# مدول برشی حداکثر و نسبت میرایی ماسه و شن داسیتی

عطا آقایی آرایی؛ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

**تاریخ: دریافت** ۹۲/۲/۳ **پذیرش** ۹٤/۱/۱۸

## چکیده

از بین پارامترهای دینامیکی، مدول برشی حداکثر و نسبت میرایی مصالح اهمیت زیادی در تحلیل‌های دینامیکی دارند. در این مقاله برای اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر و نسبت میرایی مصالح ماسه‌ای و شنی داسیتی از GAP-SENSOR با فرکانس پاسخ زیاد (۲۰ kHz) در دستگاه سه‌محوری سیکلی استفاده شد. روش کار این دستگاه بدین‌صورت است که ابتدا ضربه‌ای ضعیف به کلاهک بالای نمونه زده می‌شود و تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی‌های خفیف حاصل در جهت افقی و قائم (کرنشی در حدود $10^{-6}$) با دستگاه ثبت داده با میزان نمونه‌گیری ۱۰۰۰۰۰ داده در هر ثانیه برای هر کانال ثبت می‌شود. با معلوم بودن زمان رسیدن موج بین دو حس‌گر و اندازه‌گیری فاصلهٔ آن‌ها، سرعت موج به‌دست می‌آید. در نهایت با محاسبهٔ ضریب پواسون از طریق اندازه‌گیری کرنش‌های افقی و قائم، مدول برشی حداکثر مصالح به‌دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که سرعت موج با افزایش تنش محدودکننده افزایش یافته و مقدار آن به اندازهٔ دانه‌ها بستگی دارد. هم‌چنین با استفاده از تکنیک کاهش دامنهٔ ارتعاش در ترازهای مختلف نمونه، مقدار نسبت میرایی ناشی از ضربه محاسبه شد. مقایسهٔ نتایج مدول برشی و نسبت میرایی با به‌کارگیری GAP-SENSOR با نتایج آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی روی مصالح بررسی شده، مؤید دقت مناسب روش ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی**: GAP-SENSOR، مدول برشی حداکثر، نسبت میرایی، داسیت

* **نویسنده مسئول** aghaeiaraei@bhrc.ac.ir

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

## مقدمه

اندازه‌گیری خواص دینامیکی خاک، در مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای امری مهم و حساس است. خواصی از خاک مانند سختی، میرایی، ضریب پواسن و دانسیته، پدیدهٔ انتشار امواج و سایر پدیده‌های کرنش کوچک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از بین آن‌ها سختی و میرایی مهم‌تر است و مابقی تأثیر کم‌تری داشته و معمولاً در محدوده‌ای کوچک تغییر می‌کنند.

پژوهش‌گران زیادی پارامترهای مؤثر بر مدول برشی حداکثر، نسبت مدول برشی و نسبت میرایی را بررسی کرده‌اند [٦]، [١١]، [١٥]، [١٧]–[٢٣]. این پارامترها عبارتند از: تنش محدودکننده، تعداد سیکل یا تاریخچهٔ کرنش، دست‌خوردگی، درصد ریزدانه، درصد شن، دانسیته نسبی، فرکانس بارگذاری، شرایط زه‌کشی، شکل بارگذاری، غیرهم‌سانی، نوع خاک، شکل دانه‌ها، مقدار شاخص خمیری و حتی دستگاه انجام آزمایش. اثر سرعت بارگذاری در کرنش‌های کوچک با اهمیت است. در کرنش‌های بزرگ ممکن است به‌علت رفتار غیرخطی، سرعت بارگذاری، تعداد سیکل‌ها و خصوصیات تغییرحجم با اهمیت شود.

بخش زیادی از کارهای آزمایشگاهی بر تعیین مدول برشی خاک‌های دانه‌ای مختلف در تراز کرنش‌های پایین متمرکز شده است. این مدول، مدول برشی حداکثر نامیده می‌شود و با $G_{\max}$ یا $G_0$ نمایش می‌دهند. سرعت انتشار امواج از میان یک محیط، به‌طور مستقیم متناسب با سختی و نسبت معکوس با دانسیته آن است. از این رو، اندازه‌گیری سرعت موج برشی، اجازه به‌دست آوردن اطلاعات مهمی راجع به مصالح دانه‌ای و تفسیر فرایندهای آن را فراهم می‌کند [٨]، [١٣]، [١٦]. سرعت موج برشی $V_s$ وابسته به مدول برشی خاک است که تنها وابسته به سختی برشی اسکلت است و متأثر از سختی حجمی مایع حفره‌ای نیست. مدول برشی و حجمی خاک وابسته به سختی کانی‌ها، فازهای هوا و آب، پوکی، درجهٔ اشباع، بزرگی نیروهای بین‌دانه‌ای، و هرگونه تماس بین دانه‌های کانی هستند [١٣]، [١٤]. تئوری انتشار امواج و مدل‌های ترکیبی نشان می‌دهد که هر دو سرعت موج P (موج طولی) به S (موج برشی)، با پارامترهای یک‌سان محیط متخلخل به‌هم مرتبط هستند [٩]. نمونه‌ای از نسبت سرعت موج P به S برای ضریب پواسن بین ۰/۱ تا ۰/۳۱ و بین ۱/۵ تا ۱/۹ است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

آزمایش‌های اندکی خواص خاک‌ها را در کرنش‌های کوچک تعیین می‌کنند که عبارتند از: آزمایش ستون تشدید، آزمایش نوسان اولتراسونیک، آزمایش المان خمشی پیزوالکتریک و استفاده از شتاب‌سنج. قابلیت نداشتن بعضی از وسایل مثل المان خمشی به‌علت آسیب‌پذیر بودن سر صفحه ارتعاش، از مشکلات مربوط در اندازه‌گیری این پارامتر در مصالح دانه‌ای و شنی است. هم‌چنین می‌توان به مشکلات در تعیین زمان دقیق رسیدن موج، محدودیت ابعادی و فرکانس بارگذاری آزمایش ستون تشدید برای دانه‌های بزرگ شن سنگ‌ریزه‌ای، فرکانس کم (۲kHz) و نوفه زیاد و امکان نداشتن اندازه‌گیری مستقیم ضریب پواسن در روش استفاده از شتاب‌سنج‌ها اشاره کرد.

