بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای علیرضا اردکانی رساله ۲٤ واحدی خود را **با عنوان تعیین خواص ارتجاعی سبك دانه های مصنوعی با استفاده از تئوری مواد مرکب ، روش عددی و مطالعات آزمایشگاهی** در تاریخ ۱۳۹۱/۹/۱۳ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی عمران - خاک وپی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمود یزدانی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر شریف شاه بیك	استادیار	
استاد ناظر	دکتر علی کمك پناه	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علی اکبر گلشنی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمود مهرداد شکریه	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمد شکرچی زاده	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علی اکبر گلشنی	استادیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب علیرضا اردکانی دانشجوی رشته مهندسی عمران ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۷ مقطع دکتری دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:

تاریخ: ۹۱/۹/۱۹

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب علیرضا اردکانی دانشجوی رشته مهندسی عمران مقطع دکتری تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: علیرضا اردکانی

تاریخ و امضا: ۹۱/۹/۱۲

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

رساله دوره دکتری رشته مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی

تعیین خواص ارتجاعی سبک‌دانه‌های مصنوعی با استفاده از تئوری مواد مرکب، روش عددی و مطالعات آزمایشگاهی

علیرضا اردکانی

استاد راهنما:

محمود یزدانی

استاد مشاور:

شریف شاه بیک

آذر ۱۳۹۱

تشکر و قدردانی

با سپاس از عنایات خداوند که بار دیگر به لطف بیکرانش توانستم گامی مثبت در ادامه راه زندگی بردارم، که بی تردید اگر لطفش نبود، سختی‌های راه، ادامه آن را بسی دشوار می‌نمود.

در اینجا برخود لازم می‌دانم از زحمات استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر یزدانی که مسیر را برای انجام این پژوهش هموار ساختند، تشکر نمایم. بی تردید بدون کمک و راهنمایی ایشان امکان انجام این پژوهش برای اینجانب امکان‌پذیر نبود.

از استاد عزیزم آقای دکتر شاه‌بیک بابت مشاوره و همکاری مؤثر ایشان در به ثمر رسیدن این کار کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از اساتید گرانقدر آقایان دکتر کمک‌پناه، دکتر گلشنی، دکتر شکرچی‌زاده و دکتر شکریه که با ارائه پیشنهادات ارزنده در جلسات تصویب پروپزال، پیش دفاع و دفاع زحمت تبیین مسیر و داوری این تحقیق را کشیدند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از زحمات اساتید گرانقدر آقایان دکتر یثربی، دکتر علیایی و دکتر شجاع که در طول دوره تحصیلات دکتری از محضر ایشان بهره‌های فراوان برده‌ام، تشکر نمایم.

از کلیه پرسنل شرکت لیکا ایران به ویژه آقای دکتر نمدمالیان اصفهانی، مهندس رفعت‌خواه و مهندس محمدی که در انجام این تحقیق مدیون حمایت‌های ویژه آنان هستم، سپاسگزارم.

در خاتمه از کلیه همکلاسی‌ها و دوستان، بویژه آقایان جواد هدایتی، محسن ورمزیاری و امیرحسین خشای که در تمام دوره تحصیلاتم پیوسته یار و همراه من بودند، کمال تشکر را دارم و برایشان آرزوی توفیق و سربلندی را خواهانم.

علیرضا اردکانی
آذر ماه ۱۳۹۱

چکیده

با توجه به کاربرد سبک‌دانه‌های مصنوعی در صنایع مختلف، تعیین خواص این نوع سنگ‌دانه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. به لحاظ ماهیت فیزیکی و عدم وجود سنگ مادر، تعیین ویژگی‌های ارتجاعی سبک‌دانه‌های مصنوعی دارای پیچیدگی‌های ویژه‌ای می‌باشد. در حال حاضر دانه‌های رس منبسط شده یا لیکا مهمترین نوع سبک‌دانه صنعتی کشور است. این سبک‌دانه با استفاده از رس انبساط پذیر به روش فرآیند تر در داخل کوره گردان تولید می‌شود. محصول تولیدی غالباً دارای قطر صفر الی ۲۵ میلیمتر است و معمولاً با افزایش قطر تخلخل آنها افزایش و وزن مخصوص آنها کاهش می‌یابد. همچنین با تغییر در شرایط و فرآیند تولید، می‌توان دانه با وزن مخصوص مختلف تولید کرد. از آنجایی که استانداردی برای تعیین مستقیم مدول ارتجاعی این سبک‌دانه‌ها وجود ندارد، از ترکیب روش آزمایشگاهی، با روش تئوری مواد مرکب (مایکرومکانیک) و عددی برای تعیین این پارامترها استفاده شده است. در این تحقیق با توجه به ماهیت دانه‌های لیکا، شکل آنها به صورت کروی کامل فرض شده است. در بخش آزمایشگاهی به منظور تعیین اثر اندازه و وزن مخصوص بر خواص فیزیکی و مکانیکی دانه‌های لیکا، مطالعه جامع بر روی هشت نوع دانه (در دو گروه معمولی و سازه‌ای با چهار اندازه مختلف) صورت گرفته است. با ترکیب سبک‌دانه با ملات ماسه سیمان و ساخت نمونه‌هایی استوانه‌ای استاندارد از مواد مرکب، مشخصات ارتجاعی ماتریس و ماده مرکب تعیین شده است. همچنین با استفاده گچ و دانه‌های فوم پلی‌استایرن و شبیه‌سازی سنگ متخلخل، به بررسی اثر تخلخل بزرگ مقیاس بر مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ پرداخته شده است. در بخش تئوری مواد مرکب با ارائه سه مثال به مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌های همگن‌سازی پرداخته شده است و سپس با استفاده از معکوس مدل‌های همگن‌سازی مشخصات ارتجاعی اینکلوژن بر اساس ویژگی‌های ماتریس و ماده مرکب تعیین شده است. در بخش عددی، با مدلسازی سه بعدی اجزا محدود با چیدمان دانه‌ها به صورت منظم و یک حالت تصادفی، به مقایسه مشخصات ارتجاعی ماده مرکب، با مدل‌های همگن‌سازی پرداخته شده است.

