



دانشگاه تهران

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



اولین کنفرانس ملی بتن سبک

کاربرد روش تاگوچی در تعیین طرح اختلاط بهینه بتن سبک سازه‌ای ساخته شده با سبکدانه‌های اسکوریا

حمیدرضا رحمانی^{۱*}، محمود یزدانی^۲

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی عمران، عضو هیأت علمی دانشگاه غیرانتفاعی پارسیان قزوین
^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

بتن‌های سبک علاوه بر کاهش وزن ساختمان می‌تواند در راستای صرفه جویی در مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های حمل و نقل و کاهش مصالح مصرفی نظیر سیمان، آرماتور و سنگدانه‌ها موثر باشد. از نظر مقاومت، بتن‌های سبک به سه دسته سازه‌ای، نیمه سازه‌ای (شبه سازه‌ای) و غیر سازه‌ای تقسیم بندی می‌شوند. هدف از تحقیق حاضر تعیین طرح مخلوط بهینه بتن سبک سازه‌ای حاوی اسکوریا و دانه‌های سنگی لیکا با حداقل وزن مخصوص و مقاومت فشاری قابل قبول می‌باشد. برای این منظور روش تاگوچی با پنج پارامتر موثر و در چهار سطح مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه بدلیل پارامترهای متنوع که بر مقاومت فشاری و وزن مخصوص تاثیر گذار هستند، پنج فاکتور مهم انتخاب شده‌اند که عبارتند از نسبت درشت دانه به ریز دانه، نسبت درشت دانه به گراول، نسبت ریزدانه به ماسه، نسبت اسکوریای ریزدانه به لیکاری ریزدانه و میکروسیلیس. سایر پارامترها مانند نسبت آب به سیمان، افزودنی‌ها و سیمان به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس روش تاگوچی پنج پارامتر موثر در چهار سطح اورتوگول L16 بکار رفته است. بعد از آنالیز و تعیین سطوح بهینه، مشخص گردید که روش تاگوچی سیستماتیک برای دستیابی به طرح مخلوط بهینه بسیار مفید است.

کلمات کلیدی: اسکوریا، لیکا، بتن سبک، سبکدانه، تاگوچی

۱- مقدمه

سبکدانه‌ها معمولاً سنگدانه‌هایی با فضای متخلخل داخلی می‌باشند. ویژگی‌های خاص این نوع از مصالح، می‌تواند هم بر روی خصوصیات بتن تازه و هم بتن سخت شده تأثیرگذار باشد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به شکل و بافت سطحی، وزن مخصوص، حداکثر اندازه دانه، مقاومت سبکدانه و میزان جذب آب اشاره نمود. سبکدانه‌های تهیه شده از منابع مختلف و یا با روش‌های متفاوت تولید شده دارای گستره وسیعی از شکل و بافت سطحی می‌باشند [۱]. عواملی همچون کارایی بتن، نسبت مصالح درشت-دانه به ریزدانه، عیار سیمان و میزان آب بتن تحت تأثیر این ویژگی قرار می‌گیرند. سبکدانه‌های طبیعی عمدتاً در زمره سنگ‌های

آذرین بیرونی قرار می‌گیرند و بدلیل فعالیت‌های آتشفشانی و سریع سرد شدن کف ماگما در دوران‌های گذشته زمین شناسی در ایران، گسترش قابل ملاحظه‌ای دارند. سبکدانه‌های مصنوعی معمولاً از ته‌نشینی مصالح طبیعی مانند رس، شیل و اسلیت که حاوی مقدار زیادی سیلیس می‌باشند، تشکیل می‌شوند. دو نوع از روش‌های تولید آن‌ها روش کوره دوار و روش رسوب‌گذاری است [۲].

در پژوهش حاضر از دو نوع سبکدانه اسکوریا (سبکدانه طبیعی) و لیکا (سبکدانه مصنوعی) به منظور تعیین ترکیب بهینه بتن سبک با استفاده از روش طراحی سیستماتیک آزمایشات تاگوچی [۳] استفاده شده است. در ادامه مصالح بکار رفته و خصوصیات آنها و روش تاگوچی بطور مختصر معرفی می‌گردد.