اخیراً روش آزمایش استاندارد برای تعیین خواص مدول برشی و میرایی خاک‌ها با استفاده از دستگاه سه‌محوری برای مصالح ژئوتکنیکی خیلی متداول شده است. مشکل اساسی این روش خطای شدید در اندازه‌گیری کرنش محوری و محدودهٔ قابل اندازه‌گیری کرنش‌ها است. با اندازه‌گیری کرنش موضعی در سطح جانبی نمونه با استفاده از کرنش سنج‌های غیرتماسی و یا LDT[1] تا حدودی می‌توان خطای ناشی از اندازه‌گیری کرنش‌ها و در نتیجه میرایی ناشی از تراز نبودن سرهای نمونه و نقص اتصال بین نمونه و کلاهک را کاهش داد. در روش استفاده از حس‌گرهای جابه‌جایی سنج غیرتماسی، مدول برشی در کرنش حدود $۱۰^{-۵}$ اندازه‌گیری شده و مقادیر نظیر کرنش $۱۰^{-۶}$ برون‌یابی می‌شود.LDT به‌صورت موضعی روی غشاهای به‌کارروندهٔ با ضخامت بیش از ۲ میلی‌متر و هم‌چنین فرکانس بسیار کم (۱۲۰ Hz) سر می‌خورد و کاربری آن‌ها را در حالت اعمال تنش محدودکننده از طریق مکش برای مصالح شنی سنگ‌ریزه‌ای محدود می‌کند. از مکش برای اعمال تنش محدودکننده بر نمونه در دستگاه سه‌محوری مکرر در بررسی‌ها استفاده می‌شود [۷].

اندازه‌گیری سرعت موج با استفاده از GAP-SENSOR با فرکانس پاسخ بالا اخیراً روی تعدادی نمونهٔ بزرگ مقیاس انجام شده است که سه‌محوری، مصالح سبک‌وزن، تیزگوشه گل‌سنگی، ماسه تویورا، خرده لاستیک و درصدهای مختلف اختلاط ماسه با خرده لاستیک دارد

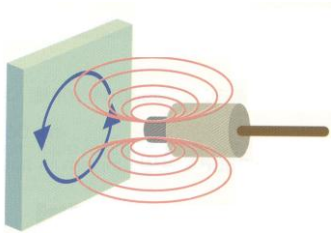
1 . Local Deformation Transducer

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

و نتایج حاصل با نتایج مدول یانگ حاصل از برون‌یابی در کرنش‌های کوچک آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی و هم‌چنین با مقادیر موجود در ادبیات فنی مقایسه شده‌است [۲۰]، [۲۱]. نتایج حاکی از دقت بسیار مناسب روش ابداعی است. از این رو، این تحقیق امکان به‌کارگیری حس‌گر غیرتماسی (GAP-SENOR) با فرکانس پاسخ زیاد (حدود ۲۰کیلوهرتز) را برای اندازه‌گیری مقادیر مدول یانگ (یا برشی) و میرایی برای دیگر مصالح درشت‌دانه مثل داسیت ماسه‌ای و شنی بررسی می‌کند و با نتایج آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی مقایسه می‌شود.

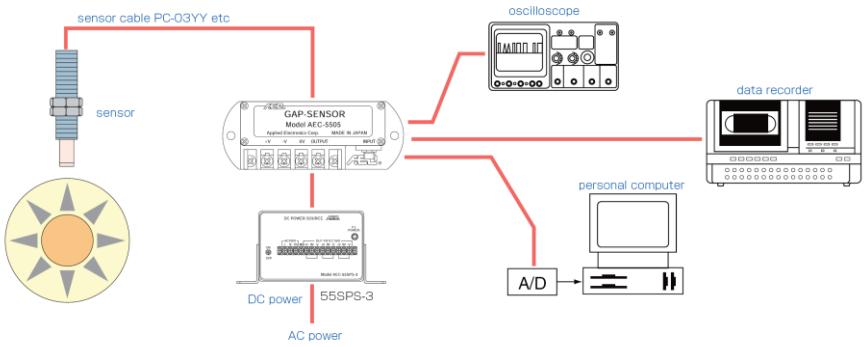
## نحوهٔ کارکرد GAP-SENSOR در تعیین سرعت موج حداکثر و میرایی

