

# بررسی تأثیر متقابل نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی سنگدانه<sup>۱</sup> و نسبت آب به سیمان بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن

مجید یزداندوست<sup>۱</sup>، محمود یزدانی<sup>۲\*</sup>

۱ و ۲- استادیار ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

mahyaz@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۹/۱۸]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۶/۱۸]

**چکیده-** در این پژوهش با مطالعه آزمایشگاهی تأثیر با هم نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی سنگدانه و نسبت آب به سیمان بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن بررسی شده است. به این منظور با استفاده از ۵ نسبت وزنی میکروسیلیس، ۳ نسبت وزنی آب به سیمان، و ۳ نوع دانه‌بندی از مصالح سنگی با مدول نرمی متفاوت، ۴۵ طرح اختلاط مختلف طراحی و مورد آزمایش اسلامپ، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی قرار گرفت. نتایج به دست آمده بیانگر تأثیر مستقیم نسبت وزنی میکروسیلیس بر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن است، به این صورت که افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۰ تا ۱۰ درصد در تمامی نسبت‌های آب به سیمان و مدول نرمی سنگدانه، کاهش اسلامپ و افزایش خواص مکانیکی بتن را به همراه دارد حال آنکه ضمن ادامه یافتن روند کاهش اسلامپ با افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۱۰ تا ۲۰ درصد، پارامترهای مکانیکی بتن با افت مواجه می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که میزان تأثیر پذیری پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس، با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش و با افزایش مدول نرمی سنگدانه، افزایش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** میکروسیلیس، نسبت آب به سیمان، مدول نرمی سنگدانه، پارامترهای فیزیکی، پارامترهای مکانیکی

## ۱ - مقدمه

و کانی‌های تشکیل دهنده آن) و نسبت وزنی استفاده شده از آن در بتن، از جمله مشخصات تأثیرگذار یک پوزولان در ایجاد یک محیط همگن و یکپارچه و بهبود پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن به شمار می‌رود. از آنجا که تأثیر ناشی از پوزولان بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن علاوه بر مشخصات آن، مبتنی بر ویژگی‌های سایر اجزاء تشکیل دهنده بتن مانند نوع سنگدانه، منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی، مدول نرمی مصالح سنگی، نسبت آب به سیمان، نوع سیمان و ... است، پس مطالعه و بررسی تأثیر

دستیابی به خواص ایده‌آل بتن و تحقق بخشیدن به ارتقاء پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن، سبب شده است تا امروزه پوزولان‌ها جایگاه ثابتی در میان اجزاء تشکیل دهنده بتن پیدا کنند. بهبود پارامترهای مکانیکی، کاهش نفوذپذیری، افزایش پایداری بتن و ... به علت استفاده از پوزولان‌ها در کنار سایر اجزاء بتن، سبب شده است تا این دسته از افزودنی‌ها، جزء لاینفکی از اجزاء تشکیل دهنده بتن‌هایی با کارایی و مقاومت بالا محسوب شوند. نوع پوزولان (از لحاظ ابعاد، مشخصات سطح ذرات

۱ - fineness modulus of aggregate (FM)

منجر به دستیابی به پارامترهای مکانیکی مطلوب بتن می‌شود، تأثیرگذار است [۱۱ و ۱۲]. پس معیار پذیرش یک نوع مصالح سنگی به عنوان مصالح ایده‌آل، تابع پارامترهای مختلفی است که این امر لزوم بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور را بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن مسجل می‌سازد. نتایج مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر جنس مصالح سنگی و کانی‌های تشکیل دهنده آن بر پارامترهای مکانیکی بتن حاکی از آن است که میزان تأثیرپذیری مقاومت فشاری و کششی بتن از تغییرات پارامترهای مکانیکی سنگدانه تا حد زیادی به ویژگی‌های ماتریکس سیمان بستگی دارد به گونه‌ای که استفاده از سنگدانه‌هایی با پارامترهای مکانیکی بالا مانند سنگدانه‌های گرانیتهی به تنهایی با ماتریکس سیمانی ضعیف، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن به دست آمده ندارد. از سوی دیگر تأثیر نوع کانی مصالح سنگی بر پارامترهای مکانیکی بتن در شرایطی ملموس است که از لحاظ مقاومتی سنگدانه و ماتریکس سیمان دارای شرایطی همسطح است. در این شرایط، که تأثیر فصل مشترک سنگدانه و ماتریکس سیمان که ناشی از نوع کانی مصالح سنگی است، بسیار چشمگیر است [۱۳، ۱۴ و ۱۵].

از آنجا که چگونگی قرارگیری سنگدانه‌ها در کنار هم و تشکیل یک ساختار سنگی منسجم تابع شکل ظاهری و مشخصات سطح سنگدانه‌ها است، پس مطالعات انجام شده در این زمینه بیانگر افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن بواسطه استفاده از سنگدانه‌هایی با سطحی زبرتر و شکل ظاهری تیز گوشه‌تر است [۱۶].

همچنین تراکم و انسجام ساختار سنگی بتن که سبب افزایش اندرکنش بین سنگدانه‌ها شده و ضعف ناشی از ماتریکس سیمان را پوشش می‌دهد، به شدت متأثر از چگونگی توزیع اندازه ذرات مصالح سنگی است، به گونه‌ای که استفاده از یک دانه‌بندی با مدول نرمی مناسب سبب افزایش مقاومت فشاری و کاهش خزش بتن می‌شود [۱۷ و ۱۸].

با توجه به مطرح بودن میکروسیلیس به عنوان یکی از متداول‌ترین پوزولان‌های استفاده شده در

متقابل مشخصات تأثیرگذار پوزولان‌ها و ویژگی‌های سایر اجزاء تشکیل دهنده بتن بر خواص بتن تشکیل یافته از آن به منظور دستیابی به به تنهایی با پارامترهای ایده‌آل، اجتناب ناپذیر است [۱ و ۲]. در این راستا مطالعات بسیاری در زمینه تأثیر ویژگی‌های پوزولان‌ها بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن صورت گرفته است. Bentur و همکاران (۱۹۸۸) با مقایسه مقاومت فشاری بتن حاوی میکروسیلیس و خمیر سیمان حاوی میکروسیلیس دریافتند که استفاده از میکروسیلیس باعث بهبود مقاومت پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان می‌شود [۳].

از طرفی Darwin و همکاران (۱۹۹۲) برخلاف نظریه Bentur، بر اساس یافته‌های خود نشان داده‌اند که مقاومت پیوستگی با مصرف میکروسیلیس افزایش پیدا نمی‌کند، بلکه میکروسیلیس تنها سبب بهبود مقاومت خمیر سیمان می‌شود [۴].

مطالعات انجام شده به وسیله‌ی Cabrerav و همکاران (۱۹۹۰) و Haque (۱۹۹۶) نشان می‌دهد که استفاد از میکروسیلیس در بتن، سبب کاهش ترک‌های ناشی از جمع شدگی و کاهش نفوذ پذیری بتن می‌شود [۵ و ۶].