۲- مصالح بکار رفته و خصوصیات آنها

۲-۱- سبکدانه‌های اسکوریا

از دیدگاه ماکروسکوپی، پوک‌معدنی اسکوریا به رنگ خاکستری تیره متمایل به قهوه‌ای بوده که ظاهری شبیه به سنگ پا دارد [۱] (شکل ۱). در این تحقیق پوک‌های معدنی اسکوریا به منظور استفاده بعنوان سنگدانه بتن، در سه اندازه مختلف طبقه‌بندی شده و مورد مطالعه قرار گرفتند:

طبقه‌بندی نوع ۱: پوک‌معدنی اسکوریا با اندازه بین الگ ۳/۴" و ۳/۸" (هم اندازه شن درشت)
 طبقه‌بندی نوع ۲: پوک‌معدنی اسکوریا با اندازه بین الگ ۳/۸" و شماره ۴ (هم اندازه شن ریز)
 طبقه‌بندی نوع ۳: پوک‌معدنی اسکوریا با اندازه بین الگ شماره ۴ و شماره ۴۰ (هم اندازه ماسه)
 شکل ۲، تصویر مربوط به این طبقه‌بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- طبقه‌بندی پوک‌معدنی اسکوریا



شکل ۱- پوک‌معدنی اسکوریا شکل

۲-۱-۱- خصوصیات فیزیکی اسکوریا

بر روی هر سه نوع دانه‌بندی اسکوریا، ۱۰ عدد آزمایش وزن مخصوص در حالت خشک و اشباع، آزمایش تعیین G_s مصالح، درصد تخلخل و درصد جذب آب بر اساس استاندارد ASTM-C94 و ASTM-C97 انجام گردید [۴]. جدول ۱ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که هر یک از اعداد داخل جدول، میانگین نتایج ۱۰ سری آزمایش می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی پومیس

| نوع نمونه | میانگینوزن مخصوص ظاهری (Kg/m^3) | میانگین وزن واحد حجم خشک (Kg/m^3) | میانگین وزن واحد حجم اشباع (Kg/m^3) | G_s | درصد تخلخل (%) | درصد جذب آب (%) |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---|-------|----------------|-----------------|
| اسکوریا با طبقه‌بندی نوع ۱ | ۷۰۰ | ۱۵۳۰ | ۱۷۶۰ | ۲/۰۱ | ۳۱ | ۱۵/۱۰ |
| اسکوریا با طبقه‌بندی نوع ۲ | ۷۱۰ | ۱۵۷۰ | ۱۸۱۶ | ۲/۰۸ | ۳۳ | ۱۵/۸۰ |
| اسکوریا با طبقه‌بندی نوع ۳ | ۹۵۰ | ۱۵۹۰ | ۱۹۲۰ | ۲/۲۵ | ۵۱ | ۲۱/۴۳ |

۲-۱-۲- دوام اسکوریا

دوام و وارفتگی، مقدار درصد وزنی باقیمانده نمونه پس از دو مرحله تر و خشک شدن است که نشانگر پایداری سنگ در برابر هوازگی طبیعی است. این آزمایش بر اساس استاندارد شماره ASTM - D4644 انجام گردید [۴] که نتایج آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- دوام اسکوریا

| شماره نمونه | شاخص دوام (طی ۲ سیکل) Id2 |
|-------------|---------------------------|
| ۱ | ۹۷/۴۹۹ |
| ۲ | ۹۷/۹۹۷ |
| میانگین | ۹۷/۷۵ |

۲-۱-۳- ارزش ضربه‌ای سنگدانه اسکوریا

در این تحقیق ارزش ضربه‌ای سه نمونه از سبکدانه‌های اسکوریا بر اساس استاندارد BS812 تعیین گردیده [۵] که نتایج آن‌ها در جدول ۳ مشخص شده است.