در شکل ۱ اصول کارکرد GAP-SENSOR نشان داده شده‌است. جریانی با فرکانس زیاد به دستگاه اندازه‌گیر داخل سر حس‌گر برای ایجاد میدان الکترومغناطیسی فرکانس زیاد به‌کار گرفته می‌شود. زمانی که یک صفحه هدف (ماده رسانا یا مغناطیس) به این میدان الکترومغناطیسی نزدیک می‌شود جریانی گردابی در سطح صفحه هدف تولید می‌شود و مقاومت (امپدانس) کویل حس‌گر شارژ می‌شود. سیستم حس‌گر تغییر در نوسان مقاومت حاصل از این پدیده را تشخیص داده و از آن برای تعیین رابطه بین جابه‌جایی و ولتاژ استفاده می‌کند. در شکل ۲ قطعات تشکیل‌دهندهٔ دستگاه نشان داده شده است. در این روش تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی در دو حس‌گر غیرتماسی با میزان نمونه‌گیری یک صدهزارم ثانیه اندازه‌گیری می‌شود که داده‌های حاصل نویز کمی دارند. این امر سبب تشخیص آسان زمان رسیدن موج در حس‌گر اندازه‌گیری برای کرنش‌های بسیار کوچک لازم، می‌شود. شکل ۳ رابطهٔ بین ولتاژ خروجی و جابه‌جایی در محدودهٔ خطی را نشان می دهد. فاصله قابل اندازه‌گیری با این حس‌گر حدود ٤ mm برای صفحه آهنی است

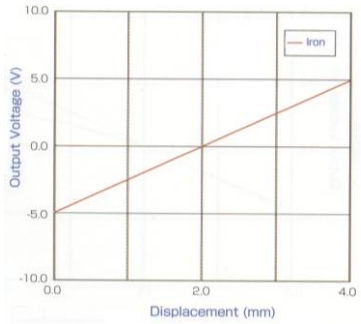


شکل ۱. اصول کارکرد GAP-SENSOR

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]




**شکل۲. چگونگی اتصال GAP-SENSOR، آمپلی فایر، منبع برق و دستگاه ثبت داده‌ها به‌هم**




**شکل ۳. رابطهٔ بین ولتاژ خروجی و جابه‌جایی در محدودهٔ خطی**

اجزای تشکیل‌دهندهٔ دستگاه شامل GAP-SENSOR از نوع PU09، کابل از نوع PC-03YY، آمپلی‌فایر از نوع AEC 5509، منبع برق از نوع SPS-3 AEC-55 هستند. شکل ۳ چگونگی اتصال اجزا مختلف شامل GAP-SENSOR، آمپلی فایر، منبع برق و دستگاه ثبت داده‌ها را نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود GAP-SENSOR قرار گرفته شده در مقابل صفحه هدف، به آمپلی‌فایر وصل می‌شود. آمپلی‌فایر به منبع برق متصل و خروجی آمپلی‌فایر به دستگاه ثبت داده وصل می‌شود.

### دستگاه ثبت داده‌ها برای اندازه‌گیری سرعت موج و میرایی

برای ثبت سریع و دقیق داده‌ها، نمی‌توان از دستگاه‌های ثبت داده دینامیکی معمولی استفاده کرد. با توجه به سهولت آزمایش و ضرورت انجام آزمایش به‌وسیلهٔ یک نفر و هم‌چنین قابلیت‌های فنی مورد نیاز، در این پژوهش از دستگاه ثبت داده ZR-MDR10 ساخت شرکت

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

OMRON کشور ژاپن استفاده شده است که قادر است تغییرات ولتاژ تا ۱۰- و ۱۰+ ولت را ثبت کند. وزن دستگاه کم‌تر از ۱ کیلوگرم است و با باطری قلمی کار می‌کند. این دستگاه ۸ کانال ثبت شده دارد و سرعت نمونه‌گیری آن ۱۰۰ kHz برای هرکانال و زمان لازم برای میزان نمونه‌گیری یاد شده حداکثر ۱۰ ثانیه است. سپس داده‌ها با نرم‌افزاری خاص به‌نام ZR-SV10 با نام تجاری Smart Viewer به فرمت قابل قبول اکسل تبدیل می‌شود. از قابلیت‌های خاص این نرم‌افزار این است که اختلاف زمانی بین رسیدن امواج را به آسانی می‌توان مشخص کرد.

**تکنیک اندازه‌گیری مدول برشی براساس سرعت انتشار امواج الاستیک در خاک با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر**

برای اندازه‌گیری سرعت موج در جهت قائم (طولی)، صفحات هدف GAP-SENORها به‌صورت افقی و قائم در ترازهای مختلف روی غشای نمونه سه‌محوری ساخته شده از مصالح بررسی شده نصب می‌شود. پس از نصب GAP-SENOR روی میله رزوه شده، فاصلهٔ آن‌ها از صفحات هدف به ۲ میلی‌متر تنظیم می‌شوند. سپس با زدن ضربه‌ای کوچک به سر میله متصل به کلاهک بالای نمونه، تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی‌های حاصل و زمان‌های رسیدن موج در حس‌گرهای مختلف اندازه‌گیری می‌شود. با مشخص بودن فاصلهٔ دو حس‌گر ( $L$ ) و زمان رسیدن موج ( $T$ ) مقادیر سرعت موج طولی مهار شده ( $V_P$ ) با استفاده فرمول $V_P = L/T$ به‌دست می‌آید. با در دست بودن مقادیر سرعت موج طولی مهارشده و مقدار دانسیتهٔ خاک مقدار مدول مهارشدگی[1] از رابطهٔ $M = \rho.V_P^2$ به‌دست می‌آید. رابطهٔ بین مدول مهارشدگی و مدول یانگ بدین صورت است:

$$M = E[(1-\nu_{ske})/(1+\nu_{ske})(1-2\nu_{ske})] \qquad (۱)$$

که $\nu_{ske}$، ضریب پواسن اسکلت خاک است. با داشتن مقادیر تغییرشکل‌های قائم و افقی با استفاده از GAP-SENSORهای نصب شده در تراز یک‌سان در نقاط مختلف نمونه و با توجه به ابعاد نمونه و موقعیت حس‌گرها، کرنش‌های محوری و شعاعی محاسبه و مقادیر ضریب پواسن قابل اندازه‌گیری است. با در دست بودن مقادیر مدول یانگ ( $E$ ) و $\nu$ (برابر ضریب پواسن اندازه‌گیری شده کلی) می‌توان مدول برشی را با فرمول (۲) محاسبه کرد:

1. constraint modulus

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

$$G = E/[2(1+\nu)] \qquad (۲)$$

## دستگاه سه‌محوری استفاده شده و لوازم مورد نیاز برای نصب GAP-SENSOR و انجام آزمایش

از دستگاه سه‌محوری سیکلی قطر بزرگ مستقر در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه توکیو، ژاپن، برای انجام آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی این تحقیق استفاده شده است. این دستگاه دارای یک سیستم بارگذاری دنده-کلاج اتوماتیک با موتور خودکار AC است و توانایی انجام آزمایش‌های مونوتونیک و سیکلی مصالح خاکی و سنگ‌ریزه‌ای تا قطر ۳۰۰ میلی‌متر را دارد. دستگاه از قطعات مختلفی از جمله قاب بارگذاری عمودی، سیستم کامپیوتری ثبت داده‌ها تشکیل شده است. سیستم بارگذاری در آزمایش‌های سیکلی تنش کنترل است که محدودهٔ میزان کرنش‌های اعمالی بین ٪۰۰۱/min تا ٪۱/min است. برای اندازه‌گیری مقدار بار عمودی اعمال شده به نمونه، از یک نوع سیستم بارگذاری به ظرفیت مجاز ۵ تن در داخل محفظه سه‌محوری و درست بالای نمونه استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری تغییر طول نمونه، یک حس‌گر از نوع LVDT به ظرفیت ۱۰ mm با دقت ۰/۰۱mm روی نمونه قرار داده شده است. تنش محصورکننده از طریق مکش در داخل نمونه اعمال می‌شود. در این دستگاه حداکثر فشار جانبی (از طریق مکش) قابل اعمال برنمونه‌ها $1 kg/cm^2$ است و برای اندازه‌گیری این فشار از حس‌گری از نوع دیافراگمی به ظرفیت $10 kg/cm^2$ استفاده می‌شود. داده‌ها به یک دستگاه ثبت داده‌ها چند کاناله از طریق آمپلی فایرهای متصل به حس‌گرهای مربوط انتقال داده و ثبت می‌شوند.

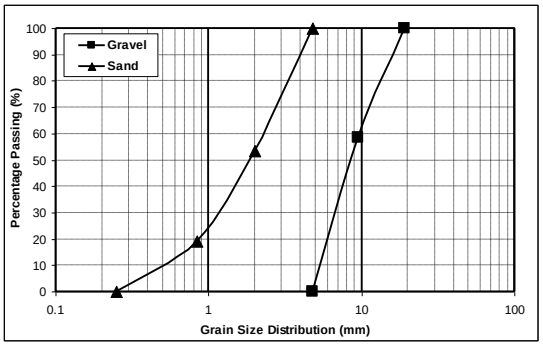
به‌علاوه در این تحقیق، از دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ دانشگاه توکیو، دستگاه ابداعی نگارنده برای اندازه‌گیری سرعت موج، نسبت پواسن و ضریب پواسن نصب شده است. بدین‌ترتیب بعد از ساخت نمونه و بازکردن قالب‌های شکاف‌دار و نگه‌داری نمونه با مکش، از چسب مایع مخصوص برای اتصال صفحات هدف روی غشاء و ایجاد پایه برای صفحات هدف روی غشاء استفاده می‌شود. قطرات چسب نباید روی غشاء جاری شود. چون بعد از خشک شدن در اثر کشش، در غشاء ترک ایجاد می‌شود. برای نصب حس‌گرها باید برای هر

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

GAP-SENSOR یک میله رزوه شده مجزا به طول حداکثر ۱ متر در اطراف نمونه سه محوری که تنها متصل به نشیمن‌گاه پایهٔ پایین نمونه و یا یک کف صلب است استفاده کرد. برای اتصال حس‌گرها به میلهٔ رزوه شده از وسایل اتصال از جنس پلکسی گلاس (به آسانی قابل شکستن باشد)، همراه با جفت مهره‌های مناسب میله رزوه شده استفاده می‌شود. هم‌چنین برای ضربه زدن به میله بارگذاری متصل به کلاهک نمونه به‌صورت قائم و یا افقی، از چکش سر لاستیکی به وزن حدود ۲/۲ کیلوگرم استفاده می‌شود. جزئیات کامل روش کار با دستگاه ابداعی آقایی‌آرایی (۱۳۹۳) ارائه شده است.

## مصالح بررسی شده

در این پژوهش، مصالح درشت‌دانه تیزگوشه شنی و ماسه‌ای (داسیت) انتخاب شده است. منحنی دانه‌بندی مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی سه‌محوری در شکل ٤ ارائه شده است. مصالح شنی به‌کاررفته، برای آزمایش سه‌محوری با حداکثر اندازهٔ دانه ۱۹ mm است. ضمناً تمام مصالح بررسی شده در این تحقیق دانه‌هایی با اندازهٔ بزرگ‌تر از ۰/۲۵ mm هستند.