در راستای بررسی تأثیر میکروسیلیس بر پیوستگی بین بتن و آرماتور، مطالعات انجام شده به وسیله‌ی Burge (۱۹۸۲) و Gjorv و همکاران (۱۹۹۰) نشان می‌دهد که استفاد از میکروسیلیس سبب افزایش پیوستگی بتن با آرماتور بتن می‌شود [۷ و ۸].

همچنین بررسی پارامترهای مکانیکی بتن ساخته شده براساس میکروسیلیس به وسیله‌ی Toutanji و همکاران (۱۹۹۶) و Sabir (۱۹۹۵)، از بهبود پارامترهای مکانیکی بتن به واسطه استفاده از میکروسیلیس خبر می‌دهد [۹ و ۱۰].

از جمله مصالح تشکیل دهنده بتن که با وجود سهم بالای تأثیرگذاری آن بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن، اهمیت درخور توجهی به آن داده نشده، مصالح سنگی است. شکل ظاهری، توزیع اندازه ذرات، ابعاد، مشخصات سطح ذرات و کانی‌های تشکیل دهنده آن از جمله ویژگی‌های یک مصالح سنگی است که در ایجاد یک محیط همگن و یکپارچه که

۳ نوع دانه بندی متفاوت و انجام آزمایش اسلامپ و وزن مخصوص؛

د- ساخت ۲۷۰ نمونه مکعبی با خطاپذیری ۳ براساس طرح اختلاطهای طراحی شده برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته در سنین ۷ و ۲۸ روزه بتن؛

ه- ساخت ۲۷۰ نمونه استوانه‌ای با خطاپذیری ۳ براساس طرح اختلاطهای طراحی شده برای انجام آزمایش مقاومت کششی در سنین ۷ و ۲۸ روزه بتن؛ و- مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده و بررسی اثر متقابل مدول نرمی سنگدانه، نسبت وزنی میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن ساخته شده از آن [۱۹].

## ۱-۲ - مشخصات مصالح

مصالح مورد استفاده در این پژوهش به شرح زیر است:

**مصالح سنگی:** در این پژوهش از سنگ گرانیتی با مشخصات فیزیکی و مکانیکی مندرج در جدول ۱ استفاده شده است. مصالح به صورت سنگ مادر از معدن تهیه و توسط یک دستگاه سنگ شکن آزمایشگاهی به ابعاد کوچکتر تبدیل و سپس به وسیله الک‌های آزمایشگاهی در اندازه‌های مختلف دانه‌بندی شده است. همچنین کلیه مصالح سنگی قبل از استفاده در مخلوط بتن کاملاً شسته و در حالت S.S.D (حالت اشباع با سطح خشک) بوده است.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح سنگی

مشخصات	مقدار	واحد
مقاومت فشاری	۲۲۸/۳	MPa
مدول الاستیسیته	۶۴/۹	GPa
وزن مخصوص	۱۶۵۰	Kg/m <sup>۳</sup>
چگالی	۲/۶۷۸	-
درصد جذب آب	۰/۴	%

صنعت بتن و با در نظر داشتن تأثیرگذاری با هم مشخصات میکروسیلیس (شامل نسبت وزنی، خواص فیزیکی و شیمیایی و ...) و ویژگی‌های سایر اجزاء تشکیل دهنده بتن (شامل جنس سنگدانه، دانه بندی مصالح سنگی، مدول نرمی مصالح سنگی، نسبت آب به سیمان، خواص فیزیکی و شیمیایی سیمان و ...) بر روند تغییرات پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن، در این پژوهش با انتخاب میکروسیلیس به عنوان پوزولان، به بررسی تأثیر با هم نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی مصالح سنگی ریزدانه و نسبت آب به سیمان بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بتن پرداخته شده است. به این منظور با استفاده از ۵ نسبت وزنی میکروسیلیس، ۳ نسبت وزنی آب به سیمان و ۳ نوع دانه‌بندی از مصالح سنگی با مدول نرمی متفاوت، ۴۵ طرح اختلاط طراحی و از لحاظ کارایی (اسلامپ)، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی مطالعه و بررسی شد.

## ۲ - مراحل تحقیق

از آنجا که دستیابی به بتنی با ویژگی‌های ایده‌آل از قبیل پارامترهای مکانیکی و پایایی مطلوب، کارایی مناسب، توجیه اقتصادی قابل قبول و ... مبتنی بر شناخت کافی از تأثیر با هم ویژگی‌های مصالح تشکیل دهنده بتن بر خواص بتن تشکیل یافته از آن است، پس در راستای نیل به این هدف، مطالعاتی در زمینه تأثیر متقابل نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی مصالح سنگی و نسبت آب به سیمان بر کارایی بتن تازه، وزن مخصوص و پارامترهای مکانیکی بتن سخت شده صورت گرفته است که مراحل انجام آن عبارت است از:

الف- تهیه سه نوع دانه‌بندی متفاوت از مصالح سنگی با ترکیب یک دانه‌بندی ثابت از مصالح درشت دانه و ۳ نوع دانه‌بندی از مصالح ریزدانه با مدول نرمی متفاوت؛

ب- طراحی ۴۵ طرح اختلاط با ۵ نسبت وزنی میکروسیلیس، ۳ نسبت وزنی آب به سیمان و ۳ نوع دانه بندی متفاوت؛

ج- ساخت ۴۵ طرح اختلاط با استفاده از ۵ نسبت وزنی میکروسیلیس، ۳ نسبت وزنی آب به سیمان و

**میکروسیلیس:** میکروسیلیس استفاده شده محصول شرکت ازنا با چگالی ۲/۱۱ و درصد خلوص ۹۹٪ بوده که پارامترهای شیمیایی آن مطابق با جدول ۵ است.

جدول ۵ مشخصات شیمیایی میکروسیلیس

ترکیبات	درصد	ترکیبات	درصد
شیمیایی	تشکیل دهنده	شیمیایی	تشکیل دهنده
MgO	۰/۹۷	H <sub>2</sub> O	۰/۸۰
Na <sub>2</sub> O	۰/۳۱	Sic	۰/۵۰
K <sub>2</sub> O	۱/۰۱	C	۰/۳۰
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۱۶	SiO <sub>2</sub>	۹۶/۴ - ۹۴/۶
SO <sub>3</sub>	۰/۱۰	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۸۷
Cl	۱/۰۴	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۳۲
Color	۶۶	CaO	۰/۴۹

**فوق روان کننده:** فوق روان کننده ملامین فرمالدئید سولفونات، محصول شرکت شیمی رزین منطبق با استاندارد ASTM C۴۹۴-Type F

## ۲-۲- دانه بندی مصالح سنگی

به منظور دستیابی به دانه بندی با مدول نرمی سنگدانه مورد نظر، ابتدا مصالح خرد شده را با استفاده از یک دستگاه لرزاننده والک های ۱/۴، ۳/۸، ۴، ۸، ۱۶، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ به سایزهای مختلف تقسیم و سپس با توجه به دانه بندی مورد نظر، درصد وزنی مشخصی از هر سایز انتخاب و با هم ترکیب شده است. برای تولید دانه بندی ریزدانه با مدول نرمی متفاوت، ۷ مدول نرمی در محدوده توصیه شده در آیین نامه ACI ۲۱۱-۴R، انتخاب و دانه بندی هر یک بر اساس مدول نرمی منتخب، طراحی شده است. مدول های نرمی منتخب عبارتند از ۲/۸۶، ۳/۰۶ و ۳/۲۶ و نمودار دانه بندی هر یک از دانه بندی های طراحی شده بر اساس مدول نرمی انتخابی، مطابق با شکل (۱) است.