نتایج عددی حاکی از تاثیر ناچیز نحوه توزیع اینکلوژن، در حالت منظم و یک حالت تصادفی، بر مشخصات ماده سخت مرکب دارد. در حالت توزیع منظم، مدول ارتجاعی ماده مرکب، دارای نتایج نزدیک به مدل موری-تاناکا و در حالت توزیع تصادفی نتایج بسیار نزدیک به مدل لایلنس می‌باشد. همچنین برای ماده سخت مرکب نتایج روش عددی بسیار نزدیک به مدل موری-تاناکا می‌باشد. با مقایسه نتایج تحلیلی با آزمایشگاهی، در نمونه‌های سنگ متخلخل شبیه‌سازی شده، مشاهده شد که تطابق مناسبی بین مدل‌های همگن‌سازی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و می‌توان ارتباط بین مدول ارتجاعی با میزان حفرات بزرگ مقیاس را توسط روابط نمایی بیان کرد. بر مبنای مدل موری-تاناکا، در دامنه اندازه ۴ الی ۱۴ میلیمتر، مدول ارتجاعی دانه‌های لیکا معمولی در محدوده ۰/۶ الی ۲/۳GPa و مدول ارتجاعی دانه‌های لیکا سازه‌ای در محدوده ۲/۷ الی ۶/۳GPa قرار دارد. ارتباط مدول ارتجاعی لیکای ایران با وزن مخصوص دانه‌ای به صورت خطی و با اندازه دانه به صورت نمایی می‌باشد. همچنین متوسط ضریب پوآسون بدست آمده دانه‌های معمولی و سازه‌ای به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۲۸ تخمین زده شده است.

کلید واژه: سبک‌دانه مصنوعی، دانه رس منبسط شده، سنگ متخلخل، مشخصات ارتجاعی، اندازه دانه، مدل‌های همگن سازی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ه
فهرست جدول‌ها ..... و
فهرست شکل‌ها ..... ز

فصل اول-مقدمه ۱
۱-۱- کلیات ۱
۱-۲- جایگاه سبک‌دانه‌های مصنوعی در جهان و ایران ۳
۱-۳- هدف از تحقیق ۴
۱-۴- روش تحقیق ۶
۱-۵- فرضیات تحقیق ۶
۱-۶- نوآوری‌های این تحقیق ۶
۱-۷- تقسیم‌بندی و تعریف فصول ۷

فصل دوم- جمع‌آوری اطلاعات و تحقیقات گذشته ۱۰
۲-۱- مقدمه ۱۰
۲-۲- فرآیند تولید سبک‌دانه‌ها ۱۰
۲-۳- ویژگی‌های فیزیکی سبک‌دانه‌ها ۱۱
۲-۳-۱- وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها ۱۱
۲-۳-۲- شکل و بافت سطحی ۱۳
۲-۳-۳- جذب آب ۱۳
۲-۳-۴- ساختار داخلی ۱۳
۲-۴- ویژگی‌های مکانیکی سبک‌دانه‌ها ۱۵
۲-۴-۱- مقاومت ۱۵
۲-۴-۱-۱- آزمایش سایش لس‌آنجلس ۱۶
۲-۴-۱-۲- آزمایش ارزش خردشدگی و ارزش ده درصد ۱۶
۲-۴-۱-۳- آزمایش مقاومت در برابر خردشگی ۱۷
۲-۴-۱-۴- آزمایش ملات استاندارد ۱۷
۲-۴-۱-۵- روش بر مبنای مکانیک دانه‌ای ۱۷
۲-۴-۱-۶- آزمایش ظرفیت مقاومتی ۱۸
۲-۴-۱-۷- تعیین مقاومت بر اساس تئوری مواد مرکب ۱۹
۲-۴-۲- مدول ارتجاعی ۲۱
۲-۵- برخی از تحقیقات انجام شده روی رس منبسط شده و لیکا ۲۵
۲-۶- تاثیر تخلخل بر مشخصات مکانیکی سنگ‌های طبیعی و شبیه‌سازی شده ۲۷