**شکل ٤. دانه‌بندی مصالح داسیت بررسی شده**

پیش از ساخت آزمونه‌ها، آزمایش‌های $G_s$ برای محاسبهٔ تخلخل اولیه آزمونه (ASTM –12 C127)، آزمایش تراکم استاندارد (ASTM D698–12) برای تعیین دانسیته خشک حداکثر انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها به‌ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که به‌علت متخلخل بودن دانه‌های مصالح، چگالی و دانسیته خشک حداکثر با افزایش اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابند.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

**جدول ۱. نتایج آزمایش چگالی ( $G_s$ ) مصالح بررسی شده**

| نام مصالح | $G_s$ |
|---|---|
| داسیت ۰/۲۵mm تا ۱۹ mm | ۲/٤ |
| داسیت ۹/۵mm تا ۱۹ mm | ۲/۳۵ |

**جدول ۲. نتایج آزمایش دانسیته خشک حداکثر مصالح بررسی شده**

| نام مصالح | $\gamma_d$ (kN/m$^3$) |
|---|---|
| داسیت ۰/۲۵mm تا ٤/۷۵ mm | ۱۵/۵٦ |
| داسیت ٤/۷۵mm تا ۱۹ mm | ۱٤/۳۸ |

هم‌چنین آزمایش سایش لس‌آنجلس براساس استاندارد ASTM C535-12 انجام شد. این آزمایش برای تعیین کیفیت نسبی مصالح که دارای کانی مشابه هستند، به‌کار می‌رود. مقادیر سایش لس‌آنجلس برای مصالح داسیت بررسی شده برای ۱۰۰۰ دور چرخش ٤۵/٦٪ به‌دست آمده است.

## ساخت نمونه

بعد از تهیه درصدهای وزنی نمونه مطابق دانه‌بندی مشخص، ساخت آن از طریق تراکم آن در پنج لایه از طریق کوبهٔ چوبی به وزن ۵/۲ کیلوگرم در قالب شکاف‌دار صورت می‌گیرد. قبل از ریختن مصالح در قالب برای چسباندن غشاء به اطراف قالب شکاف‌دار از مکش استفاده می‌شود. پس از تراکم آخرین لایه نمونه، مکش روی قالب برداشته شده و مکشی حدود kPa ۲۵–۱۵ بر داخل نمونه اعمال می‌شود و سپس قالب شکاف‌دار از اطراف نمونه باز می‌شود. تا نمونه تحت مکش اعمالی پابرجا بماند و خراب نشود. سپس نمونه تحت تنش محدودکننده مؤثر از طرق اعمال مکش در داخل نمونه قرار می‌گیرد.

بدین‌صورت که نمونه تحت خلاء به‌میزان kPa ۸۰–۳۰ قرار می‌گیرد تا کاملاً هوای داخل نمونه تخلیه گردد و تحت تنش مؤثر تحکیمی که باید آزمایش در آن حالت انجام شود، به حالت پایداری برسد. پس از کامل شدن اعمال تنش محدودکننده بر نمونه، تجهیزات مورد نیاز برای اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر و هم‌چنین دیگر حس‌گرهای اندازه‌گیر در اطراف و روی نمونه نصب می‌شود. در پایان این مرحله انجام آزمایش‌های ضربه و یا بارگذاری سیکلی روی نمونه خشک آغاز می‌شود.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

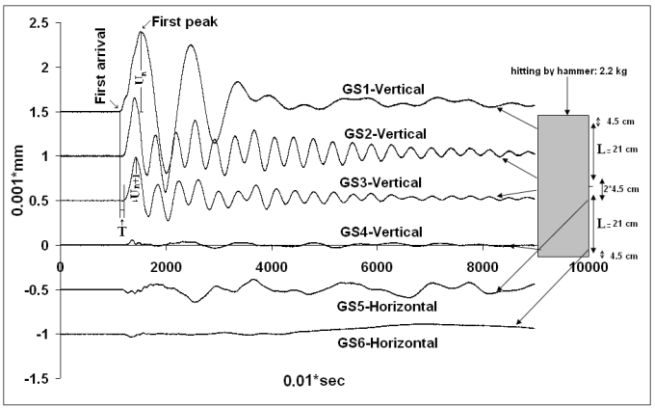
## نتایج آزمایش‌ها

در این تحقیق آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت موج، ضریب پواسن و در نتیجه مدول برشی حداکثر و نسبت میرایی در سطح کرنش‌های کوچک در سه سطح تنش محدودکننده ۳۰، ۵۰ و ۸۰ kPa با دستگاه ابداعی و اندازه‌گیری مدول یانگ (مدول برشی) و میرایی طبق ASTM D 3999 در تنش محدودکننده ۵۰ kPa انجام شده است. علت انتخاب سطح تنش محصورکننده کم، علاوه بر محدودیت دستگاه سه‌محوری استفاده شده در اعمال تنش محصورکننده، سطح تنش کم مورد انتظار در محل‌های کاربرد آن‌ها است.

### مدول برشی در کرنش‌های کوچک

شکل ۵ نمونه‌ای از نتایج تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی‌های ثبت شده در اثر اعمال ضربه برای GAP-SENSOR نصب‌شونده در راستای قائم روی نمونه نشان داده شده است که از آن به‌راحتی می‌توان مدت زمان رسیدن موج از دو حس‌گر متوالی را تعیین کرد.

نتایج آزمایش تعیین سرعت موج برشی و ضریب پواسن اندازه‌گیری شده، مدول یانگ و مدول‌های برشی ضربه و سه محوری سیکلی برای مصالح بررسی شده در جدول‌های ۳ و ٤ ارائه شده‌است. وزن مخصوص آب در محاسبات $10\ kN/m^3$ در نظر گرفته شده است.