**سیمان:** سیمان مصرفی، سیمان تیپ ۱ تهران منطبق با استاندارد ASTM C۱۵۰ است که پارامترهای مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۲ مشخصات مکانیکی سیمان

واحد	مقدار	مقاومت فشاری
kg/cm <sup>2</sup>	۲۲۴	۳ روزه
kg/cm <sup>2</sup>	۲۸۷	۷ روزه
kg/cm <sup>2</sup>	۴۰۳	۲۸ روزه

جدول ۳ مشخصات فیزیکی سیمان

واحد	مقدار	مشخصات
cm <sup>3</sup> /gr	۳۱۰۰	سطح ویژه
min	۱۴۰	زمان گیرش
%	۰/۰۳	مقدار انبساط حجمی در زمان گیرش
%	۲۵	آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون

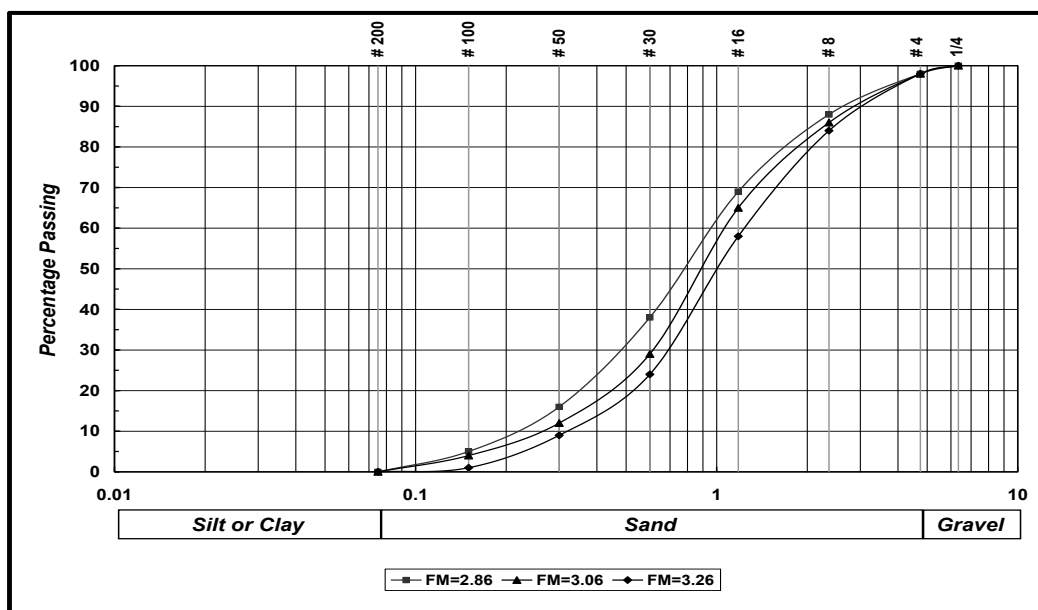
جدول ۴ مشخصات شیمیایی سیمان

ترکیبات	درصد	ترکیبات	درصد
شیمیایی	تشکیل دهنده	شیمیایی	تشکیل دهنده
SiO <sub>2</sub>	۲۰/۹۶	Na <sub>2</sub> O	۰/۴۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۷۸	K <sub>2</sub> O	۰/۵۵
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۱۲	Loss	۱/۶۰
CaO	۶۲/۷۲	Total	۹۹/۹۰
MgO	۲/۴۲	Insol Rez	۰/۴۴
SO <sub>3</sub>	۲/۳۰	Free CaO	۱/۲
(bouge) ترکیبات کلینکر بر اساس بوگ			
C <sub>2</sub> S	۴۶/۱۱	۲/۷۹	CaSO <sub>4</sub>
C <sub>3</sub> S	۲۵/۳۸	-----	MgO
C <sub>4</sub> A	۹/۹۱	۹۳/۶۷	Total
C <sub>4</sub> AF	۹/۴۸		

جدول ۶ دانه‌بندی مصالح سنگی درشت‌دانه

شماره الک	اندازه الک (mm)	درصد عبوری (%)	درصد مانده (%)
۳/۸ "	۹/۵۲۵	۱۰۰/۰	۰/۰
۱/۴ "	۶/۳۵	۴۰/۰	۶۰/۰
۴	۴/۷۵	۱۰/۰	۳۰/۰
۸	۲/۳۶	۰/۰	۱۰/۰

همچنین دانه‌بندی استفاده شده برای درشت‌دانه در تمامی انواع دانه‌بندی، ثابت و در محدوده مجاز استاندارد ASTM C۳۳ و طبق جدول (۶) است [۲۰، ۲۱ و ۲۲].



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی ریزدانه با مدول نرمی متفاوت

توصیه شده در آیین‌نامه ACI ۲۱۱، ۱-۸۵ در نظر گرفته شده است. در طرح اختلاط‌های موجود با توجه به مدول نرمی سنگدانه استفاده شده (۲/۸۶)، ۳/۰۶ و ۳/۲۶)، مقدار حجم درشت‌دانه به ترتیب ۶۱/۶۳، ۰/۰ و ۰/۵۹ و مقدار حجم هوای موجود در مخلوط ۰/۰۲ حجم کل بتن در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که عیار مواد سیمانی در تمامی طرح‌های اختلاط ثابت و برابر ۵۵۰ کیلوگرم

### ۳-۲ - طرح اختلاط

طرح اختلاط‌های ارائه شده در این قسمت مبتنی بر روش حجمی و براساس توصیه‌های ارائه شده در ACI ۲۱۱ است. با توجه به آیین‌نامه ACI ۲۱۱-۴R که مقدار حجم ظاهری درشت‌دانه را تا ۱/۵ برابر حجم ظاهری درشت‌دانه توصیه شده در آیین‌نامه ACI ۲۱۱، ۱-۸۵ توصیه کرده، در این پروژه مقدار حجم ظاهری درشت‌دانه، ۱/۴ برابر حجم ظاهری

سطح مقطع ۲۵ میلی‌متر مربع متراکم می‌شود. پس از طی مدت زمان ۱۶-۲۸ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج و در یک حوضچه آب در دمای ۵/۲۰ تا زمان انجام آزمایش نگهداری می‌شوند. نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز از آب خارج و در شرایط مرطوب به واسطه یک جک هیدرولیکی ۲۰۰ تن با نرخ تنش ۰/۴-۰/۲ مگاپاسکال در ثانیه تا زمان شکست بارگذاری و میزان کرنش بوجود آمده در آن به وسیله یک گیج قائم اندازه‌گیری شده است (شکل ۲).