۲-۷- ریزساختار ماده مرکب سیمانی سبک‌دانه‌ها ۳۱
۲-۸- جمع بندی فصل دوم ۳۵
فصل سوم- مبانی روش میکرومکانیک و همگن‌سازی ۳۷
۳-۱- مقدمه ۳۷
۳-۲- مفهوم میکرومکانیک ۳۷
۳-۳- المان معرف حجم (RVE) ۳۹
۳-۳-۱- مفهوم المان معرف حجم ۳۹
۳-۳-۲- اندازه المان معرف حجم ۴۰
۳-۳-۳- شرایط مرزی معین شده ۴۲
۳-۳-۴- میانگین تنش و میانگین کرنش ۴۳
۳-۴- شرایط هیل-ماندل ۴۵
۳-۵- مدول ارتجاعی موثر ۴۵
۳-۶- تانسور تمرکز تنش و کرنش ۴۷
۳-۷- اپراتور ارتجاعی همگن کننده ۴۸
۳-۸- تئوری کرنش ویژه و تعاریف اینکلوژن و ناهمگنی ۴۹
۳-۹- معادلات پایه‌ای ارتجاعی در حالت کرنش ویژه ۵۰
۳-۱۰- رابطه‌های عمومی برای میدان ارتجاعی ۵۲
۳-۱۰-۱- حل تناوبی ۵۲
۳-۱۰-۲- روش سری فوریه و انتگرال فوریه ۵۳
۳-۱۰-۳- روش تابع گرین ۵۴
۳-۱۱- تابع گرین برای محیط‌های ایزوتروپ ۵۵
۳-۱۲- ناپیوستگی‌های میدان ارتجاعی ۵۸
۳-۱۳- مسئله اشلبی ۵۹
۳-۱۳-۱- حل اشلبی برای اینکلوژن بیضیگون ۶۱
۳-۱۳-۲- تانسورهای اشلبی و ویژگی‌های متناظر با آنها ۶۴
۳-۱۴- جمع بندی فصل سوم ۶۵
فصل چهارم-مدل‌های همگن‌سازی و استفاده آنها در تعیین ویژگی اینکلوژن ۶۷
۴-۱- مقدمه ۶۷
۴-۲- حالت اینکلوژن مجزا ۶۷
۴-۳- برخی از روش‌های همگن‌سازی ۶۹
۴-۳-۱- مدل ویت ۷۰
۴-۳-۲- مدل رئوس ۷۲
۴-۳-۳- مدل اینکلوژن رقیق ۷۳
۴-۳-۴- مدل خودسازگار ۷۵

۴-۳-۵- مدل موری-تاناکا ۷۷
۴-۳-۶- مدل اینکلوژن دوگانه ۸۰
۴-۳-۷- مدل لایلنس ۸۵
۴-۳-۸- روش دیفرانسیلی ۸۶
۴-۴- مقایسه مدل‌های همگن‌سازی ۸۸
۴-۵- تعیین مشخصات اینکلوژن با استفاده از مدل‌های همگن‌سازی ۹۲
۴-۵-۱- روش سعی و تکرار ۹۳
۴-۵-۲- استفاده از معادلات و روابط بیان شده ۹۴
۴-۶- مواد مرکب چندفازی ۹۸
۴-۷- جمع بندی فصل چهارم ۱۰۰
فصل پنجم- مطالعات آزمایشگاهی ۱۰۲
۵-۱- مقدمه ۱۰۲
۵-۲- مصالح مورد استفاده ۱۰۲
۵-۲-۱- سبک‌دانه ۱۰۲
۵-۲-۲- مصالح مورد استفاده از ماتریس سیمانی ۱۰۴
۵-۳- آزمایش‌های انجام شده روی سبک‌دانه ۱۰۶
۵-۳-۱- درصد جذب آب ۱۰۶
۵-۳-۲- وزن مخصوص ۱۰۶
۵-۳-۳- آزمایش لس‌آنجلس ۱۰۸
۵-۳-۴- تعیین مقاومت خردشدگی ۱۰۹
۵-۳-۵- آزمایش ارزش ضربه‌ای ۱۱۰
۵-۳-۶- آزمایش ارزش خردشدگی و ده درصد ۱۱۱
۵-۴- ساخت و آماده سازی ماده مرکب ۱۱۲
۵-۵- تعیین مقاومت و مشخصات ارتجاعی نمونه‌ها ۱۱۶
۵-۶- بررسی نتایج آزمایش‌های بر روی نمونه‌های مرکب ۱۲۵
۵-۷- مطالعات میکروسکوپی ۱۲۹
۵-۷-۱- بررسی ریزساختار دانه ۱۲۹
۵-۷-۲- بررسی ناحیه تماس دانه‌ها و خمیر سیمان ۱۳۳
۵-۸- بررسی ته کوره ۱۴۱
۵-۹- بررسی تاثیر تخلخل بر سنگ‌های شبیه‌سازی شده ۱۴۳
فصل ششم- مدلسازی عددی و مقایسه آن با مدل‌های تحلیلی همگن‌سازی ۱۴۸
۶-۱- مقدمه ۱۴۸
۶-۲- کلیات نحوه مدلسازی عددی ۱۴۸
۶-۳- بررسی نحوه قرار گیری دانه بر مدول موثر سلول واحد ۱۵۰

۶-۴- مدلسازی ماده مرکب ۱۵۴
۶-۴-۱- مشخصات مدل در حالت توزیع منظم دانه ۱۵۴
۶-۴-۲- مشخصات مدل در حالت توزیع تصادفی دانه ۱۵۵
۶-۴-۳- مشخصات ارتجاعی ماده مرکب ۱۵۷
۶-۵- مقایسه نتایج همگن‌سازی روش عددی و مدل‌های تحلیلی ۱۶۰
۶-۶- جمع بندی فصل ششم ۱۶۳

فصل هفتم- ترکیب مطالعات آزمایشگاهی با روش تحلیلی و تعیین مشخصات ارتجاعی دانه‌های لیکا ۱۶۵

۷-۱- مقدمه ۱۶۵
۷-۲- بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی گچ و فوم ۱۶۵
۷-۳- ارائه روابط ساده شده و تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه لیکا ۱۶۸
۷-۴- ارتباط مدول ارتجاعی دانه لیکا با سایر مشخصات آن ۱۷۲
۷-۵- تاثیر ضریب پوآسون اینکلوژن بر مشخصات ارتجاعی ماده مرکب ۱۷۴
۷-۶- تاثیر تغییرات ضریب پوآسون ماده مرکب بر مشخصات ارتجاعی اینکلوژن ۱۷۷
۷-۷- جمع‌بندی فصل هفتم ۱۸۰

