصد رطوبت، بافت و ساختار خاک که در مطالعات پیشین هم اشاره شده است، توجه شود [۳۲، ۳۳]. بدین لحاظ در این مطالعه با در نظر گرفتن وزن مخصوص هر لایه که تاثیر پذیر از میزان رطوبت و تراکم هر لایه است رابطه جامع تری برای خاک‌های

رسی ارائه شد. همچنین طبق نتایج این پژوهش برای خاک‌های سیلتی و ماسه‌ای تغییرات مدول برشی کرنش کوچک با در نظر گرفتن تغییرات وزن مخصوص برخلاف خاک‌های رسی یک رابطه نسبتاً خطی است و تغییرات ناگهانی ندارد.



شکل ۷: بررسی تاثیر تغییرات وزن مخصوص بر مدول برشی کرنش کوچک برای سه مدل خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی: (الف) تغییرات نرمال شده G_{max} با وزن مخصوص به عدد اس پی تی، (ب) تغییرات G_{max} به عدد SPT

۵- صحت سنجی

برای بررسی صحت و دقت روابط ارائه شده برای V_s و G_{max} از اطلاعات ۳ گمانه خارج از استان گیلان و در دیگر استان شمالی ایران (مازندران) استفاده شد. در جدول ۷ داده‌های مربوط به این سه گمانه ارائه شده است. در گمانه M1، ترکیب‌های متنوعی از نوع خاک‌ها مشاهده می‌شود که شامل خاک‌های رسی (CL)، سیلتی (ML) و ماسه (SP, SM) است. V_p در این گمانه بین ۷۲۰ (m/s) تا ۱۴۰۳ متغیر است، که نشان دهنده وضعیت مکانیکی مختلف خاک در اعماق مختلف است. همچنین، ρ خاک‌ها بین ۱٫۶۳ (gr/cm³) تا ۱٫۷۴ است. مقادیر مختلف SPT خاک‌ها برای این گمانه از ۱۴ تا ۳۳ است. در گمانه M2، همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه وسیعی از سرعت موج‌های برشی و چگالی خاک‌ها وجود دارد. این گمانه از خاک‌هایی نظیر خاک‌های رسی (CL)، ماسه (SP, SM) و سیلتی (ML) که نشان دهنده تغییرات خصوصیات خاک‌ها در عمق‌های مختلف است تشکیل شده است. V_p این گمانه در محدوده بین ۸۶۰ (m/s) تا ۱۱۶۱ قرار دارد. در واقع، افزایش چگالی و سرعت امواج در این گمانه‌ها به دلیل وجود لایه‌های ماسه‌ای و شنی است. در گمانه M3، وجود خاک‌هایی از نوع خاک رس (CL)، مخلوطی از ماسه و شن (GC و SC) و سیلتی (ML) به تنوع بیشتر در خاک‌ها اشاره دارد.

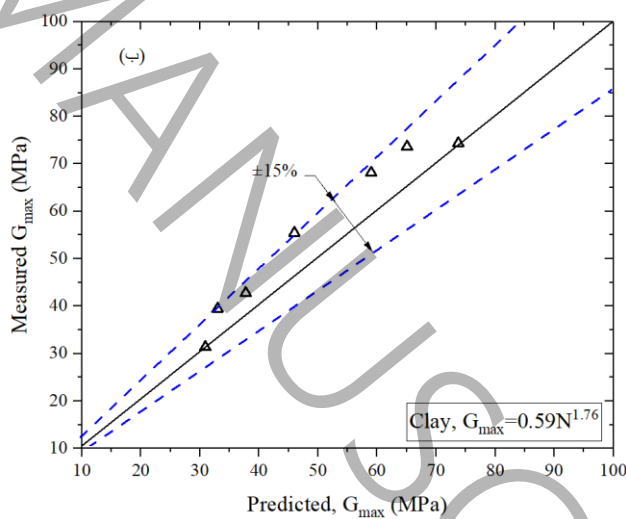
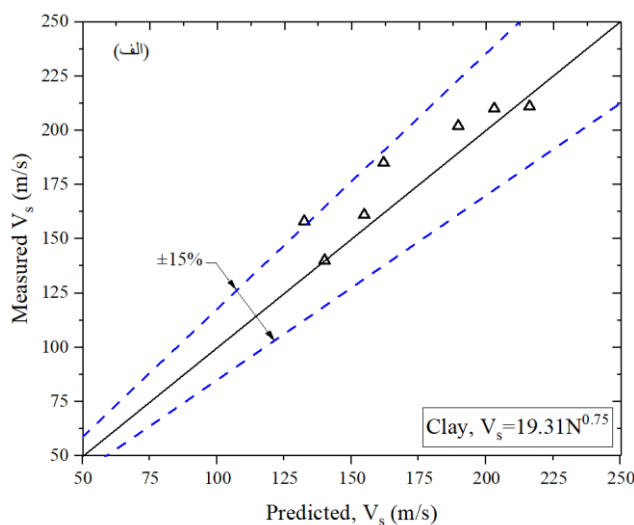
جدول ۷: داده‌های سه گمانه در نظر گرفته شده برای صحت سنجی در استان مازندران