شکل ۲ آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته

#### آزمایش مقاومت کششی:

آزمایش‌های مقاومت کششی انجام شده مبتنی بر استاندارد ASTM C496-90 و با خط‌پذیری ۳ برای هر طرح اختلاط است. در این روش مخلوط بتن آماده شده درون قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۷/۵ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در سه لایه ریخته و هر لایه با ۲۵ ضربه میله‌ای با سطح مقطع ۲۵ میلی‌متر مربع متراکم می‌شود. پس از گذشت مدت زمان ۱۶-۲۸ ساعت، نمونه‌ها از قالب خارج و در یک حوضچه آب در دمای ۵/۲۰ تا زمان انجام آزمایش نگهداری می‌شوند. نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز از آب خارج و در شرایط مرطوب به واسطه یک جک هیدرولیکی ۲۰۰ تن با نرخ تنش ۰/۴-۰/۲ مگاپاسکال در ثانیه تا زمان شکست بارگذاری می‌شوند (شکل ۳).

بر متر مکعب در نظر گرفته شده و نسبت وزنی مورد نظر از میکروسیلیس جایگزین همان نسبت از وزن سیمان شده است. همچنین میزان مصرف فوق روان کننده ۲ درصد وزن مواد سیمانی است. در پایان با داشتن نسبت حجمی تمامی اجزاء، میزان حجم ریزدانه محاسبه و با دانستن وزن واحد حجم آنها، وزن مورد نیاز هر جزء برای ساخت ۱ متر مکعب بتن محاسبه شده است [۲۱، ۲۳، ۲۴ و ۲۵].

#### ۴-۲- نحوه ساخت و انجام آزمایش روی طرح‌های اختلاط طراح شده

به منظور ساخت مخلوط‌هایی با شرایط یکسان، تمامی اجزاء بتن با دقت ۰/۱ گرم توزین و با یک میکسر آزمایشگاهی مخلوط شده‌اند. ترتیب اختلاط به این صورت بوده است که ابتدا آب، فوق‌روان کننده و مواد سیمانی با هم ترکیب، و سپس مصالح سنگی به خمیر سیمان اضافه و تا رسیدن به میزان یکنواختی مناسب مخلوط می‌شوند.

#### آزمایش اسلامپ:

آزمایش‌های اسلامپ انجام شده مبتنی بر استاندارد ASTM C143-90 و با خط‌پذیری ۳ برای هر طرح اختلاط است. در این روش مخلوط بتن آماده شده درون یک مخروط ناقص فلزی به قطر راس ۱۰۲ میلی‌متر، قطر کف ۲۰۳ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۵ میلی‌متر در سه لایه ریخته و هر لایه به وسیله ۲۵ ضربه میله‌ای با قطر ۱۶ میلی‌متر متراکم می‌شود. پس از صاف کردن سطح بتن متراکم شده در قالب به وسیله‌ی یک خط‌کش فلزی، قالب به آرامی بالا کشیده شده و میزان افت ارتفاع مخروط بتنی به عنوان اسلامپ طرح اختلاط مورد نظر در نظر گرفته می‌شود.

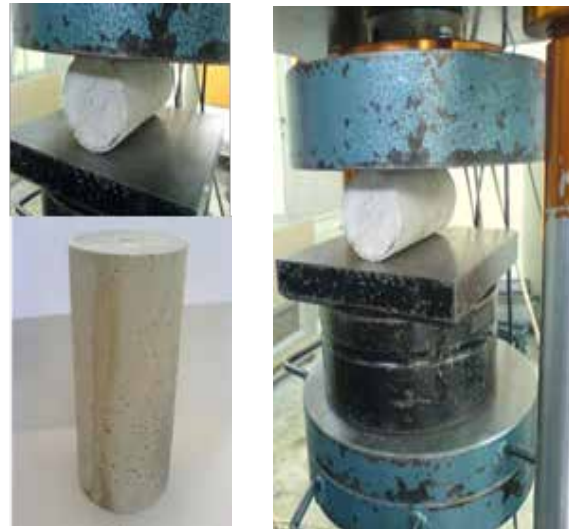
#### آزمایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته:

آزمایش‌های مقاومت فشاری انجام شده مبتنی بر استاندارد BS 1881: Part 108: 1983 و با خط‌پذیری ۳ برای هر طرح اختلاط می‌باشد. در این روش مخلوط بتن آماده شده درون قالب‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ در دو لایه ریخته و هر لایه با ۲۵ ضربه میله‌ای با

چگونگی فرارگیری این ذرات در کنار هم که ضمن تضعیف ساختار خمیر سیمان نقطه ضعف آن به شمار می آید.

این فضا محل فرارگیری آب مازاد بر نیاز هیدراتاسیون در خمیر سیمان است. پس با افزایش نسبت آب به سیمان، ضمن توسعه این فضا و افزایش فاصله موجود بین ذرات سیمان، کاهش نیروی پیوستگی بین این ذرات در پایان کاهش مقاومت خمیر سیمان را به همراه دارد.

۴- توزیع ذرات مصالح سنگی در ابعاد بزرگتر به واسطه افزایش مدول نرمی که منجر به کاهش انسجام ساختار مصالح سنگی می شود.



شکل ۳ آزمایش مقاومت کششی

### ۳-۱- نتایج آزمایش های پارامترهای مکانیکی بتن

به منظور بررسی تأثیر با هم نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی ریزدانه و نسبت وزنی آب به سیمان بر پارامترهای مکانیکی بتن از ۳ تیپ دانه بندی مصالح سنگی با مدول نرمی متفاوت استفاده شده است. به این صورت که برای هر دانه بندی با مدول نرمی مشخص، ۵ نسبت وزنی میکروسیلیس و ۳ نسبت آب به سیمان مختلف در نظر گرفته شده و بتن های ساخته شده با این شرایط در سنین ۷ و ۲۸ روزه با آزمایش های مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی قرار گرفته اند. نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده روی هر یک از پارامترهای مکانیکی بتن، در قالب سه گروه اصلی نشان داده شده است. هر گروه شامل نتایج آزمایش های انجام شده روی بتن های یک نوع دانه بندی با مدول نرمی ریزدانه مشخص، ۵ نسبت وزنی میکروسیلیس و ۳ نسبت آب به سیمان متفاوت است.