فصل هشتم- نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۸۲

۸-۱- نتیجه‌گیری ۱۸۲
۸-۲- پیشنهادات برای ادامه تحقیق ۱۸۴

ضمیمه أ -روابط بین مجموعه ضرایب ارتجاعی ۱۸۵

ضمیمه ب -فرم ماتریسی قانون هوک ۱۸۶

ضمیمه ج - برنامه تولید مختصات تصادفی دانه‌های کروی درون محیط مکعبی ۱۸۷

فهرست مراجع ۱۸۸

واژه نامه فارسی به انگلیسی ۱۹۵

واژه نامه انگلیسی به فارسی ۱۹۸

فهرست علایم و نشانه‌ها

پارامترهای تانسوری

ε	تانسور کرنش کل	e	تانسور کرنش ارتجاعی
σ	تانسور تنش	ε^0	کرنش دوردست
$\tilde{A}$	تانسور تمرکز کرنش محلی	$\tilde{B}$	تانسور تمرکز تنش محلی
I	تانسور واحد مرتبه چهار	A	تانسور تمرکز کرنش ارتباط دهنده اینکلوژن و RVE
A'	تانسور تمرکز کرنش ارتباط دهنده اینکلوژن و ماتریس	B	تانسور تمرکز تنش ارتباط دهنده اینکلوژن و RVE
B'	تانسور تمرکز تنش ارتباط دهنده اینکلوژن و ماتریس	C	تانسور سختی ارتجاعی
D	تانسور نرمی ارتجاعی	ε^*	کرنش ویژه
S	تانسور اشلبی		

پارامترهای برداری

u	بردار جابجایی	x	بردار موقعیت
n	بردار عمود بر سطح	t	بردار ترکشن

پارامترهای اسکالر

S	مساحت	V	حجم
ν_1	نسبت حجمی اینکلوژن	ν_0	نسبت حجمی ماتریس
δ	تابع دلتای کرونکر	ν	ضریب پوآسون
λ و μ	ضرایب لامه	E	مدول ارتجاعی
K	مدول بالک	G	مدول برشی
f_c'	مقاومت فشاری		

نشانه‌ها

α^0	پارامتر α دوردست	$<\alpha>_\beta$	پارامتر α متوسط در فاز β
$\overline{\alpha}$	پارامتر α ماکرو	α_1 و α_i	پارامتر α مربوط به اینکلوژن
α_c	پارامتر α مربوط به ماده مرکب	α_0 و α_m	پارامتر α مربوط به ماتریس