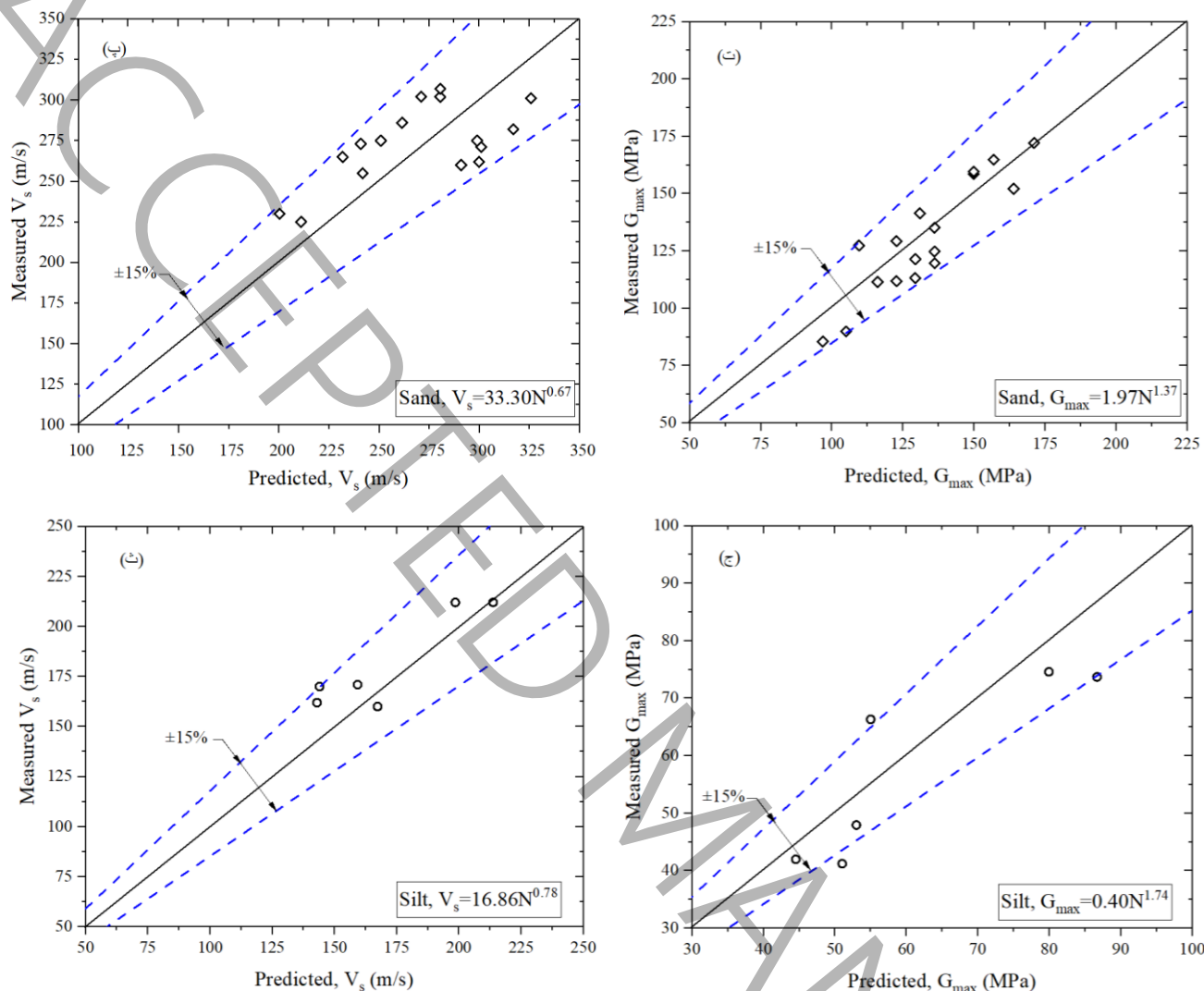
	عمق (m)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	ρ (gr/cm ³)	SPT	نوع خاک (USCS)
M1	۱	۱۴۰	۷۲۰	۱٫۶	۱۴	CL
	۳	۱۶۲	۱۳۵۹	۱٫۶	۱۵	ML
	۵	۱۷۰	۱۳۳	۱٫۶۱	۱۶	ML
	۷	۱۹۵	۱۲۲۳	۱٫۶۸	۲۰	SM
	۹	۲۲۵	۱۲۴۶	۱٫۶۹	۲۰	SP