**مقاومت فشاری:** نتایج حاصل از آزمایش های مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن های ساخته شده با نسب وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی سنگدانه و نسبت آب به سیمان متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده در دو گروه اصلی به شرح زیر ارائه شده است:

الف- تأثیر متقابل نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی ریزدانه و نسبت آب به سیمان بر پارامترهای مکانیکی بتن؛

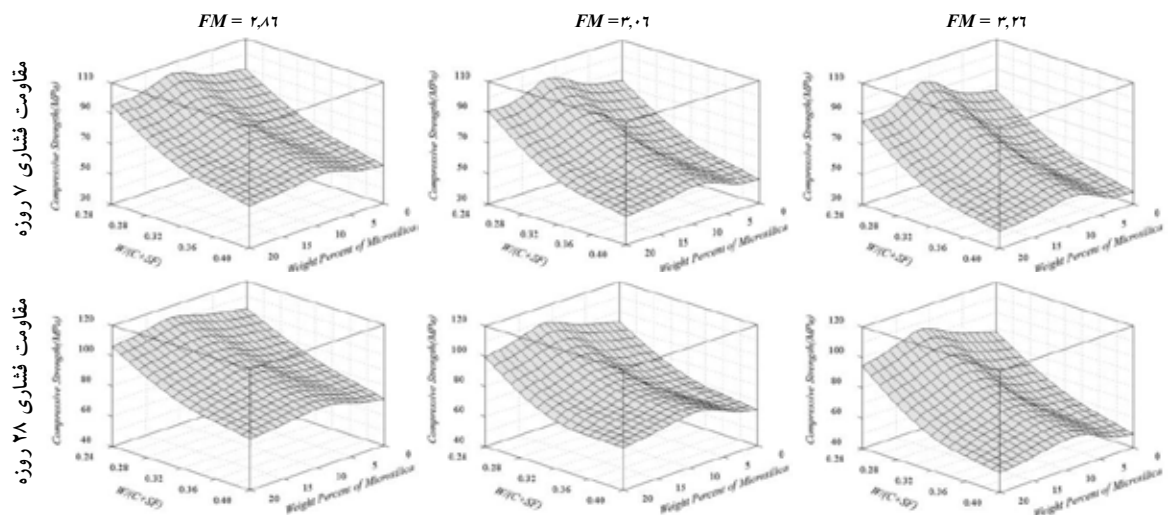
ب- تأثیر متقابل نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی ریزدانه و نسبت آب به سیمان بر پارامترهای فیزیکی بتن؛

اکنون با تکیه بر چهار دانسته اصلی ذیل به ارائه و تفسیر نتایج به دست آمده می پردازیم.

۱- بزرگتر بودن ابعاد ذرات سیمان و کمتر بودن سطح ویژه این ذرات در مقایسه با ذرات میکروسیلیس که این امر سبب افزایش جذب آب به وسیله ذرات میکروسیلیس می شود.

۲- افزایش حجم خمیر سیمان به واسطه جانشینی نسبت وزنی مشخص از میکروسیلیس در قبال همان نسبت وزنی از سیمان، که موجب کاهش وزن مخصوص بتن می شود. علت این امر را می توان در کمتر بودن وزن مخصوص میکروسیلیس نسبت به وزن مخصوص سیمان دانست. (وزن مخصوص میکروسیلیس تقریباً  $\frac{2}{3}$  وزن مخصوص سیمان است.)

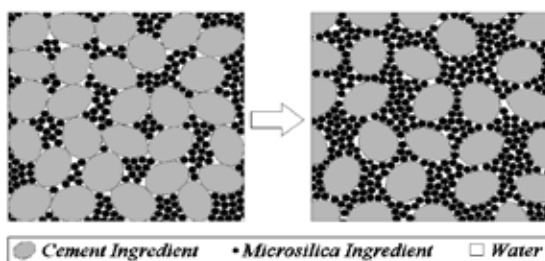
۳- ایجاد فضای خالی بین ذرات سیمان به واسطه



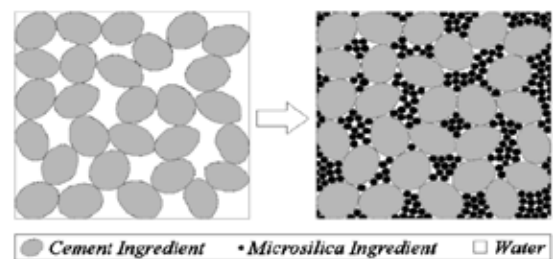
شکل ۴ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن با مدول نرمی سنگدانه و نسبت آب به سیمان مختلف

منسجم دانست (شکل ۵.الف). به بیان دیگر می‌توان گفت تا نسبت وزنی ۱۰ درصد، تمامی فضای موجود مابین ذرات سیمان به واسطه ذرات ریز میکروسیلیس اشغال و ساختار خمیر سیمان به ساختاری منسجم‌تر تبدیل می‌شود که این امر منجر به افزایش مقاومت ساختار خمیر سیمان و افزایش پارامترهای مکانیکی بتن می‌شود. همچنین عامل کاهش مقاومت فشاری بتن در نسبت وزنی ۱۰ تا ۲۰ درصد میکروسیلیس را می‌توان در افزایش فاصله ذرات سیمان از یکدیگر به علت افزایش ذرات میکروسیلیس مابین این ذرات و توسعه این فضا دانست (شکل ۵.ب).

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۰ تا ۱۰ درصد در تمامی نسبت‌های آب به سیمان و مدول نرمی ریزدانه، افزایش مقاومت فشاری بتن را به همراه دارد حال آنکه افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۱۰ تا ۲۰ درصد، کاهش مقاومت فشاری بتن را سبب می‌شود. عامل افزایش مقاومت فشاری بتن در نسبت وزنی ۰ تا ۱۰ درصد میکروسیلیس را می‌توان در کاهش منافذ موجود مابین ذرات سیمان در اثر قرارگیری ذرات میکروسیلیس در این منافذ و تشکیل یک ساختار



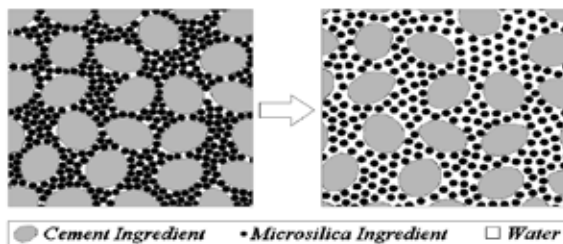
شکل ۵-ب چگونگی فاصله گرفتن ذرات سیمان به واسطه افزایش ذرات میکروسیلیس



شکل ۵-الف چگونگی پر شدن خلل و فرج سیمان به واسطه ذرات



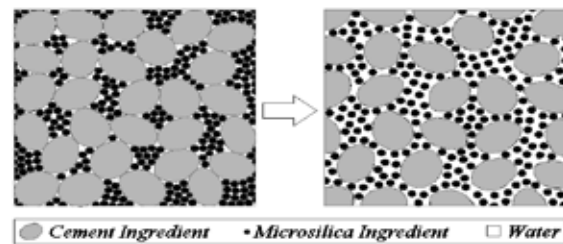
افزایش فاصله بین آنها دانست (شکل ۷). در واقع فضای اشغال شده به وسیله ذرات آب بعد از گیرش خمیر سیمان به صورت حفرهای هوا بر جای می ماند که این امر با وجود کاهش تخلخل خمیر سیمان به واسطه ذرات میکروسیلیس، افزایش خلل و فرج ساختار خمیر سیمان را به همراه داشته و از تأثیر میکروسیلیس بر انسجام و افزایش مقاومت ساختار خمیر سیمان کم می کند. به عبارت دیگر، با افزایش نسبت آب به سیمان، میزان تأثیرگذاری میکروسیلیس بر بهبود انسجام و مقاومت ساختار خمیر سیمان، کم رنگ تر می شود. بنابراین می توان گفت در نسبت های آب به سیمان بالا، عامل حاکم بر کاهش مقاومت خمیر سیمان، میزان آب موجود در ساختار آن است و این عامل سبب کم رنگ شدن تأثیرات ناشی از حضور میکروسیلیس (چه تأثیرات مثبت و چه منفی) در بتن می شود.