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: حداکثر وزن مخصوص توده‌ای سبک‌دانه‌ها در بتن سازه‌ای بر اساسASTM ۱۲
جدول ۲-۲: دانه‌بندی سبک‌دانه‌ها در بتن سازه‌ای بر اساس ASTM ۱۲
جدول ۲-۳: ویژگی‌های فیزیکی چند نوع سبک‌دانه متداول در کشورهای مختلف ۱۴
جدول ۲-۴: مدول ارتجاعی بتن تابعی از مدول ارتجاعی اجزای آن ۲۱
جدول ۴-۱: مشخصات مشخصات مصالح در مثال‌های بیان شده ۸۹
جدول ۵-۱: نام، اندازه و نوع سبک‌دانه‌های مورد استفاده ۱۰۳
جدول ۵-۲: مشخصات شیمیایی سبک‌دانه‌های مورد استفاده ۱۰۴
جدول ۵-۳: مشخصات سیمان مصرفی ۱۰۵
جدول ۵-۴: تعیین الک جداکننده در آزمایش ارزش ضربه‌ای و ارزش ده درصد ۱۱۱
جدول ۵-۵: طرح اختلاط‌های مورد استفاده (کیلوگرم بر متر مکعب) ۱۱۳
جدول ۵-۶: مشخصات نمونه‌های مرکب حاوی دانه‌های M1 و M2 ۱۲۱
جدول ۵-۷: مشخصات نمونه‌های مرکب حاوی دانه‌های M3 و M4 ۱۲۲
جدول ۵-۸: مشخصات نمونه‌های مرکب حاوی دانه‌های S1 و S2 ۱۲۳
جدول ۵-۹: مشخصات نمونه‌های مرکب حاوی دانه‌های S3 و S4 و ماتریس ۱۲۴
جدول ۵-۱۰: تعداد تقریبی دانه در نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده ۱۴۱
جدول ۵-۱۱: نسبت حجمی ناحیه انتقال در نمونه‌های ساخته شده ۱۴۱
جدول ۵-۱۲: نام گذاری و مشخصات نمونه‌های شبیه‌سازی شده ۱۴۴
جدول ۶-۱: ابعاد مکعب سلول واحد (میلیمتر) ۱۵۱
جدول ۶-۲: بعد مکعب و تعداد المان در حالت توزیع منظم ۱۵۵
جدول ۶-۳: مشخصات مدل‌ها در حالت توزیع تصادفی ۱۵۵
جدول ۶-۴: مدول ارتجاعی ماده مرکب مثال ۱ در سه جهت X، Y و Z (GPa) ۱۵۹
جدول ۷-۱: رابطه بین مدول ارتجاعی نرمالیزه شده و درصد حجمی حفرات در محدوده ۰ الی ٪۳۰ ۱۶۷
جدول ۷-۲: رابطه تعیین مشخصات ارتجاعی اینکلوژن توسط روش موری-تاناکا ۱۶۸
جدول ۷-۳: میزان ضریب پوآسون در نظر گرفته شده برای ماتریس و نمونه‌های مرکب ۱۶۹
جدول ۷-۴: مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های سری M ۱۷۰
جدول ۷-۵: مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های سری S ۱۷۰
جدول ۷-۶: ضریب پوآسون سبک‌دانه‌های سری M ۱۷۱
جدول ۷-۷: ضریب پوآسون سبک‌دانه‌های سری S ۱۷۱
جدول أ-۸-۱: روابط بین مجموعه ضرایب ارتجاعی ۱۸۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: مقایسه وزنی-حجمی سبک‌دانه‌های مصنوعی با سایر سبک‌دانه‌های طبیعی ۱
شکل ۱-۲: کاربردهای مختلف سبک‌دانه‌ها در حوزه ژئوتکنیک ۲
شکل ۱-۳: پروژه‌های اجرا شده با استفاده از بتن سبک لیکا ۴
شکل ۲-۱: ارتباط بین وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای برای سبک‌دانه‌های مختلف ۱۲
شکل ۲-۲: توزیع شماتیک تخلخل داخل سبک‌دانه‌ها ۱۴
شکل ۲-۳: محدوده وزن مخصوص و نوع بتن ساخته شده با انواع مختلف سبک‌دانه‌ها ۱۵
شکل ۲-۴: دانه در مواجه با بارهای خارج از مرکز بر روی مرزهایش ۱۷
شکل ۲-۵: تخمین مقاومت فشاری دانه بر اساس روش چانگ و سو ۱۸
شکل ۲-۶: نمودار شماتیک مقاومت بتن نسبت به مقاومت ملات در بتن‌های معمولی و سبک‌دانه ۱۹
شکل ۲-۷: نمایش شماتیک رابطه ساده شده میان مقاومت بتن، مقاومت ماتریس و تنش فشاری انتقال یافته توسط دانه ۲۰
شکل ۲-۸: ارتباط مرتبه دوم بین مدول دینامیکی و وزن مخصوص سبک‌دانه‌های مختلف ۲۲
شکل ۲-۹: مقایسه ارتباط خطی و مرتبه دوم بین مدول دینامیکی و وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها ۲۳
شکل ۲-۱۰: ارتباط بین مدول ارتجاعی سبک‌دانه در تحقیقات یانگ ۲۴
شکل ۲-۱۱: رابطه میان مدول ارتجاعی دانه، ملات و بتن و نسبت حجمی دانه ۲۴
شکل ۲-۱۲: مدل دانه مرکزی ۲۵
شکل ۲-۱۴: یک نمونه نمودار ظرفیت مقاومتی لیکای ۷۰۰ ..... ۲۶
شکل ۲-۱۵: مدل موازی، سری و ترکیب آنها برای بررسی بتن سبک‌دانه لیکا ۲۷
شکل ۲-۱۶: تاثیر قطر و مقاومت دانه بر میزان تنش در لحظه گسیختگی ۲۷
شکل ۲-۱۷: تخلخل بزرگ مقیاس در سنگ توف طبیعی ۲۸
شکل ۲-۱۸: تخلخل بزرگ مقیاس در سنگ توف طبیعی ۲۹
شکل ۲-۱۹: نمونه مدل‌های توضیع تصادفی حفرات توسط آوار و همکاران ۲۹
شکل ۲-۲۰: تاثیر تخلخل و ضریب پوآسون زمینه، بر مدول ارتجاعی نرمالیزه شده ۲۹
شکل ۲-۲۱: تاثیر تخلخل ماتریس بر ضریب پوآسون ماده متخلخل ۳۰
شکل ۲-۲۲: اثر تخلخل بر مدول ارتجاعی و ضریب پوآسون ۳۰
شکل ۲-۲۳: اثر تخلخل بر مدول ارتجاعی نرمالیزه شده حاصل از روش عددی و اطلاعات آزمایشگاهی ۳۱
شکل ۲-۲۴: نمایش لایه مرزی در اطراف سنگ‌دانه در بتن ۳۲
شکل ۲-۲۵: تفاوت ناحیه تماس میان سیمان و سنگ‌دانه معمولی و سبک‌دانه ۳۳
شکل ۲-۲۶: الف) تصویر الکترون بازگشتی از نفوذ سطحی خمیر سیمان به سبکدانه لیکا ب) تصویر X-ray کلسیم از ناحیه مربوط به شکل الف ۳۳