	11	230	1324	1/7	22	SP
	13	255	1373	1/72	24	SP
	15	265	1293	1/73	25	SP
	17	302	1403	1/74	28	SP
	19	275	1283	1/65	26	SP
	21	262	1354	1/65	25	SP
	23	282	1321	1/7	26	SP
	25	301	1292	1/68	30	SP
	27	323	1299	1/65	31	SP
M2	29	333	1309	1/63	33	SM
	1	158	860	1/58	13	CL
	3	185	900	1/62	17	CL
	5	161	964	1/65	16	CL
	7	160	1001	1/61	19	ML
	9	171	1010	1/64	20	ML
	11	260	989	1/65	23	SP
	13	271	1032	1/63	26	SP
	15	273	1038	1/71	22	SP
	17	275	1068	1/71	24	SP
	19	286	1013	1/73	25	SP
	21	302	1148	1/75	28	SP
	23	307	978	1/75	29	SP
	25	313	1050	1/76	31	SM
	27	323	1157	1/66	32	SM
	29	336	1164	1/67	33	SM
M3	1	195	453	1/71	20	SC
	3	218	500	1/72	22	SC
	5	253	545	1/74	25	GC
	7	285	627	1/76	26	GC
	9	309	692	1/72	30	GC
	11	202	741	1/67	21	CL
	13	212	779	1/66	21	ML
	15	210	809	1/67	23	CL
	17	211	837	1/67	25	CL
	19	301	855	1/73	30	GC
	21	388	867	1/74	31	GC
	23	212	877	1/64	22	ML
	25	265	893	1/66	25	SC
	27	287	913	1/7	26	SC
	29	310	926	1/72	27	SC

با در نظر گرفتن روابط همبستگی ارائه شده در این پژوهش، برای سه گمانه جدید روابط همبستگی سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک با عدد SPT محاسبه گردید و در شکل ۸ میزان دقت روابط ارائه شده با میزان واقعی اندازه گیری شده در محل مقایسه شده است. محدوده سرعت موج برشی این سه گمانه برای خاک‌های رسی، ماسه‌ای و سیلتی به ترتیب بین (140 m/s) تا (211 m/s) ، (225 m/s) تا (323 m/s) و (160 m/s) تا (212 m/s) است. مدول برشی کرنش کوچک این سه گمانه نیز به ترتیب برای خاک‌های رسی، ماسه‌ای و سیلتی، (31 MPa) تا (74 MPa) ، (85 MPa) تا (172 MPa) و (41 MPa) تا (74 MPa) است.

طبق شکل ۸، تمامی پیش‌بینی‌های انجام شده برای سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک بر اساس عدد SPT در نزدیکی بازه مثبت منفی ۱۵٪ خط برابری قرار دارند که دقت بالای روابط پیشنهادی در این مطالعه را برای ناحیه شمالی ایران به خوبی نشان می‌دهد. این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که روابط تجربی ارائه شده توانایی مناسبی در پیش‌بینی پارامترهای دینامیکی خاک‌های مختلف دارند. با این حال، تفاوت‌های مشاهده شده در دقت پیش‌بینی‌ها و حساسیت پارامترها به تغییرات عدد SPT، لزوم در نظر گرفتن نوع خاک در مدل‌سازی‌های دینامیکی را برجسته می‌سازد. خاک‌های رسی به دلیل ساختار ذرات ریز و آب‌دوست خود، معمولاً مدول برشی کمتری دارند و در مقابل تغییرات رطوبت حساس هستند. در نمودارهای مربوط به خاک رس، انطباق زیاد بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌های مدل، نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در پیش‌بینی رفتار این نوع خاک است. خاک‌های ماسه‌ای، با دانه‌های بزرگ‌تر و نفوذپذیری بیشتر، معمولاً مدول برشی بالاتری دارند که نشان‌دهنده رفتار مکانیکی متفاوتی در مقایسه با خاک‌های رسی هست. در نمودار مربوط به خاک ماسه‌ای نیز پیش‌بینی‌های مدل نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در تعیین پارامترهای دینامیکی خاک است. خاک‌های سیلتی بین ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها قرار دارند و به همین دلیل ممکن است رفتار آن‌ها پیچیده‌تر باشد. اگرچه نقاطی در نمودار سیلت در نزدیکی بازه مثبت منفی ۱۵٪ خط برابری هستند، اما به‌طور کلی، ارتباط بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده قابلیت مدل‌های استفاده شده در ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی این نوع خاک‌ها است.