ب چگونگی فاصله گرفتن ذرات سیمان به واسطه افزایش آب مازاد بر هیدراتاسیون سیمان در نسبت وزنی ۱۰ تا ۲۰ درصد میکروسیلیس

به عبارت دیگر، افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۱۰ تا ۲۰ درصد، حضور بیشتر ذرات میکروسیلیس را در فضای تشکیل شده مابین ذرات سیمان به همراه دارد که این امر منجر به افزایش فضای مذکور می شود. توسعه فضای موجود بین ذرات سیمان سبب افزایش فاصله این ذرات از یکدیگر و کاهش پیوند موجود بین آنها می شود. این امر کاهش مقاومت خمیر سیمان و در پایان کاهش پارامترهای مکانیکی بتن را رقم می زند.

همچنین مشاهده می شود که میزان تأثیر پذیری مقاومت فشاری بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس، با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش پیدا می کند. به بیانی دیگر با افزایش نسبت آب به سیمان از روند رشد مقاومت فشاری بتن در قبال افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس کاسته می شود. علت این کاهش را می توان در حضور بیشتر آب مازاد بر هیدراتاسیون در فضای بین ذرات سیمان و



الف چگونگی فاصله گرفتن ذرات سیمان به واسطه افزایش آب مازاد بر هیدراتاسیون سیمان در نسبت وزنی ۰ تا ۱۰ درصد میکروسیلیس

شکل ۶ چگونگی فاصله گرفتن ذرات سیمان به واسطه افزایش آب مازاد بر هیدراتاسیون سیمان در نسبت وزنی متفاوت از میکروسیلیس

کاهش را می توان در بهبود انسجام ساختار مصالح سنگی در مدول نرمی ریزدانه پایین تر دانست. در واقع افزایش مقاومت و ظرفیت باربری ساختار مصالح سنگی به واسطه بهبود انسجام و قفل و بست شدگی مصالح در یکدیگر که در مدول نرمی پایین تر اتفاق می افتد، سبب کاهش نیاز بتن به یک

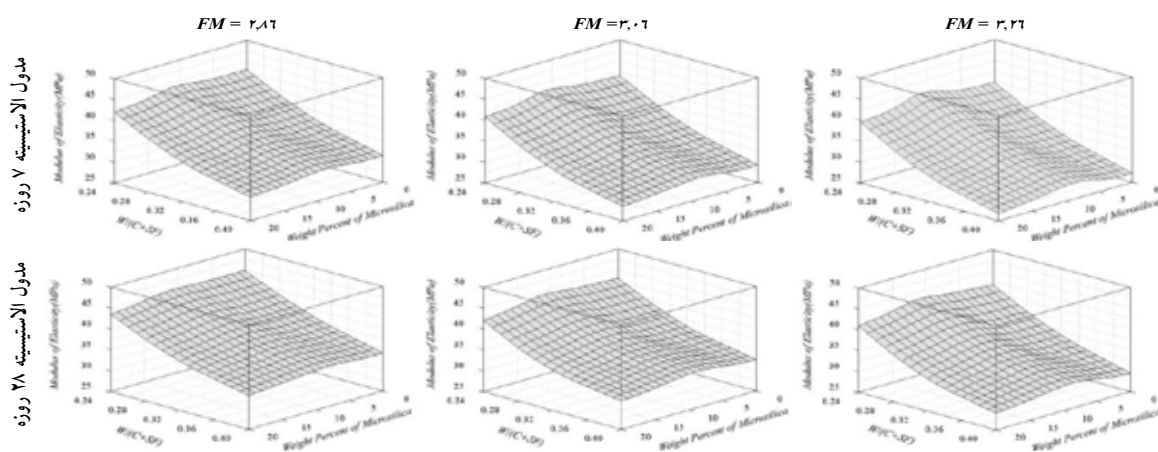
همچنین مشاهده می شود که میزان تأثیر پذیری مقاومت فشاری بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس، با کاهش مدول نرمی ریزدانه، کاهش می یابد. به بیانی دیگر با کاهش مدول نرمی ریزدانه از روند رشد مقاومت فشاری بتن در قبال افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس کاسته می شود. علت این

است. از این رو میزان تغییرات مقاومت بتن به واسطه تغییرات مقاومت خمیر سیمان در این بازه زمانی مشهودتر است. بنابراین با توجه به تأثیر مستقیم تغییرات نسبت وزنی میکروسلیس بر مقاومت خمیر سیمان، می‌توان گفت میزان تأثیر پذیری مقاومت بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسلیس در سنین ابتدایی، محسوس‌تر است.

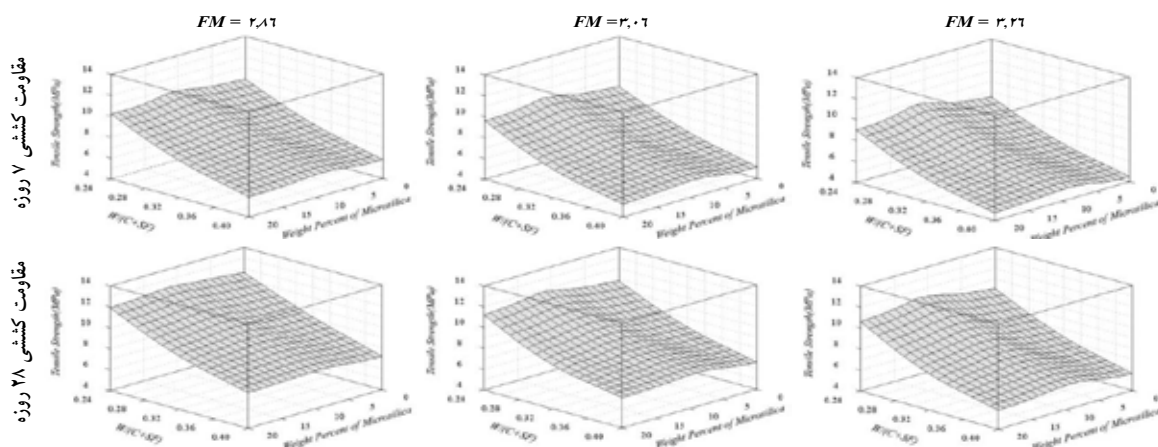
**مدول الاستیسیته و مقاومت کششی:** نتایج حاصل از آزمایش‌های مدول الاستیسیته و مقاومت کششی ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های ساخته شده با مدول نرمی ریزدانه، نسبت وزنی میکروسلیس و نسبت آب به سیمان متفاوت به ترتیب در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده است.