شکل ۲-۲۷: حجم واقعی دانه و نفوذ خمیر سیمان به حفرات سطحی سبک‌دانه ۳۴
شکل ۲-۲۸: تصاویر میکروسکوپی از ناحیه مرزی در سبک‌دانه رسی ۳۴
شکل ۲-۲۹: نمونه‌ای از نسبت تعداد حفرات بر واحد سطح، در خمیر سیمان و ناحیه انتقال در سه سبک‌دانه رسی ۳۵
شکل ۳-۱: ماده مرکب ساندویچی ساده ۳۸
شکل ۳-۲: ماده مرکب دارای ناهمگنی بیضوی ۳۸
شکل ۳-۳: بررسی مقیاس میکرو و ماکرو در مصالح ۴۰
شکل ۳-۴: اندازه مورد نیاز برای یک المان معرف حجم ۴۰
شکل ۳-۵: فرآیند تعیین اندازه RVE ۴۱
شکل ۳-۶: شرایط مرزی معین شده بصورت کرنش یکنواخت ۴۲
شکل ۳-۷: شرایط مرزی معین شده بصورت کرنش یکنواخت ۴۳
شکل ۳-۸: یک المان معرف حجم سه بعدی از یک کامپوزیت دو فازی ۴۴
شکل ۳-۹: فرآیند همگن‌سازی ۴۸
شکل ۳-۱۰: ناحیه D و Ω ۵۰
شکل ۳-۱۱: کره واحد S^2 و دایره واحد S^1 ..... ۵۷
شکل ۳-۱۲: مرز اینکلوژن و بردار n ۵۸
شکل ۳-۱۳: مسئله اشلبی ۶۰
شکل ۳-۱۴: بیضیگون Ω ۶۲
شکل ۳-۱۵: اینکلوژنΩ و کره واحد Σ به مرکز x ۶۳
شکل ۴-۱: حالت اینکلوژن مجزا ۶۷
شکل ۴-۲: فرآیند همگن‌سازی برای بدست آوردن تانسورهای تمرکز کرنش ۷۰
شکل ۴-۳: نمایش شماتیک RVE ایده‌آل تحت فرضیه ویت ۷۱
شکل ۴-۴: نمایش شماتیک RVE ایده‌آل تحت فرضیه رئوس ۷۳
شکل ۴-۵: فرآیند همگن‌سازی بر اساس مدل اینکلوژن رقیق ۷۳
شکل ۴-۶: فرآیند همگن‌سازی بر اساس مدل خودسازگار ۷۵
شکل ۴-۷: فرآیند همگن‌سازی بر اساس مدل موری-تاناکا ۷۸
شکل ۴-۸: فرآیند همگن‌سازی بر اساس مدل اینکلوژن دوگانه ۸۱
شکل ۴-۹: فرآیند تکرار برای ساخت ماده مرکب بر اساس مفهوم روش دیفرانسیلی ۸۷
شکل ۴-۱۰: اضافه کردن اینکلوژن در روش دیفرانسیلی ۸۸
شکل ۴-۱۱: مدول ارتجاعی ماده مرکب در مثال ۱ ..... ۸۹
شکل ۴-۱۲: ضریب پوآسون ماده مرکب در مثال ۱ ..... ۹۰
شکل ۴-۱۳: مدول ارتجاعی ماده مرکب در مثال ۲ ..... ۹۰
شکل ۴-۱۴: ضریب پوآسون ماده مرکب در مثال ۲ ..... ۹۱
شکل ۴-۱۵: مدول ارتجاعی ماده مرکب در مثال ۳ ..... ۹۱

شکل ۴-۱۶: ضریب پوآسون ماده مرکب در مثال ۳ ..... ۹۲
شکل ۴-۱۷: استفاده از عکس مدل‌های همگن‌سازی به منظور یافتن مشخصات اینکلوژن ۹۳
شکل ۴-۱۸: مقادیر مدول ارتجاعی ماده مرکب به ازای مشخصات ارتجاعی ماتریس و مقادیر مختلف مدول ارتجاعی اینکلوژن ۹۴
شکل ۴-۱۹: RVE چند فازی ۹۹
شکل ۵-۱: سبک‌دانه‌های M1 الی M4 ..... ۱۰۳
شکل ۵-۲: سبک‌دانه‌های S1 الی S4 ..... ۱۰۴
شکل ۵-۳: نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی ۱۰۵
شکل ۵-۴: درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها ۱۰۶
شکل ۵-۵: وزن مخصوص توده‌ای سبک‌دانه‌ها ۱۰۷
شکل ۵-۶: وزن مخصوص دانه‌ای سبک‌دانه‌ها ۱۰۷
شکل ۵-۷: نتایج آزمایش لس‌آنجلس در حالت وزن برابر ۱۰۸
شکل ۵-۸: نتایج آزمایش لس‌آنجلس در حجم وزن برابر ۱۰۹
شکل ۵-۹: تجهیزات مقاومت خردشدگی ۱۱۰
شکل ۵-۱۰: نتایج آزمایش مقاومت خردشدگی ۱۱۰
شکل ۵-۱۱: نتایج آزمایش ارزش ضربه‌ای ۱۱۱
شکل ۵-۱۲: نتایج آزمایش ارزش ده درصد ۱۱۲
شکل ۵-۱۳: خشک کردن آب سطحی سبک‌دانه‌ها ۱۱۴
شکل ۵-۱۴: فرآیند اختلاط ۱۱۴
شکل ۵-۱۵: فرآیند قالب‌گیری ۱۱۵
شکل ۵-۱۶: کلاهک‌گذاری با خمیر سیمان ۱۱۶
شکل ۵-۱۷: ساب زدن سر نمونه‌های استوانه‌ای ۱۱۶
شکل ۵-۱۸: نحوه اتصال یوق‌ها به نمونه ۱۱۷
شکل ۵-۱۹: تغییرشکل حلقه بالا نسبت به میله صلب پشت نمونه ۱۱۷
شکل ۵-۲۰: نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش ۱۱۸
شکل ۵-۲۱: استفاده از کرنش سنج ۱۱۸
شکل ۵-۲۲: تعیین مدول ارتجاعی در محدوده کرنش طولی 50×10^{-6} و کرنش طولی ۴۰ درصد بار نهایی ۱۱۹
شکل ۵-۲۳: تعیین ضریب پوآسون در محدوده کرنش طولی 50×10^{-6} و کرنش طولی ۴۰ درصد بار نهایی ۱۱۹
شکل ۵-۲۴: شکست تعدادی از نمونه‌ها بعد از بارگذاری ۱۲۰
شکل ۵-۲۵: میانگین مقاومت فشاری ماده مرکب نسبت به قطر سبک‌دانه ۱۲۵
شکل ۵-۲۶: میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به حجم سبک‌دانه ماده مرکب ۱۲۵
شکل ۵-۲۷: میانگین مدول ارتجاعی ماده مرکب نسبت به قطر سبک‌دانه ۱۲۶