شکل ۸: میزان دقت پیش بینی سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک توسط فرمول‌های پیشنهادی برای ۳ گمانه جدید: (الف) (ب) برای خاک‌های رسی، (پ) (ت) برای خاک‌های ماسه‌ای و (ث) (ج) برای خاک‌های سیلتی

۶- نتیجه گیری

این مطالعه با انجام آزمایش‌های صحرایی، در ۱۱ محل شهرستان رشت، برای اولین بار برای ناحیه شمالی ایران، روابط همبستگی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای سه گروه خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی ارائه کرد. روابط پیشنهادی با اطلاعات مربوط به ۳ گمانه، واقع در استان مازندران، که در خارج از محدوده اولیه مورد مطالعه قرار داشتند، بررسی و دقت بالای این روابط مشخص گردید. از این روابط می‌توان برای یافتن سرعت موج برشی (V_s) و مدول برشی کرنش کوچک (G_{max}) در ناحیه شمالی ایران استفاده کرد. مهم‌ترین نتایج این تحقیق به تفکیک سه گروه خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی به شرح زیر است:

- خاک‌های رسی: خاک‌های رسی این نواحی از هردو نوع CL و CH بودند و بیشتر در لایه‌های سطحی مشاهده شدند اما در اعماق بیشتر از ۲۰ (m) هم به صورت لنزهایی با عمق‌های مختلف گزارش گردیدند. در این تحقیق، روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای خاک‌های رسی در ناحیه شمالی ایران به ترتیب در محدوده ۱۵۰ تا ۵۲۳ (m/s) و ۳۰ تا ۲۸۷ (MPa) ارائه شده است. روابط ارائه شده برای خاک‌های رسی نشان دادند که

با افزایش عدد SPT، سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک افزایش می‌یابد. خاک‌های رسی حساسیت بالایی به تغییرات وزن مخصوص دارند، بنابراین در تعیین روابط همبستگی این نوع خاک‌ها باید وزن مخصوص هر لایه در نظر گرفته شود.

- خاک‌های ماسه‌ای: روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای خاک‌های ماسه‌ای در ناحیه شمالی ایران به ترتیب در محدوده (m/s) ۱۳۵ تا ۵۶۵ و (MPa) ۲۴ تا ۲۳۲ ارائه شده است. خاک‌های ماسه‌ای حساسیت کمتری به تغییرات وزن مخصوص دارند، بنابراین می‌توان از میانگین وزن مخصوص لایه‌ها در روابط همبستگی استفاده کرد.

- خاک‌های سیلتی: خاک‌های سیلتی روابط پیچیده‌تر و بینابین خاک‌های رسی و ماسه‌ای دارند. در این خاک‌ها نیز با افزایش عدد SPT، سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک افزایش می‌یابند. روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای خاک‌های سیلتی در ناحیه شمالی ایران به ترتیب در محدوده (m/s) ۲۲۰ تا ۴۱۱ و (MPa) ۹۰ تا ۳۵۴ ارائه شده است. خاک‌های سیلتی نیز مانند خاک‌های ماسه‌ای این نواحی حساسیت کمتری به تغییرات وزن مخصوص دارند و می‌توان از میانگین وزن مخصوص لایه‌ها در روابط همبستگی استفاده کرد.