ماده چسباننده به منظور افزایش انسجام توده بتن می‌شود؛ در نتیجه ملات سیمان سهم کمتری از تأمین مقاومت بتن را به خود اختصاص می‌دهد. از این رو افزایش مقاومت ملات سیمان به واسطه حضور میکروسلیس در این شرایط، تأثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری بتن نخواهد داشت.

لازم به ذکر است که میزان تأثیرپذیری مقاومت فشاری بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسلیس در بتن ۷ روزه بیشتر از بتن ۲۸ روزه به چشم می‌خورد. از آنجایی که تضعیف مقاومت بتن در سنین پایین به علت عدم اکتساب مقاومت کافی به وسیله‌ی خمیر سیمان است، پس عامل اصلی و تأثیرگذار بر مقاومت بتن در سنین اولیه، مقاومت خمیر سیمان



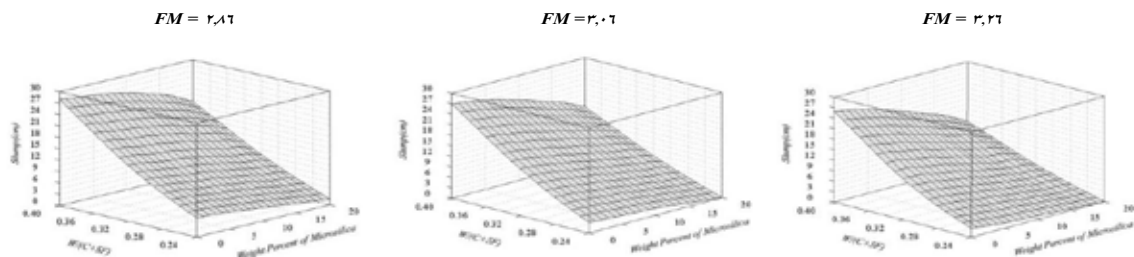
شکل ۷ نتایج آزمایش‌های مدول الاستیسیته بتن با نسبت وزنی میکروسلیس، مدول نرمی ریزدانه و نسبت آب به سیمان مختلف



شکل ۸ نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی بتن با نسبت وزنی میکروسلیس، مدول نرمی ریزدانه و نسبت آب به سیمان مختلف

دانه‌بندی مصالح سنگی با مدول نرمی متفاوت استفاده شده است. به این صورت که برای هر دانه‌بندی با مدول نرمی مشخص، ۵ نسبت وزنی میکروسیلیس و ۳ نسبت آب به سیمان مختلف در نظر گرفته شده و وزن مخصوص و اسلامپ به تنهای ساخته شده با این شرایط تعیین شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های اسلامپ و وزن مخصوص بتن در قالب سه گروه اصلی نشان داده شده است. هر گروه شامل نتایج آزمایش‌های انجام شده روی بتن‌هایی متشکل از یک نوع دانه‌بندی با مدول نرمی ریزدانه مشخص، ۵ نسبت وزنی میکروسیلیس و ۳ نسبت آب به سیمان متفاوت است.

**اسلامپ:** نتایج حاصل از انجام آزمایش اسلامپ بر روی بتن‌های ساخته شده با مدول نرمی ریزدانه، نسبت وزنی میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان متفاوت در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ نتایج آزمایشات اسلامپ بتن با نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی ریزدانه و نسبت آب به سیمان مختلف

حضور میکروسیلیس با سطح ویژه‌ای به مراتب بیشتر از سطح ویژه ذرات سیمان، سبب افزایش سطح ویژه ساختار خمیر سیمان و نهایتاً جذب آب بیشتر می‌شود. این میزان جذب آب با افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس نیز افزایش می‌یابد. این امر سبب اختصاص یافتن حجم بیشتری از آب موجود در بتن به مواد سیمانی و فقدان آب مورد نیاز بین مصالح سنگی به منظور جابجایی آسانتر بر روی یکدیگر و در نهایت کاهش اسلامپ و کارایی بتن می‌شود.

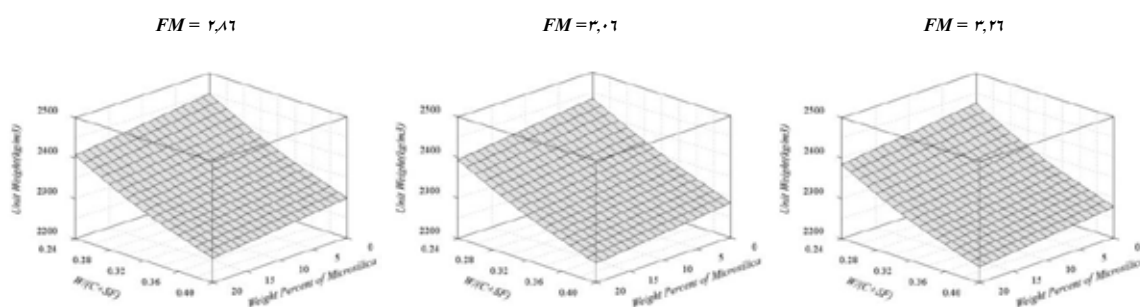
**وزن مخصوص:** نتایج حاصل از تعیین وزن مخصوص بتن‌های ساخته شده با مدول نرمی ریزدانه، نسبت وزنی میکروسیلیس و نسبت آب به سیمان متفاوت در شکل ۸ نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روند تغییرات مدول الاستیسیته و مقاومت کششی در تمامی نسبت‌های وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی ریزدانه و نسبت‌های آب به سیمان مشابه با روند تغییرات مقاومت فشاری است، تنها با این تفاوت که میزان تأثیر پذیری مقاومت کششی و مدول الاستیسیته از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس در تمامی مقادیر مدول نرمی ریزدانه و نسبت آب به سیمان، به مراتب کمتر از میزان تأثیر پذیری مقاومت فشاری از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس در تمامی این حالات است.

### ۲-۳- نتایج آزمایش‌های پارامترهای فیزیکی بتن

به منظور بررسی تأثیر با هم نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی ریزدانه و نسبت وزنی آب به سیمان بر پارامترهای فیزیکی بتن از ۳ تیپ

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۰ تا ۲۰ درصد در تمامی نسبت‌های آب به سیمان و مدول نرمی ریزدانه، کاهش اسلامپ بتن را به همراه دارد. همچنین مشاهده می‌شود که میزان تأثیر پذیری اسلامپ بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس، با افزایش نسبت آب به سیمان و مدول نرمی ریزدانه، افزایش می‌یابد. به بیانی دیگر با افزایش مدول نرمی ریزدانه و نسبت آب به سیمان، میزان تأثیر نسبت وزنی میکروسیلیس بر اسلامپ بتن افزایش می‌یابد. عامل کاهش اسلامپ را می‌توان در افزایش میزان ذرات میکروسیلیس که منجر به افزایش سطح ویژه ساختار خمیر سیمان می‌شود، دانست. به بیان دیگر،



شکل ۱۰ نتایج وزن مخصوص بتن با نسبت وزنی میکروسیلیس، مدول نرمی ریزدانه و نسبت آب به سیمان مختلف

۱۰ تا ۲۰ درصد، کاهش مقاومت فشاری بتن را سبب می‌شود.