شکل ۵-۲۸: میانگین مدول ارتجاعی نمونه‌ها نسبت به حجم سبک‌دانه ماده مرکب ۱۲۶
شکل ۵-۲۹: مقایسه مدول ارتجاعی پیش‌بینی شده توسط رابطه ACI با اندازه گیری شده ۱۲۷
شکل ۵-۳۰: مقایسه مدول ارتجاعی پیش‌بینی شده توسط رابطه ACI با اندازه گیری شده در این تحقیق ۱۲۸
شکل ۵-۳۰: میانگین ضریب پوآسون ماده مرکب نسبت به قطر سبک‌دانه ۱۲۸
شکل ۵-۳۱: میانگین میزان ضریب پوآسون نمونه‌ها نسبت به حجم سبک‌دانه ماده مرکب ۱۲۹
شکل ۵-۳۲: دستگاه ساب جهت کاهش ضخامت نمونه‌ها ۱۲۹
شکل ۵-۳۳: تصاویر میکروسکوپی دانه‌های سری M ۱۳۱
شکل ۵-۳۴: تصاویر میکروسکوپی دانه‌های سری S ۱۳۲
شکل ۵-۳۵: مغزه‌گیری از نمونه‌های مکعبی ۱۳۳
شکل ۵-۳۶: دستگاه برش (مته الماسه) ۱۳۳
شکل ۵-۳۷: الف)محفظه وکیوم- ب)دستگاه پولیش ۱۳۴
شکل ۵-۳۸: تعدادی از نمونه‌های تهیه شده جهت بررسی توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی ۱۳۴
شکل ۵-۳۹: الف)میکروسکوپ نوری- ب)دستگاه رساناکردن نمونه‌ها توسط روکش طلا ۱۳۵
شکل ۵-۴۰: دستگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM) ۱۳۵
شکل ۵-۴۱: نمونه‌ای از تصاویر دانه‌ها در زمینه ملات ماسه سیمان توسط میکروسکوپ نوری ۱۳۶
شکل ۵-۴۲: نمونه‌ای از تصاویر دانه‌ها در زمینه خمیر سیمان توسط میکروسکوپ نوری ۱۳۷
شکل ۵-۴۳: نمونه‌ای از تصاویر SEM ناحیه تماس سبک‌دانه معمولی و خمیرسیمان ۱۳۸
شکل ۵-۴۴: نمونه‌ای از تصاویر SEM ناحیه تماس سبک‌دانه سازه‌ای و خمیرسیمان ۱۳۹
شکل ۵-۴۵: وجود ترک به علت تنش‌های حرارتی در برخی نمونه‌ها ۱۴۰
شکل ۵-۴۶: بررسی ضخامت ناحیه انتقال ۱۴۰
شکل ۵-۴۷: تهیه نمونه‌های ته‌کوره لیکا ۱۴۲
شکل ۵-۴۸: مغزه های تهیه شده از ته‌کوره لیکا ۱۴۳
شکل ۵-۴۹: نحوه نمونه‌سازی و انجام آزمایش بر روی سنگ‌های شبیه‌سازی شده ۱۴۵
شکل ۵-۵۰: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نسبت به حجم فوم ۱۴۵
شکل ۵-۵۱: نتایج مدول ارتجاعی نمونه‌ها نسبت به حجم فوم ۱۴۶
شکل ۶-۱: الف) دانه‌های کروی- ب)مکعب ملات که محل قرار گرفتن دانه‌های در آن خالی شده ۱۴۹
شکل ۶-۲: اعمال شرایط مرزی حالت تک محوری ۱۵۰
شکل ۶-۳: دستگاه بلوری مکعبی ۱۵۰
شکل ۶-۴: الف)دانه- ب)ملات-ج)هندسه مش‌بندی ۱۵۲
شکل ۶-۵: مدول ارتجاعی سلول واحد با پارامترهای مثال ۱ ۱۵۲
شکل ۶-۶: مدول ارتجاعی سلول واحد با پارامترهای مثال ۲ ۱۵۳
شکل ۶-۷: مدول ارتجاعی سلول واحد با پارامترهای مثال ۳ ۱۵۳
شکل ۶-۸: هندسه دانه و ملات در حالت چیدمان منظم ۱۵۴