از آنجاییکه مقادیر $SPT - N$ پس از انجام مطالعات ژئوتکنیک به راحتی در دسترس هستند. در نتیجه برای بررسی خصوصیات دینامیکی و لرزه ای خاک، به جای انجام مطالعات ژئوفیزیک برای تعیین سرعت موج برشی V_s و مدول برشی کرنش کوچک G_{max} خاک، می‌توان از روابط بدست آمده در این پژوهش با صرف وقت و هزینه کمتر، بهره جست. در خاتمه پیشنهاد می‌شود، در مطالعات آتی با حفر گمانه‌های جدید در سایر نواحی ایران، مخصوصاً در نواحی متشکل از رسوبات آبرفتی، این روابط برای مناطق بیشتری توسعه داده شود.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

V_s	سرعت موج برشی، (m/s)
V_p	سرعت موج فشاری، (m/s)
G_{max}	مدول برشی کرنش کوچک، (MPa)
STD	انحراف معیار استاندارد
ρ	وزن مخصوص، (gr/cm^3)

۸. منابع و مراجع

- [1] M.K. Akin, S.L. Kramer, T. Topal, Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey), Eng Geol 119 (2011) 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.01.007>.
- [2] H. Haghsheno, M. Arabani, Seismic Bearing Capacity of Shallow Foundations Placed on an Anisotropic and Nonhomogeneous Inclined Ground, Indian Geotechnical Journal 51 (2021) 1319–1337. <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00534-7>.
- [3] M. Veiskarami, R. Jamshidi Chenari, M.A. Ahmadi, M.H. Hatefi, A Study on the Seismic Passive Earth Pressure on Rigid Retaining Walls Considering Seismic Acceleration Field, Journal of Earthquake Engineering 27 (2023) 2013–2033. <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2091686>.

- [4] B. Kirar, B.K. Maheshwari, P. Muley, Correlation Between Shear Wave Velocity (V_s) and SPT Resistance (N) for Roorkee Region, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 2 (2016) 9. <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0047-5>.
- [5] A. Sil, J. Haloi, Empirical Correlations with Standard Penetration Test (SPT)-N for Estimating Shear Wave Velocity Applicable to Any Region, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 3 (2017) 22. <https://doi.org/10.1007/s40891-017-0099-1>.
- [6] D.K. Lee, J. In, S. Lee, Standard deviation and standard error of the mean, *Korean J Anesthesiol* 68 (2015) 220. <https://doi.org/10.4097/kjae.2015.68.3.220>.
- [7] J.I. Joyner, W. B., Fumal, T. E., & Ziony, Predictive mapping of earthquake ground motion., *FUTURE DIRECTIONS IN EVALUATING EARTHQUAKE HAZARDS OF SOUTHERN CALIFORNIA*, 202 (1985).
- [8] K. Kayabali, Soil liquefaction evaluation using shear wave velocity, *Eng Geol* 44 (1996) 121–127. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00063-4).
- [9] H. Chatrayi, F. Hajizadeh, B. Taghavi, Shear wave velocity (V_s) and SPT resistance (N) correlation for the Isfahan Metro, Iran, *Acta Geophysica* 72 (2023) 1749–1764. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01180-8>.
- [10] H.A. Abbas, D. Al-Jeznawi, M.A.Q. Al-Janabi, L.F.A. Bernardo, M.A.S.C. Jacinto, Exploring Shear Wave Velocity—NSPT Correlations for Geotechnical Site Characterization: A Review, *CivilEng* 5 (2024) 119–135. <https://doi.org/10.3390/civileng5010006>.
- [11] A. Leisi, S. Manaman, Shear wave velocity estimation using seismic attributes in one of the sandstone reservoirs of southern Iran, *Journal of the Earth and Space Physics* 49 (2023) 389–405. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.348494.1007456>.
- [12] M. Payan, A. Khoshghalb, K. Senetakis, N. Khalili, Effect of particle shape and validity of G_{max} models for sand: A critical review and a new expression, *Comput Geotech* 72 (2016) 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.003>.
- [13] S.-H.H. He, M. Goudarzy, Z. Ding, Y. Sun, T. Xu, Q.-F.F. Zhang, Small-strain shear modulus (G_{max}) and microscopic pore structure of calcareous sand with different grain size distributions, *Granul Matter* 24 (2022) 112. <https://doi.org/10.1007/s10035-022-01270-2>.
- [14] P. Anbazhagan, K. Ayush, M.E. Yadhunandan, K. Siriwanth, K. Suryanarayana, G. Sahodar, Effective Use of SPT: Hammer Energy Measurement and Integrated Subsurface Investigation, *Indian Geotechnical Journal* 52 (2022) 1079–1096. <https://doi.org/10.1007/s40098-022-00609-z>.
- [15] P. Anbazhagan, A. Kumar, S.G. Ingale, S.K. Jha, K.R. Lenin, Shear modulus from SPT N-values with different energy values, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 150 (2021) 106925. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106925>.