۲- میزان تأثیر پذیری مقاومت فشاری بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس، با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش و با افزایش مدول نرمی ریزدانه، افزایش می‌یابد.

۳- میزان تأثیر پذیری مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس، به مراتب کمتر از میزان تأثیر پذیری مقاومت فشاری از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس در تمامی این حالات است.

۴- میزان تأثیر پذیری پارامترهای مکانیکی بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس در بتن ۷ روزه بیشتر از بتن ۲۸ روزه است.

۵- افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۰ تا ۲۰ درصد در تمامی نسبت‌های آب به سیمان و مدول نرمی ریزدانه، کاهش اسلامپ بتن را به همراه دارد.

۶- میزان تأثیر پذیری اسلامپ بتن از تغییرات نسبت وزنی میکروسیلیس، با افزایش نسبت آب به سیمان و مدول نرمی ریزدانه، افزایش می‌یابد. یعنی افزایش مدول نرمی ریزدانه و نسبت آب به سیمان، میزان تأثیر نسبت وزنی میکروسیلیس بر اسلامپ بتن افزایش پیدا می‌کند.

۷- افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۰ تا ۲۰ درصد در تمامی نسبت‌های آب به سیمان و مدول نرمی ریزدانه، کاهش وزن مخصوص بتن را به همراه دارد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۰ تا ۲۰ درصد در تمامی نسبت‌های آب به سیمان و مدول نرمی ریزدانه، کاهش وزن مخصوص بتن را به همراه دارد؛ به گونه‌ای که روند این کاهش در دانه‌بندی با مدول نرمی متفاوت، یکسان است، در نتیجه می‌توان گفت نوع دانه‌بندی سهمی در نرخ تغییرات وزن مخصوص بتن در نسبت‌های وزنی متفاوت از میکروسیلیس ندارد. همچنین ملاحظه می‌شود که نرخ کاهش وزن مخصوص بتن به ازاء افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس، با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش می‌یابد. عامل این کاهش را می‌توان در افزایش آب جذب شده به وسیله ذرات میکروسیلیس به علت افزایش این ذرات در خمیر سیمان و کاهش آب مازاد بر هیدراتاسیون و حفرات هوای باقی مانده از آب مازاد در بتن، دانست. در نتیجه با کاهش میزان حفرات هوای موجود در بتن، وزن مخصوص آن نیز کم می‌شود.

#### ۴- نتیجه گیری

با مطالعه و بررسی روی نتایج به دست آمده می‌توان گفت :

۱- افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از ۰ تا ۱۰ درصد در تمامی نسبت‌های آب به سیمان و مدول نرمی ریزدانه، افزایش مقاومت فشاری بتن را به همراه دارد حال آنکه افزایش نسبت وزنی میکروسیلیس از

## ۵ - مراجع

- [13] Wu KR, Chen B, Yao W, Zhang D. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 1421-1425
- [14] Wu KR, Chen B, Yao W, Zhang D. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 1421-1425
- [15] Poon CS, Lam CS. The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 283-289
- [16] Mass GR. Aggregate Particle Shape Considerations. *ACI Materials Journal*, V. 5, August 1983, pp. 23-29.
- [17] Donza H, Cabrera O, Irassar EF. High-strength concrete with different fine aggregate. *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1755-1761
- [18] Kennedy HL. Revised Application Of Fineness Modulus In Concrete Proportioning. *ACI Materials Journal*, V. 36, June 1940, pp. 597-614.
- [۱۹] مجید یزداندوست، طرح و ساخت بتن پلیمری جهت استفاده به صورت شاتکریت با هدف تامین پوشش نگهداری دائمی تونلها، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس، سال ۱۳۸۵
- [20] Nevil AM, Brooks JJ. *Concrete Technology*. Longman Science & Technical, 1987.
- [21] Okamura, Hajime. Self-Compacting High-Performance Concrete. *Concrete International Journal*, July 1997, pp. 50-54.
- [22] ACI Committee 212. *Admixtures for concrete*. *Concrete Int.*, Vol. 3, No. 5, pp. 24-52, 1981.
- [23] Larrard F, Belloc A. The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, V. 94, No. 5, September-October 1999, pp. 417-426.
- [24] Lessard M, Chaallal O, Action PC. Testing of High-Strength Concrete Compressive Strength. *ACI Materials Journal*, V. 90, No. 4, July-August 1993, p.303-308.
- [25] Khayat KH, Bickley JA, Hooton RD. High-Strength Concrete Properties Derived From Compressive Strength Values. *Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP*, V.17, No.2, Dec. 1995, pp. 126-133.
- [1] Perry C, Gillott JE. The Influence of Silica Fume on the Strength of the Cement-Aggregate Bond. *ACI Materials Journal*, V. 156, September 1995, pp. 191-212.
- [2] Neville AM. Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete. *ACI Materials Journal*, V. 94, No. 1, January-February 1997, pp. 71-74.
- [3] K.L. Scrivener, A. Bentur and P.L. Pkatt, 1988 «*Quantitative characterization of the transition zone in High Strength Concrete*,» *Journal, Advances in Cement research*, 1, No.4, PP.230-237.
- [4] Cong, X., Gong, S.; Darwin, D.; and Mccobe, S.L. 1992. «*Role of Silica Fume in Compressive Strength of Cement paste, Mortar and Concrete*,» *ACI Materials Journal*, V.89, No.4, July-Aug PP.375-387.
- [5] M.N. Haque, Strength Development and Drying Shrinkage of High-Strength Concretes, *Cem Concr Compos* 18 (1996) 333-342.
- [6] J.G. Cabrera, P.A. Claisse, Measurement of Chloride Penetration into Silica Fume Concrete, *Cem Concr Compos* 12 (1990) 157-161.
- [7] T.A. Bürge, Densified Cement Matrix Improves Bond with Reinforcing Steel, in: P. Bartos (Ed.), *Bond in Concrete*, Applied Science Publishers, London, 1982, pp. 273-281.
- [8] O.E. Gjorv, P.J.M. Monteiro, P.K. Mehta, Effect of Condensed Silica Fume on the Steel-Concrete Bond, *ACI Mater J* 87 (1990) 573-580.
- [9] H.A. Toutanji, T. El-Korchi, Tensile and Compressive Strength of Silica Fume-Cement Pastes and Mortars, *Cem Concr Aggr* 18 (1996) 78-84.
- [10] B.B. Sabir, High-Strength Condensed Silica Fume Concrete, *Mag Concr Res* 47 (1995) 219-226.
- [11] Tasdemir C, Tasdemir MA, Mills N, Barr IG, Lydon FD. Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Post-Peak Response of Concrete in Compression. *ACI Materials Journal*, V. 96, January 1999, pp. 74-83.
- [12] Aitcin PC, Metha PK. Effect of Coarse - Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Strength Concrete. *ACI-Mater-j- 1990; V.87; NO.2: 103-107.*