



دانشگاه تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۰
تالار شهید چمران - انستیتو مصالح ساختمانی
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران



اولین کنفرانس ملی سبک

تعیین مدول ارتجاعی دانه‌های لیکای سازه‌ای با اندازه‌های مختلف توسط

روش دیفرانسیلی

علیرضا اردکانی^۱، محمود یزدانی^۲

^۱دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس a.r.ardakani@gmail.com

^۲دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

با توجه به کاربرد سبک‌دانه‌های مصنوعی در صنایع مختلف، تعیین خواص آنها اهمیت ویژه‌ای دارد. تعیین ویژگی‌های سبک‌دانه‌های مصنوعی نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی دارای پیچیدگی‌های ویژه‌ای می‌باشد. در حال حاضر دانه‌های رس منبسط شده‌ی لیکا، با وزن مخصوص‌های مختلف در کشورمان تولید می‌شود. لیکای با مقاومت بیشتر نسبت به لیکاهای متداول، اصطلاحاً لیکا سازه‌ای خوانده می‌شود و قابلیت استفاده آن در تولید بتن سازه‌ای بیشتر است. در این تحقیق از روش دیفرانسیلی (یکی از روش‌های تئوری مواد مرکب) برای تخمین مدول ارتجاعی لیکا سازه‌ای با اندازه مختلف استفاده شده است. بدین منظور با ترکیب سبک‌دانه‌ها و ملات ماسه سیمان و ساخت نمونه‌هایی استوانه‌ای ۱۵ در ۳۰ سانتیمتر ماده مرکب با درصد حجمی ۳۰ و ۴۰ درصد از سبک‌دانه‌ها، مشخصات ارتجاعی ماتریکس و ماده مرکب تعیین شده است. سپس توسط روش دیفرانسیلی و با استفاده از مشخصات ارتجاعی ماده مرکب و ماتریس، مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها تعیین شده است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از کاهش خطی مدول ارتجاعی نسبت به افزایش قطر در دانه‌های لیکا سازه‌ای که در شرایط یکسان تولید شده‌اند، می‌باشد.

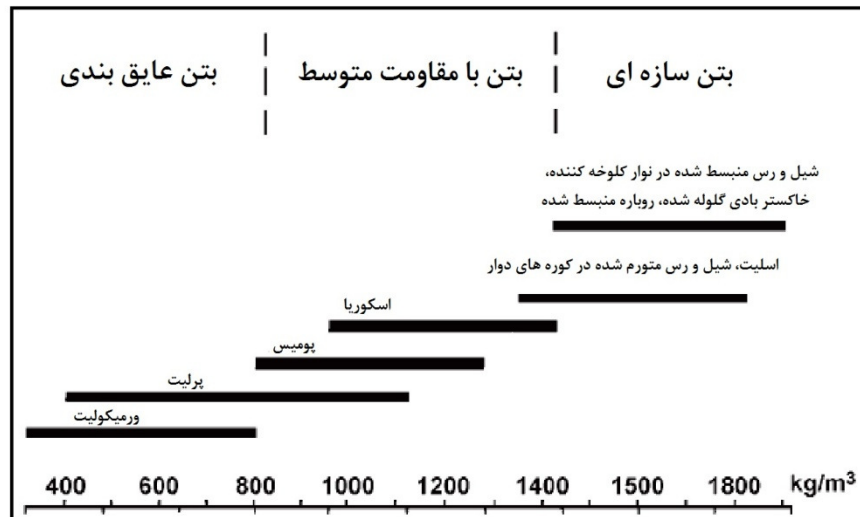
کلمات کلیدی: رس منبسط شده، سبک‌دانه سازه‌ای، قطر دانه، مدول ارتجاعی، روش دیفرانسیلی.