شکل ۶-۹: هندسه دانه و ملات در حالت چیدمان تصادفی ۱۵۶
شکل ۶-۱۰: مشخصات ارتجاعی ماده مرکب مثال ۱ تحت دو چیدمان منظم و تصادفی ۱۵۷
شکل ۶-۱۱: مشخصات ارتجاعی ماده مرکب مثال ۲ تحت دو چیدمان منظم و تصادفی ۱۵۸
شکل ۶-۱۲: مشخصات ارتجاعی ماده مرکب مثال ۳ تحت دو چیدمان منظم و تصادفی ۱۵۹
شکل ۶-۱۳: مشخصات ارتجاعی ماده مرکب مثال ۱ ..... ۱۶۰
شکل ۶-۱۴: مشخصات ارتجاعی ماده مرکب مثال ۲ ..... ۱۶۱
شکل ۶-۱۵: مشخصات ارتجاعی ماده مرکب مثال ۳ ..... ۱۶۲
شکل ۷-۱: مدول ارتجاعی نمونه‌های گچی تحت تاثیر میزان حفرات کروی بر اساس مدل‌های همگن‌سازی و آزمایش‌ها ۱۶۶
شکل ۷-۲: نسبت مدول ارتجاعی نرمالیزه شده به حجم حفرات کروی ۱۶۷
شکل ۷-۳: متوسط ضریب پوآسون نمونه‌ها نسبت به حجم سبک‌دانه ۱۶۹
شکل ۷-۴: ارتباط بین قطر و مدول ارتجاعی سبک‌دانه ۱۷۲
شکل ۷-۵: ارتباط بین وزن مخصوص دانه‌ای و مدول ارتجاعی ۱۷۳
شکل ۷-۶: ارتباط بین مقاومت خردشدگی و مدول ارتجاعی سبک‌دانه ۱۷۳
شکل ۷-۷: مدول ارتجاعی ماده مرکب نسبت به تغییرات ضریب پوآسون اینکلوژن برای دانه M4 ..... ۱۷۴
شکل ۷-۸: مدول ارتجاعی ماده مرکب نسبت به تغییرات ضریب پوآسون اینکلوژن برای دانه S1 ..... ۱۷۵
شکل ۷-۹: ضریب پوآسون ماده مرکب نسبت به تغییرات ضریب پوآسون اینکلوژن برای دانه M4 ..... ۱۷۶
شکل ۷-۱۰: ضریب پوآسون ماده مرکب نسبت به تغییرات ضریب پوآسون اینکلوژن برای دانه S1 ..... ۱۷۶
شکل ۷-۱۱: ضریب پوآسون ماده مرکب نسبت به حجم دانه موجود در نمونه الف)دانه سری S–ب)دانه سری M ۱۷۷
شکل ۷-۱۲: تغییرات مدول ارتجاعی اینکلوژن نسبت به تغییرات ضریب پوآسون ماده مرکب ۱۷۸
شکل ۷-۱۳: تغییرات ضریب پوآسون اینکلوژن نسبت به تغییرات ضریب پوآسون ماده مرکب ۱۷۸
شکل ۷-۱۳: ارتباط بین مدول ارتجاعی و ضریب پوآسون دانه ۱۷۹

فصل اول

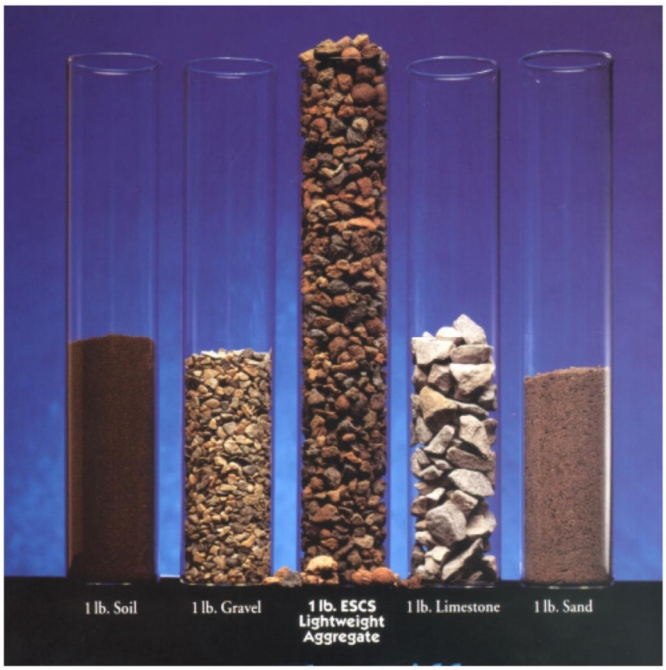
مقدمه

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- کلیات

با توجه به نیاز گسترده و روز افزون جامعه به عمران و آبادانی، استفاده از روش‌ها و مصالح جدید اهمیت بیشتری می‌یابد. یکی از این مصالح جدید، سبک‌دانه‌های مصنوعی می‌باشد. سبکدانه‌ها را می‌توان به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم بندی کرد[۱]. استفاده از سبک‌دانه‌های طبیعی به سالهای بسیار دور برمی‌گردد، ولیکن شروع استفاده از سبک‌دانه‌های مصنوعی از اواخر قرن ۱۹ می‌باشد[۲].

مجموعه‌ای از ویژگی‌های قابل توجه مانند وزن کم، هدایت حرارتی پایین، افت صوت مناسب، مقاومت در برابر آتش، دوام و پایداری شیمیایی و نظایر آن سبب گسترش کاربردهای متنوع این سبک‌دانه مصنوعی در صنعت ساختمان، طرح‌های عمرانی، کشاورزی، محیط زیست، راه‌سازی، صنایع نفت، ریخته‌گری و ... شده است. مهمترین مزیت این مصالح مربوط به وزن مخصوص کم این مصالح و ترکیبات تولید شده از آنها است. از آنها می‌توان برای خاکریزهای سبک، مصالح پرکننده[1] پشت دیوارهای حائل و تونل‌ها، مصالح زهکش، بتن سبک، قطعات پیش ساخته و غیره استفاده نمود که با توجه به وزن کم آنها، باعث کاهش بار مرده، نیروهای جانبی، نشست و تغییرمکان در سازه‌ها می‌شود [۳،۴،۵،۶،۷]. با توجه به کاربرد گسترده سبک‌دانه‌ها، تعیین ویژگی‌های آنها دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد.



شکل ۱-۱: مقایسه وزنی-حجمی سبک‌دانه‌های مصنوعی با سایر سبک‌دانه‌های طبیعی[۴]

[1] Backfill