**شکل ۵. نمونه‌ای از نتایج تاریخچهٔ-زمانی جابه‌جایی همراه با تعریف اولین رسید موج و اولین قله**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

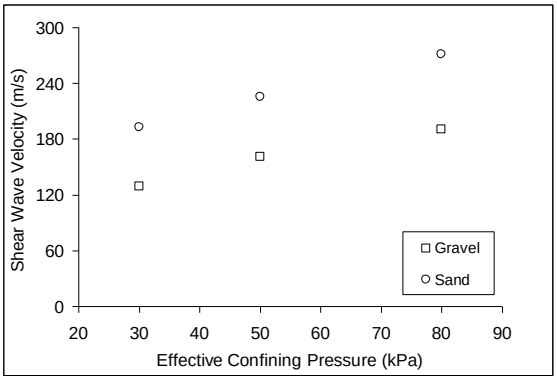
**جدول ۳. آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حداکثر برای داسیت شنی با دانسیته خشک حداکثر ۱٤/۳۸ $kN/m^3$**

| تنش محصور کننده (kPa) | سرعت موج برشی (m/s) | ضریب پواسن اندازه‌گیری شده | مدول یانگ (kPa) | مدول برشی ضربه (kPa) | مدول برشی سه‌محوری سیکلی (kPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 129.4 | 0.27 | 60929 | 24079 | |
| 50 | 160.6 | 0.23 | 90976 | 37093 | 36695 |
| 80 | 190.1 | 0.19 | 123263 | 51967 | |

**جدول ٤. آزمایش ضربه برای تعیین مدول برشی حداکثر برای داسیت ماسه‌ای با دانسیته خشک حداکثر ۱٥/٥٦ $kN/m^3$**

| تنش محدود کننده (kPa) | سرعت موج برشی (m/s) | ضریب پواسن اندازه‌گیری شده | مدول یانگ (kPa) | مدول برشی ضربه (kPa) | مدول برشی سه‌محوری سیکلی (kPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 192.7 | 0.23 | 141807 | 57880 | |
| 50 | 225.4 | 0.19 | 187504 | 79058 | 75894 |
| 80 | 271.4 | 0.14 | 262270 | 114572 | |

مقایسهٔ نتایج جدول‌های ۳ و ٤ نشان می‌دهد که مقادیر مدول برشی داسیت شنی نصف مقادیر نظیر داسیت ماسه‌ای است. این نتایج حاکی از اهمیت توأم دانسیته و دانه‌بندی است. شکل ٦ مقادیر سرعت موج برشی در تنش‌های محدودکننده مختلف برای مصالح بررسی شده را نشان می‌دهد. با افزایش تنش محدودکننده مقادیر سرعت موج برشی افزایش می‌یابد. هم‌چنین کاهش ضریب پواسن اندازه‌گیری شده با افزایش تنش محدودکننده در مصالح بررسی شده مشاهده است.




**شکل ٦. تغییرات سرعت موج برشی در برابر تنش محدودکننده مصالح ماسه‌ای و شنی داسیتی**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

## آزمایش‌های سه محوری سیکلی

مصالح ذکر شده در این تحقیق تحت آزمایش سه‌محوری سیکلی تحت شکل بار سینوسی طبق ASTM D 3999 برای اندازه‌گیری مدول و نسبت میرایی قرار گرفتند. در این تحقیق از GAP-SENSOR به‌عنوان وسیلهٔ اندازه‌گیری سرعت موج (در موقع اعمال ضربه) و هم‌چنین اندازه‌گیری کرنش در مکان‌های مناسب روی نمونه هنگام آزمایش سه‌محوری سیکلی استفاده شده است. در هر مرحله از بارگذاری پله‌ای حداکثر تا ٤٠ سیکل بار سینوسی اعمال می‌شود. داده‌های سیکل‌های ۱ تا حداکثر٤٠ ثبت و ذخیره می‌شود. سپس روند یاد شده در ترازهای کرنش بیش‌تر (حدود دو برابر مقدار دامنه کرنش اولیه) ادامه پیدا می‌کند تا حداکثر میزان کرنش محوری قابل حصول اندازه‌گیری شود. بارهای محوری، جابه‌جایی قائم و افقی موضعی نمونه به‌صورت هم‌زمان ثبت شدند. با تمهیدات به‌کارگرفته شده هر مؤلفه اندازه‌گیری شده در هر سیکل بارگذاری دارای حداقل ۵۰ سری قرائت داده است (استاندارد ASTM D 3999 حداقل نقطه داده مجاز در هر سیکل بارگذاری را ٤٠ تعیین کرده است). نتایج آزمایش‌ها شامل مقادیر مدول یانگ و برشی و نسبت میرایی در سیکل ۱۰ طبق استاندارد ASTM D 3999 محاسبه شدند. در نهایت با ضریب پواسن اندازه‌گیری شده، مقادیر مدول برشی قابل محاسبه است.

## نتایج آزمایش‌های خصوصیات دینامیکی مصالح

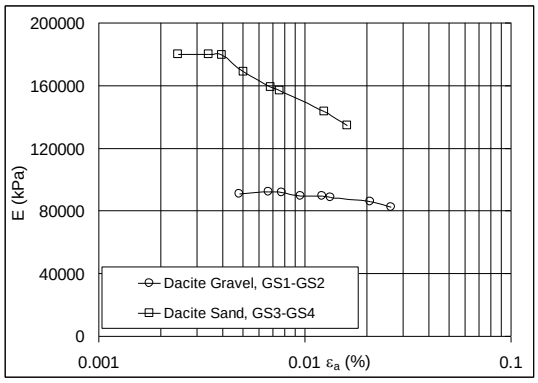
نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی E در برابر کرنش محوری، $\varepsilon_a$، (مقادیر سیکل ۱۰) برای مصالح بررسی شده در تنش محدودکننده ۵۰ kPa در شکل ۷ ارائه شده است. میزان تغییر مدول الاستیسیته برای دونوع خاک متفاوت است. به‌نظر می‌رسد که بخشی از این تفاوت‌ها مرتبط با میزان بسیج شدن قفل و بست دانه‌ای است. این عامل شاید یکی از دلایل انتخاب مصالح شنی یک‌نواخت باعنوان مذکور باشد.