۱- مقدمه

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 نمود. استفاده از سبک‌دانه‌های طبیعی به سال‌های بسیار دور برمی‌گردد، اما استفاده از سبک‌دانه‌های مصنوعی متناظر با گسترش کاربرد بتن مسلح و کمبود سبک‌دانه‌های طبیعی در کشورهای پیشرفته، از اواخر قرن ۱۹ آغاز شده است [۱]. هایدی (۱۹۱۸)، یک سازنده آجر و مهندس سرامیک، فرآیند کوره چرخان را ابداع کرد و کاربرد سنگدانه رس منبسط شده را توسعه بخشید [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 و ریخته‌گری و... شده است. مهمترین مزیت این مصالح مربوط به چگالی کم این

مصالح و ترکیبات تولید شده از آنها است. بطوریکه از آنها می‌توان برای خاکریزهای سبک، مصالح پرکننده (backfill) 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 نیروهای جانبی و نشست و تغییر مکان در سازه‌های می‌شود. در شکل ۱، حدود چگالی بتن‌های سبک، با استفاده از سبک‌دانه‌های مختلف نمایش داده شده است.



شکل ۱- حدود چگالی بتن‌های سبک‌دانه با استفاده از سبک‌دانه‌های مختلف [۳]

سبک‌دانه رسی یا لیکا در حال حاضر تنها نوع سبک‌دانه مورد استفاده در بتن سازه‌ای می‌باشد که در کشورمان تولید می‌شود. این سبک‌دانه، از رس انبساط پذیر به روش فرآیند تر در داخل کوره گردان افقی تولید می‌شود. چنان که از مخلوط کردن رس و آب و سایر افزودنی‌ها، گل ایجاد می‌شود و این گل از دریچه بالایی کوره گردان وارد آن می‌شود. قطعات کوچک گل در طی حرکت درون کوره پس از خشک شدن، در ناحیه پخت که دمای آن در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد است، منبسط می‌شوند [۴]. محصول خروجی از کوره غالباً دارای قطر صفر تا ۲۵ میلی متر است. با تغییر در مصالح اولیه، میزان افزودنی‌ها، درصد رطوبت اولیه و دمای کوره و سرعت گردش آن، می‌توان سبک‌دانه با وزن مخصوص متفاوت تولید کرد. سبک‌دانه‌های لیکا عموماً با توجه به وزن مخصوص توده‌ای خشک، در کشورهای اروپایی تقسیم بندی می‌شوند و وزن مخصوص توده‌ای تقریبی آن به دنبال نام لیکا قرار می‌گیرد. به طور مثال لیکا ۵۰۰ یا لیکا ۷۰۰ از جمله لیکاهای سبک و سنگین می‌باشند [۵]. با توجه به این که هر چه لیکا سنگین تر باشد دارای مقاومت بیشتری می‌باشد، لیکا سنگین اصطلاحاً لیکا سازه‌ای گفته می‌شود و قابلیت آن در تولید بتن با مقاومت فشاری بزرگتر بیشتر است.

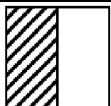




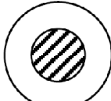
خواص ارتجاعی دانه‌های سنگی عموماً به صورت تقریبی با توجه به جنس و یا از آزمایش بر روی سنگ مادر (bed rock) آنها یافت می‌شود. حال آنکه برای دانه‌های مصنوعی یا فرآوری شده سنگ مادری وجود ندارد. در نتیجه برای تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها از روش غیرمستقیم استفاده شده است. در این تحقیق به منظور تعیین مدول ارتجاعی لیکا سازه‌ای، چهار اندازه یکنواخت، از آن که در شرایط و با مواد اولیه یکسان تولید شده است، تهیه شده و به صورت غیرمستقیم توسط روش دیفرانسیلی، مدول ارتجاعی آنها تخمین زده شده است.

۲- بررسی مطالعات گذشته

غالب تحقیقات انجام شده بر روی سبک‌دانه لیکا، مربوط به بررسی ویژگی ماده مرکب سیمانی (بتن و بلوک) ساخته شده از آنها می‌باشد. کوانده [۶] در غالب رساله دکتری به بررسی ویژگی‌های بلوک ساخته شده از لیکا نروژ پرداخت. شکرچی‌زاده و همکاران [۲] به بررسی طرح اختلاط بتن بهینه، با استفاده از لیکا سازه‌ای ۵۰۰ و ۷۰۰ پرداختند. رئیس قاسمی و همکاران [۷] یک مدل دو فازی خمیر-دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبک‌دانه حاوی لیکا برای رسیدن به روانی و مقاومت فشاری ارائه کردند. در این تحقیقات از دانه‌های لیکا با دانه‌بندی مشخص به عنوان مصالح استفاده شده است و تفکیکی از نظر تاثیر قطر یا ویژگی