- [16] P. Anbazhagan, T.G. Sitharam, Relationship between Low Strain Shear Modulus and Standard Penetration Test N Values, *Geotechnical Testing Journal* 33 (2010) 150–164. <https://doi.org/10.1520/GTJ102278>.
- [17] C.D.S. BARROS, J. C., & Pinto, Estimation of maximum shear modulus of Brazilian tropical soils from standard penetration test, *N International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (1999) (pp. 29-30).
- [18] H.B. Seed, I.M. Idriss, I. Arango, Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, *Journal of Geotechnical Engineering* 109 (1983) 458–482. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(458\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(458)).
- [19] Y. Ohta, N. Goto, H. Kagami, K. Shiono, Shear wave velocity measurement during a standard penetration test, *Earthq Eng Struct Dyn* 6 (1978) 43–50. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290060106>.
- [20] C. Ya, C., Songyu, L., & Guojun, Characterization on the correlation between SPT-N and small strain shear modulus G_{max} of Jiangsu silts of China., *Earth Sciences Research Journal* (2021) 25(2), 225–235.
- [21] H.L. Rocha, B. P., Silva, B. C. D., & Giacheti, Maximum shear modulus estimative from SPT for some Brazilian tropical soils, *Soils and Rocks* (2023) 46, e2023005222.
- [22] W. Hassan, M. Qasim, B. Alshameri, A. Shahzad, M.H. Khalid, S.U. Qamar, Geospatial intelligence in geotechnical engineering: a comprehensive investigation into SPT-N, soil types, and undrained shear strength for enhanced site characterization, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 83 (2024) 380. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03884-7>.
- [23] M. Letif, R. Bahar, N. Mezouar, Correlations Among CPT, MPT, and SPT in Clayey Soils: A Case Study from Central Northern Algeria, *Geotechnical and Geological Engineering* 43 (2025) 138. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03099-x>.
- [24] M.R. Asef, A. Misaghi, M. Sarmadivaleh, The simultaneous effect of porosity and clay on shear wave velocity in shale rocks, *Journal of Petroleum Geomechanics* 6 (2023) 40–47. <https://doi.org/10.22107/jpg.2023.402053.1198>.
- [25] S.-W.W. Moon, Y.C.H. Ng, T. Ku, Global semi-empirical relationships for correlating soil unit weight with shear wave velocity by void-ratio function, *Canadian Geotechnical Journal* 55 (2018) 1193–1199. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0226>.
- [26] T.O. Hodson, Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not, *Geosci Model Dev* 15 (2022) 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>.
- [27] D. ASTM, Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils. ASTM D1586, ASTM Standard Test Method (n.d.) 1586, 1–9.

- [28] Test Methods for Downhole Seismic Testing, ASTM D7400, (2019).
https://doi.org/10.1520/D7400_D7400M-19.
- [29] A. Jafari, M. K., Shafiei, A., & Razmkhah, Dynamic properties of fine grained soils in south of Tehran, (2002).
- [30] Ü. Dikmen, Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils, *Journal of Geophysics and Engineering* 6 (2009) 61–72. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/007>.
- [31] A.S. Daag, O.P.C. Halasan, A.A.T. Magnaye, R.N. Grutas, R.U. Solidum, Empirical Correlation between Standard Penetration Resistance (SPT-N) and Shear Wave Velocity (Vs) for Soils in Metro Manila, Philippines, *Applied Sciences* 12 (2022) 8067. <https://doi.org/10.3390/app12168067>.
- [32] C.R. Escudero, A. Ramirez Gaytan, A. Zamora Camacho, A. Preciado, K.L. Flores, A. Gomez Hernandez, Geotechnical zonation and soil–structure interaction at Puerto Vallarta, México, *Natural Hazards* 110 (2022) 247–267. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04945-w>.
- [33] J.J. Crispin, C.E.L. Gilder, P.J. Vardanega, Review of SPT-undrained shear strength correlation for UK soil deposits, in: *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*, CRC Press, London, 2024: pp. 1535–1538. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-283>.

ACCEPTED MANUSCRIPT