با استفاده از روش برون‌یابی، مقادیر مدول یانگ در کرنش‌های کوچک (یا مدول برشی حداکثر) تخمین زده می‌شود و با مقادیر نظیر به‌دست آمده از آزمایش سرعت موج مقایسه می‌شود. نتایج این مقایسه‌ها در جدول‌های ۳ تا ٤ ارائه شده است. نکته جالب تطابق بسیار خوب مدول برشی سه‌محوری سیکلی با مدول برشی به‌دست آمده از آزمایش ضربه (روش

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

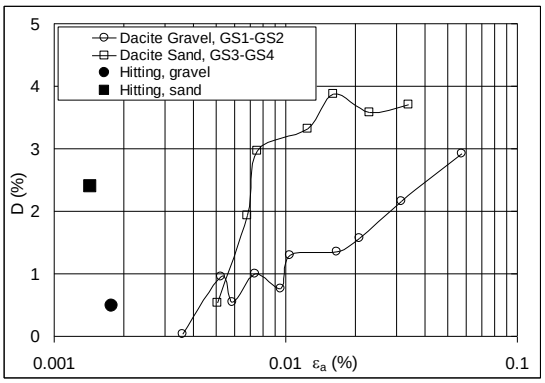
ابداعی) است. به‌طورکلی مقادیر مدول برشی آزمایش ضربه اندکی بیش‌تر از مقادیر نظیر آزمایش سه‌محوری سیکلی با اندازه‌گیری موضعی کرنش‌ها با GAP-SENSOR است.

در شکل ۸ نسبت میرایی مصالح داسیت شنی و ماسه‌ای در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده kPa ۵۰ با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی (ASTM D 3999) ارائه شده است. برای مصالح دانه‌ای بررسی شده در دانسیته خشک حداکثر، نسبت میرایی برای مصالح ماسه‌ای به‌علت قفل و بست دانه‌ای بیش‌تر، بزرگ‌تر از مقادیر نظیر برای مصالح شنی با دانه‌بندی بزرگ‌تر (در نتیجه قفل و بست دانه‌ای کم‌تر) است. نسبت میرایی مصالح در حالت ضربه هم از طریق اندازه‌گیری کاهش دامنهٔ جابه‌جایی در ترازهای مختلف نمونه مشابه آزمایش ستون تشدید (ASTM D 4015) محاسبه شد. به‌طورکلی مقادیر نسبت میرایی در حالت ضربه بیش از مقادیر نظیر در حالت آزمایش سه محوری سیکلی است و این نتایج با تحقیقات آقایی‌آرایی و همکاران [٦] مطابقت دارد.




**شکل ۷. مقادیر مدول یانگ در برابر کرنش محوری در تنش محدودکننده هم‌سان kPa ۵۰ برای مصالح داسیت شنی و ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]




**شکل ۸. مقادیر نسبت میرایی در برابر کرنش محوری در تنش محدودکنندهٔ هم‌سان ۵۰ kPa برای مصالح داسیت شنی و ماسه‌ای با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی و روش کاهش دامنه تحت ضربه**

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق تعدادی GAP-SENOR و یک دستگاه ثبت داده با سرعت بسیار زیاد که روی دستگاه سه‌محوری سیکلی معمولی قطر بزرگ نصب شده، برای اندازه‌گیری خواص دینامیکی و مقایسه نتایج مصالح داسیت ماسه‌ای و شنی استفاده شده است. مهم‌ترین نتایج این تحقیق بدین‌شرح است:

- از مزیت‌های بسیار مهم GAP-SENSOR در مقایسه با دیگر اندازه‌گیرها، پایداری و سطح پایین نویز است. به‌طوری‌که برعکس المان خمشی و حتی شتاب سنج‌ها، تشخیص زمان رسیدن موج از یک حس‌گر به حس‌گر بعدی آسان است. ضمناً با توجه به نصب حس‌گرها با فاصله‌ای از کلاهک بالای نمونه، خطاهای مربوط به تماس نداشتن کلاهک بالایی با نمونه و ناسازگاری حذف می‌شود.
- با افزایش تنش محدودکننده مقادیر سرعت موج برشی افزایش می‌یابد.
- مقادیر مدول برشی داسیت شنی در دانسیتهٔ خشک حداکثر نصف مقادیر نظیر داسیت ماسه‌ای در دانسیتهٔ خشک حداکثر مربوط است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

- استفاده از ایدهٔ کاهش دامنه جابه‌جایی (مشابه ایدهٔ کاهش دامنه ارتعاش در آزمایش ستون تشدید در حالت ارتعاش آزاد) در ترازهای مختلف نمونه برای محاسبهٔ میرایی تحت ضربه از ابتکارات موجود در این تحقیق است.
- در روش ابداعی با توجه به ماهیت ضربه‌ای نیروی اعمال شده (سرعت بارگذاری زیاد یا فرکانس بیش‌تر) مقادیر مدول برشی و خصوصاً نسبت میرایی اندکی بیش‌تر از مقادیر نظیر در آزمایش‌های سه‌محوری سیکلی تحت میزان بارگذاری کوچک‌تر است.
- آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت موج حداکثر در تنش محدود کننده ۵۰ kPa و نسبت میرایی حاصل از روش ابداعی حاضر در تطابق بسیار مناسبی با اندازه‌گیری مدول برشی و نسبت میرایی آزمایش سه‌محوری سیکلی با اندازه‌گیری موضعی کرنش‌ها با GAP-SENSOR است. روش مشابهی برای دیگر تنش‌های محصورکننده قابل انتظار است. این نتایج به ما اطمینان می‌دهد که دستگاه اختراعی مذکور قابلیت استفاده برای همهٔ نمونه‌های خاکی و سنگ‌ریزه‌ای را دارد.
- از دیگر مزایای این دستگاه و روش ارائه شده در این تحقیق می‌توان به صرفه‌جویی اقتصادی چشم‌گیری (زمان و هزینه) خصوصاً در بخش آزمایش‌های ژئوتکنیک سد خاکی و سنگ‌ریزه‌ای با توجه به استفاده از نمونه بدون تاریخچه بارگذاری چشم‌گیر برای ادامه آزمایش‌ها تحت شرایط خشک و اشباع اشاره کرد.