ارتجاعی دانه بر ویژگی ماده مرکب ساخته شده، ارائه نشده است. هدف این تحقیق، بررسی تاثیر اندازه بر مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های لیکا می‌باشد. با توجه به ماهیت و ابعاد سبک‌دانه‌ها، انجام آزمایش مستقیم بر روی آنها امکان‌پذیر نمی‌باشد [۸]. بنابراین در نظر است مشخصات آنها در قالب یک ماده مرکب و با استفاده از معکوس تئوری‌های همگن‌سازی محاسبه شود. به عبارت دیگر مدنظر است که بوسیله این دانه‌ها و ماتریکس ملات سیمانی، نمونه مرکب دو فازی ساخته شود. سپس با فرض معلوم بودن ویژگی ماتریکس و نمونه مرکب، با استفاده از تئوری‌های همگن‌سازی ویژگی دانه تعیین شود. تاکنون مدل‌های مختلفی بر مبنای تئوری مواد مرکب، برای پیش‌بینی مدول ارتجاعی بتن، بر اساس مشخصات دانه‌ها و ملات تشکیل دهنده آن پیشنهاد شده است که با حل آنها می‌توان به مدول دانه‌ها رسید. برخی از روابط در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مدول ارتجاعی بتن تابعی از مدول ارتجاعی اجزای آن [۹]

شکل شماتیک	رابطه	نام مدل
	$E_c = E_m g_m + E_a g_a$	Voigt
	$\frac{1}{E_c} = \frac{g_m}{E_m} + \frac{g_a}{E_a}$	Reuss
	$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_c^{Voigt}} + \frac{1}{E_c^{Reuss}} \right)$	Hirsch-Dougil
	$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{2} (E_c^{Voigt} + E_c^{Reuss})$	Popvics
	$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \sqrt{g_a}}{E_m} + \left(\frac{1 - \sqrt{g_a}}{\sqrt{g_a}} E_m + E_a \right)^{-1}$	Counto
	$E_c = \left[\frac{(E_m + E_a) + (E_a - E_m) g_a}{(E_m + E_a) - (E_a - E_m) g_a} \right] \cdot E_m$	Hashin
-----	$E_c = (E_m)^{g_m} \cdot (E_a)^{g_a}$	Bache and Nepper-Cheistensen
فاز دانه‌های درشت فاز ملات	E_c : مدول ارتجاعی بتن E_m : مدول ارتجاعی ملات E_a : مدول ارتجاعی دانه‌های درشت g_m : نسبت حجمی ملات g_a : نسبت حجمی دانه‌های درشت	

در این تحقیق از روش دیفرانسیلی که دارای جزئیات بیشتری نسبت به سایر مدل‌های بیان شده است، استفاده شده و سبک‌دانه‌ها، ملات ماسه سیمان و نمونه‌های ساخته شده از آنها (بتن) به ترتیب نقش اینکلوزن^۱، ماتریکس و ماده مرکب را دارند.

۳- روش دیفرانسیلی

این روش برای محاسبه مدول ارتجاعی یک جامد که دارای توزیع تصادفی اینکلوزن کروی می‌باشد، استفاده شده است. مبنای این روش به این صورت است که مقدار کمی از اینکلوزن‌ها، به میزان $\delta\Gamma$ به ماتریکس همگن اضافه شود. فرض کنید که میزان اینکلوزن‌ها نسبت به حجم ماتریکس کم باشد، در نتیجه اندرکنش تنش میان اینکلوزن‌ها ناچیز است و ما می‌توانیم مدول الاستیک مصالح جدید را بطور مثال توسط روش اشلیبی [۱۰] محاسبه کنیم. سپس به صورت ذهنی این مصالح مرکب را که مدول آن $M(\delta\Gamma)$ است، با یک مصالح همگن که دارای همان میزان مدول است، جایگزین کنیم. حال تصور کنید به ماده مرکب دوباره

¹-Inclusion

میزان $\delta\Gamma$ از اینکلوژن‌ها اضافه شود و مدول جدید $M(2\delta\Gamma)$ دوباره محاسبه شود و به همین ترتیب کار ادامه پیدا کند تا به میزان مدنظر اینکلوژن درون ماتریکس برسیم. حال اگر $\delta\Gamma$ به سمت صفر میل کند، به یک معادله دیفرانسیلی که تغییر مدول ارتجاعی موثر را به عنوان تابعی از تمرکز اینکلوژن‌ها ارائه می‌دهد، می‌رسیم. از آنجایی که فرض می‌شود اینکلوژن‌ها به صورت تصادفی درون ماتریکس قرار می‌گیرند، سری دوم اینکلوژن‌ها برای اغلب حالات جایگزین ماتریکس می‌شوند، اما آنها همچنین جایگزین قدری از اینکلوژن‌ها که از قبل جاسازی شده‌اند، نیز می‌شوند. در نتیجه کل اینکلوژن‌ها بصورت تابعی ساده که حاصل از اضافه کردن اینکلوژن‌ها باشد، نیست. مکلاگین [۱۱] نشان داده شده، تمرکز حجم کلی فاز اینکلوژن با پارامتر Γ به صورت $C=1-\exp(-\Gamma)$ تعیین می‌شود. اگر اینکلوژن‌ها کروی و هر دو جز بصورت همسانگرد باشند، دو معادله دیفرانسیل برای مشخصات ارتجاعی به صورت ذیل بدست می‌آید [۱۲]:

$$\frac{1}{K} \frac{dK}{d\Gamma} = F_K = \frac{(3K+4G)(K_i - K)}{(3K_i + 4G)K} \quad (۱)$$

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{d\Gamma} = F_G = \frac{(15K+20G)(G_i - G)}{(6K+12G)G_i + (9K+8G)G} \quad (۲)$$

در این معادلات K و G به ترتیب مدول بالک و برشی ماده مرکب و K_i و G_i مدول بالک و برشی اینکلوژن می‌باشد. همچنین $d\Gamma$ بیانگر تغییرات اینکلوژن می‌باشد. شرایط مرزی این دو معادله عبارتند از: مشخصات ماده مرکب وقتی که میزان اینکلوژن‌ها برابر صفر است که در این حالت ویژگی ماده مرکب برابر است با مشخصات ماتریکس. به عبارت دیگر، $(K_{(0)})=K_{(m)}$ و $(G_{(0)})=G_{(m)}$. این معادلات دیفرانسیل بصورت همبسته^۱ و غیرخطی هستند. زیرمن [۱۳] حل بسته^۲ برای دو حالت مهم اینکلوژن‌های صلب و حفرات توخالی بدست آورد و نشان داد نتایج تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. رابطه بین K و G با مدول ارتجاعی (E) و ضریب پواسون (ν) به صورت ذیل می‌باشد:

$$E = \frac{9KG}{3K+G} \quad (۳)$$

$$\nu = \frac{3K-2G}{6K+2G} \quad (۴)$$

۴- برنامه آزمایشگاهی

جهت تعیین مدول ارتجاعی دانه‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر از ماتریکس (مالات سیمانی) به تنهایی و همچنین ترکیب حجمی ۷۰٪ ماتریکس و ۳۰٪ سبک‌دانه و همچنین ۶۰٪ ماتریکس و ۴۰٪ سبک‌دانه، ماده مرکب دوفازی ساخته شده و مدول ارتجاعی نمونه‌های مرکب ساخته شده و ماتریکس به تنهایی اندازه‌گیری شده است.

۴-۱- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این تحقیق شامل دو بخش سبک‌دانه و ماتریکس سیمانی می‌باشند که مشخصات آنها به شرح ذیل می‌باشد:

سبک‌دانه: برای انجام این تحقیق با الک کردن، و مصالح بدست آمده میان دو الک، چهار سایز یکنواخت از دانه‌های لیکا سازه‌ای تهیه شده است. این ۴ سایز عبارتند از:

- بین الک ۳/۳۶ میلیمتر (#۶) و ۴/۷۶ میلیمتر (#۴)

- بین الک ۶/۳۵ میلیمتر (۱/۴") و ۸/۰ میلیمتر (۵/۱۶")

- بین الک ۸/۰ میلیمتر (۵/۱۶") و ۱۱/۲ میلیمتر (۷/۱۶")

- بین الک ۱۲/۷ میلیمتر (۱/۳") و ۱۶/۰ میلیمتر (۵/۸").

در جدول ۲، اندازه متوسط، وزن مخصوص توده‌ای و ظاهری دانه‌های استفاده شده نشان داده شده است.