## تشکر و قدردانی

این تحقیق با کمک مالی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و امکانات آزمایشگاهی آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه توکیو کشور ژاپن انجام شد که بدین‌وسیله از آن‌ها تشکر و قدردانی می‌کنیم.

## منابع

1. ASTM C127, "Test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate" (2012).

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

2. ASTM C535, "Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine" (2012).
3. ASTM D 4015, "Standard test methods for modulus and damping of soils by the Resonant-Column method, Reapproved 2000" (1992).
4. ASTM D3999, "Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus" (2006).
5. ASTM D698, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort" (600 kN-m/m$^3$) (2012).
6. Aghaei Araei A., Razeghi H. R., Tabatabaei S. H., Ghalandarzadeh A., "Loading frequency effect on stiffness, damping and cyclic strength of modeled rockfill materials", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 33 (2012) 1-18.
7. Alramahi B., Alshibli K.A., Fratta D., Trautwein, S., "A suction-control apparatus for the measurement of P and S-wave velocity in soils", Geotechnical Testing Journal (GTJ), ASTM. Vol. 31(1) (January) (2008) 12-23, DOI: 10.1520/GTJ100646.
8. Choi J.S., Song K.I., Cho G.C., Lee S.W., "Characterization of unsaturated particulate materials using elastic and electromagnetic waves", Key Eng. Mater., Vol. 270-273 (2004)1653-1658.
9. Fratta D., Alshibli K.A., Tanner W.M., Roussel L., "Combined TDR and P-wave velocity measurements for the determination of in situ soil density", Geotech. Test. J., 28(6) (2005) 553-563.
10. Ham A., Wang J., Stammer J.G., "Relationships between particle shape characteristics and macroscopic damping in dry sands", Journal of

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Posted ahead of print 16 November(2011). doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000663

11. Kokusho T., Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range. Soils and Foundations, 20(1980) 45-60.
12. Kokusho T., Tanaka Y., "Dynamic properties of gravel layers investigated by in situ freezing sampling", Proceedings of the ASCE Specialty conference on Ground Failures under Seismic Conditions, Atlanta (1994) 121-40.
13. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J., "The Rocks Physics", Handbook, Cambridge University Press, Cambridge (1998).
14. Richart F.E., Hall J.R., Wood R.D., "Vibration of Soils and Foundations", Prentice Hall (1970).
15. Rollins K., M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily W.D., "Shear modulus and damping relationships for gravels, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering", ASCE, 124(5) (1998) 398-405.
16. Santamarina J.C., Klein K.A., Fam M.A., "Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring", New York, Johan Wiley&Sons, USA (2001).
17. Seed H.B., Idriss I.M., "Soil moduli and damping factors for dynamic analysis", Report No. EERC 70- 10, University of California, Berkeley (1970).
18. Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu K., "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", J. Geotech. Eng., 112(11) (1986) 1016-1032.
19. Vucetic M., Dobry R., "Effect of soil plasticity on cyclic response", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.117 (1991) 89-107.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]

۲۰. آقایی‌آرایی ع.، *ارزیابی استفاده از حس‌گر غیرتماسی در اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر در خاک‌های دانه‌ای و شنی لایه‌بندی شده*، گزارش تحقیقاتی، شماره نشر: گ-۷۰۲، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۹۳).

۲۱. آقایی‌آرایی ع.، *دستگاه اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر مصالح سنگ‌ریزه‌ای و سنگی با استفاده از GAP-SENSOR با فرکانس پاسخ بالا*، شماره ثبت اختراع: ٦٦٥٧٤، تاریخ ثبت اختراع: ۱۳۸۹/۰٦/۲۹ (۱۳۸۹).

۲۲. آقایی‌آرایی ع.، *امکان‌سنجی نصب دستگاه اندازه‌گیری مدول برشی حداکثر (GAP-SENSOR با فرکانس پاسخ بالا) بر روی دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ برای مصالح ماسه‌ای و خرده لاستیک*، گزارش طرح پژوهشی، معاونت آموزش و برنامه‌ریزی، بنیاد ملی نخبگان، پاییز (۱۳۹۱).

۲۳. آقایی‌آرایی ع.، رازقی ح ر.، هاشمی طباطبایی س.، قلندرزاده ع.، *بررسی اثر محتوای فرکانسی بر خواص خاک‌های درشت‌دانه*، شماره قرارداد۱۷۷۵-۱ (۱۳۸۷) پروژهٔ تحقیقاتی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۸).

۲٤. آقایی‌آرایی ع.، هاشمی‌طباطبایی س.د.، قلندرزاده ع.، *ارزیابی مدول برشی و میرایی مصالح شنی*، پروژهٔ تحقیقاتی، شماره قرارداد ٤٤٦٩-۳ (۱۳۸٦/٦/۲۵)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۷).

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.1.1.1 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.1.3227 ]