^۱ - Coupled

^۲ - Closed-form

جدول ۲- اندازه و وزن مخصوص سبک‌دانه‌های مورد استفاده

محدوده اندازه سبک‌دانه‌ها				
۱۶/۰ - ۱۲/۷	۱۱/۲ - ۸/۰	۸/۰ - ۶/۳۵	۴/۷۶ - ۳/۳۶	
۱۴/۳	۹/۶	۷/۲	۴/۱	اندازه متوسط (mm)
۴۳۲	۴۶۲	۴۸۴	۵۹۲	وزن مخصوص توده ای (kg/m^3)
۸۰۶	۸۲۸	۸۷۱	۱۱۰۶	وزن مخصوص ظاهری (kg/m^3)

ماتریکس: از ملات سیمانی، با طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۳، به عنوان ماتریکس استفاده شده است. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع ۲ می‌باشد. ماسه مورد استفاده از نوع شکسته بوده و عبور کرده از الک ۳/۳۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین از فوق‌روان کننده پایه نفتالینی برای روانی بیشتر استفاده شده است.

جدول ۳- طرح اختلاط ماتریکس در یک متر مکعب (کیلوگرم)

ماسه	سیمان	آب	فوق روان کننده
۱۳۷۵/۳	۵۶۰/۳	۲۸۰/۲	۷/۳

۴-۲- ساخت ماده مرکب و تعیین مدول ارتجاعی

جهت تعیین مدول ارتجاعی ماتریکس و ماده مرکب، نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر از ماتریکس (ملات سیمانی) به تنهایی و همچنین ترکیب حجمی ۷۰٪ ماتریکس و ۳۰٪ سبک‌دانه و همچنین ۶۰٪ ماتریکس و ۴۰٪ ماده مرکب دوفازی ساخته شد. به منظور جلوگیری از جذب آب ماتریکس توسط سبک‌دانه، قبل از اختلاط آنها، سبک‌دانه‌ها را به مدت ۳۰ دقیقه درون آب قرار داده و سپس توسط پارچه جذب آب، آب سطحی آن گرفته می‌شود. نمونه‌های ساخته شده پس از ۲۴ ساعت از قالب باز شده و تا سن ۲۸ روزگی در حوضچه آب حدود ۲۰ درجه غوطه‌ور شدند. سپس از آب خارج شده، و به مدت یک هفته در هوای آزاد خشک شدند. سپس مدول ارتجاعی آنها تعیین شده است. مطابق شکل ۲، برای تعیین مدول ارتجاعی، از حلقه استاندارد، سنسور تغییر مکان (LVDT)، کرنش سنج و سیستم اتوماتیک قرائت داده (دیتالاگر) استفاده شده است. بهترین شیب خط گذرنده از منحنی تنش-کرنش در حد فاصل کرنش 5×10^{-6} و کرنش ۴۰ درصد بار نهایی به عنوان مدول ارتجاعی منظور شده است.

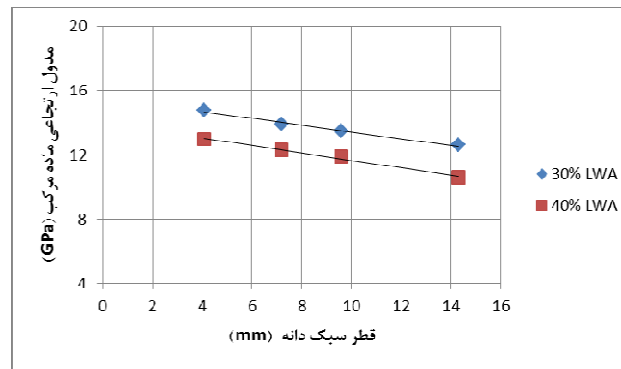


شکل ۲- تجهیزات مورد استفاده جهت تعیین مدول ارتجاعی

برای هر ترکیب سه آزمایش انجام شد. مقادیر میانگین مدول ارتجاعی آزمایش‌های انجام شده در جدول ۴ ارائه شده است. در آزمایش‌های انجام شده، ضریب پواسون برای ملات برابر ۰/۱۹ و برای نمونه‌های مرکب بین ۰/۱۹ الی ۰/۲۳ بدست آمده است. در شکل ۳ میانگین مدول ارتجاعی ماده مرکب نسبت به قطر سبک‌دانه‌های مورد استفاده نمایش داده شده است. مطابق شکل ۳ با افزایش قطر سبک‌دانه مدول ارتجاعی ماده مرکب کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش قطر، مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۴- میانگین مدول ارتجاعی مواد مرکب و ماتریکس

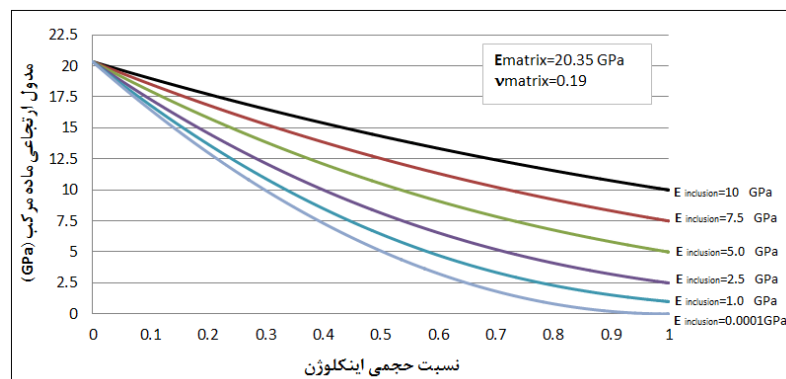
میانگین مدول ارتجاعی (GPa)	درصد سبکدانه (%)	قطر سبک‌دانه (mm)
۱۴/۸	۳۰	۴/۱
۱۳/۰	۴۰	
۱۳/۹	۳۰	۷/۲
۱۲/۳	۴۰	
۱۳/۵	۳۰	۹/۶
۱۱/۹	۴۰	
۱۲/۶	۳۰	۱۴/۳
۱۰/۶	۴۰	
۲۰/۳	۰	ملات تنها (بدون سبک‌دانه)



شکل ۳- تغییرات مدول ارتجاعی نمونه‌های مرکب نسبت به قطر سبک‌دانه

۵- تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها

به منظور تعیین مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌ها، مقدار مدول ارتجاعی و ضریب پواسون ماتریکس (ملات) به ترتیب برابر 20351 MPa و 0.19 در نظر گرفته شد. همچنین ضریب پواسون اینکلوژن (سبک‌دانه) برابر 0.2 فرض گردید. توسط روش عددی، به سادگی قابل نمایش است که تاثیر تغییرات ضریب پواسون بر مدول ارتجاعی ماده مرکب ناچیز است. سپس معادلات (۱) و (۲) به روش تفاضل محدود برای مقادیر مختلف مدول ارتجاعی سبک‌دانه حل شد. در شکل ۴، مقادیر مدول ارتجاعی ماده مرکب به ازای مقادیر مختلف مدول ارتجاعی اینکلوژن، حاصل از حل عددی معادلات نمایش داده شده است.

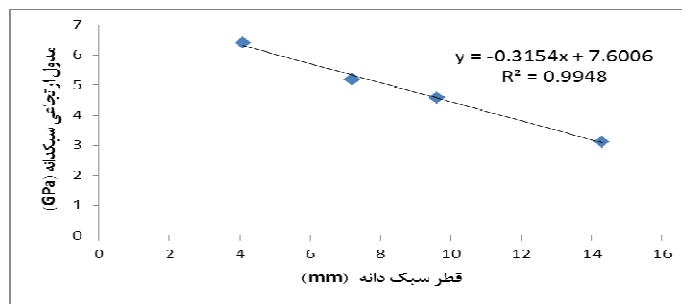


شکل ۴- مقادیر مدول ارتجاعی ماده مرکب به ازای مشخصات ارتجاعی ملات و مقادیر مختلف مدول ارتجاعی اینکلوژن برای تعیین مدول ارتجاعی هر گروه از سبک‌دانه‌ها، کافی است مقدار مدول ارتجاعی اینکلوژن طوری در نظر گرفته شود، که مدول ارتجاعی بدست آمده از آزمایش با مدول ارتجاعی ماده مرکب حاصل از حل معادلات، در درصد حجمی مشخص با هم یکسان شود. در جدول ۵ مقادیر مدول ارتجاعی بدست آمده برای اندازه‌های مختلف سبک‌دانه‌ها، با توجه به آزمایش‌های انجام شده در دو حالت نسبت حجمی ۳۰ و ۴۰ درصد ارائه شده است. در شکل ۵، مدول ارتجاعی متوسط حاصل از آزمایش‌ها نسبت به اندازه

سبک‌دانه نمایش داده شده است. مطابق این شکل، مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های سازه‌ای که در شرایط یکسان تولید شده‌اند، به صورت تقریباً خطی، نسبت به قطر کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۵- مدول ارتجاعی سبک‌دانه (GPa)

۱۴/۳	۹/۶	۷/۲	۴/۱	قطر سبک‌دانه (mm)
۳/۰۷	۴/۴۷	۵/۰۹	۶/۵۸	مدول ارتجاعی حاصل از آزمایش نمونه‌های حاوی ۳۰٪ سبک‌دانه
۳/۱۸	۴/۷۱	۵/۲۹	۶/۲۱	مدول ارتجاعی حاصل از آزمایش نمونه‌های حاوی ۴۰٪ سبک‌دانه



شکل ۵- مدول ارتجاعی سبک‌دانه لیکا سازه‌ای نسبت به قطر

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با ترکیب روش آزمایشگاهی و تئوری مواد مرکب، تاثیر قطر دانه‌های لیکا سازه‌ای که در شرایط یکسان تولید شده است، بر مدول ارتجاعی آنها مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق آزمایش‌های انجام شده و حل معادلات مربوط به روش دیفرانسیلی، نشان داده شد که مدول ارتجاعی سبک‌دانه‌های سازه‌ای که در شرایط یکسان تولید شده‌اند، به صورت تقریباً خطی، نسبت به قطر کاهش پیدا می‌کند.

۷- قدردانی

این کار تحقیقاتی با حمایت فنی شرکت لیکا ایران انجام شده است، نویسندگان کمال قدردانی و سپاسگذاری را از شرکت مذکور به ویژه آقای دکتر نمدمالیان اصفهانی، مهندس رفعت‌خواه و مهندس محمدی دارند.

۸- مراجع

1. Clarke, J.L., "Structural Lightweight Aggregate Concrete", Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 1993.
۲. شکرچی‌زاده، محمد؛ لیبر، نیکلاس علی؛ ماهوتیان، مهرداد؛ و آشوری، احسان؛ راهنمای کاربردی بتن سبک‌دانه سازه‌ای لیکا. گزارش شماره CMI-8707294، انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
3. Dolby, P.G., (1995), "Production and Properties of Lytag™ Aggregate Fully Utilized for the North Sea", Proc. Int. Symp. Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, 1995.
4. Chandra, S., and Berntsson, L., "LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, Science, Technology and Applications", Noyes Publications, United States, 2002.
5. European Union – Brite EuRam III, "Composite models for short- and long-term strength and deformation properties of LWAC", Document BE96-3942/R35, June 2000.
6. Kvannd, T., "Investigation of Some Material Properties for Structural Analysis of LECA Masonry", Ph.D Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2001.

۷. رئیس قاسمی، امیر مازیار؛ پرهیزگار، طیبه؛ و فامیلی، هرمز؛ ارائه مدل دو فازي خمیر-دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبک‌دانه حاوی لیکا. مجله علمی و پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰.

8. Chen, H.J., Yen, T., and Chen, K.H., "Evaluating Elastic Modulus of Lightweight Aggregate", ACI Material Journal, 2003, 100, 108-113.
9. Baalbaki, W., Aitcin, P. C. & Ballivy, G.(1992). "On predicting modulus of elasticity in high-strength concrete", ACI Materials Journal, 1992, 89(5), 517-520.
10. Eshelby, J.D., "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems", Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, A241, 1957, pp. 376-396.
11. McLaughlin, R., "A study of the differential scheme for composite materials", International Journal of Engineering Science, 1977, 15(4), pp. 237-244.
12. Norris, A.N., "A differential scheme for the effective moduli of composites", Mechanics of Materials, 1985, 4(1), pp. 1-16.
13. Zimmerman, R.W., "Elastic moduli of a solid containing spherical inclusions", Mechanics of Materials, 1991, 12(1), pp. 17-24.