جدول ۳- ارزش ضربه‌ای اسکوریا

| شماره نمونه | (ارزش ضربه‌ای (%) A.I.V) |
|-------------|----------------------------|
| ۱ | ۱۸/۴۶ |
| ۲ | ۱۷/۸۰ |
| ۳ | ۱۷/۶۴ |
| میانگین | ۱۷/۹۶ |

۲-۲- شن و ماسه

در این تحقیق از شن محدوده شهرستان شهریار در استان تهران با وزن مخصوص ظاهری 1570 Kg/m^3 و جذب آب $1/8\%$ استفاده گردید. ماسه مورد استفاده نیز از منطقه شهریار تهیه گردید که وزن مخصوص ظاهری و جذب آب آن در حدود 1680 و $4/3\%$ بود.

۲-۳- سبکدانه‌های مصنوعی لیکا

همانند سبکدانه‌های طبیعی، دانه‌های لیکا نیز در اندازه سبکدانه‌های بتن، بصورت زیر بررسی گردیدند:
لیکای سازه‌ای درشت‌دانه با اندازه بین الک $3/4$ و 4 (هم اندازه شن درشت)
لیکای سازه‌ای ریزدانه عبوری از الک شماره 4 (هم اندازه ماسه)
لیکای معمولی ریزدانه عبوری از الک شماره 4 (هم اندازه ماسه)
وزن مخصوص ظاهری و درصد جذب آب این مصالح در جدول ۴ آورده شده است:

جدول ۴- خصوصیات فیزیکی لیکا

| نوع نمونه | میانگین وزن مخصوص ظاهری (Kg/m^3) | درصد جذب آب (%) |
|-------------------------|---|-----------------|
| لیکای سازه‌ای درشت‌دانه | ۶۶۰ | ۱۴ |
| لیکای سازه‌ای ریزدانه | ۸۶۰ | ۱۶ |
| لیکای معمولی ریزدانه | ۵۷۰ | ۲۵ |

۲-۴- میکروسلیس

میکروسلیس به علت ریزی بسیار زیاد و درصد سلیس بالا یک پرکننده یا میکروفیلر و همچنین یک ماده پوزولانی بسیار قوی بوده، ضمن انجام واکنش با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان آنرا به ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده تبدیل می- نماید [۶].

۳- طرح اختلاط‌های سیستماتیک با استفاده از روش تاگوچی

هدف از طراحی سیستماتیک در این مطالعه، بررسی تأثیر سبکدانه درشت اسکوریا و ریزدانه‌های لیکا و اسکوریا با درصدهای مختلف میکروسلیس و تعیین ترکیب بهینه آن‌ها می‌باشد. به منظور جلوگیری از تهی ماندن حجم کل سنگدانه‌های مورد استفاده در بتن، از فاکتورهای بدون بعد (نسبت سنگدانه‌ها به یکدیگر) مطابق با جدول ۵ استفاده شده است.

جدول ۵- فاکتورها و سطوح بکار رفته در طرح اختلاط تاگوچی

| سطوح فاکتورها | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ | سطح ۴ |
|---|---------|---------|---------|---------|
| ریزدانه / درشت‌دانه (فاکتور ۱) | ۴۰ / ۶۰ | ۵۰ / ۵۰ | ۶۰ / ۴۰ | ۷۰ / ۳۰ |
| شن / سبکدانه درشت (فاکتور ۲) | ۱۰۰ / ۰ | ۶۵ / ۳۵ | ۳۵ / ۶۵ | ۰ / ۱۰۰ |
| ماسه / سبکدانه ریز (فاکتور ۳) | ۱۰۰ / ۰ | ۶۵ / ۳۵ | ۳۵ / ۶۵ | ۰ / ۱۰۰ |
| سبکدانه ریز لیکا / سبکدانه ریز اسکوریا (فاکتور ۴) | ۱۰۰ / ۰ | ۶۵ / ۳۵ | ۳۵ / ۶۵ | ۰ / ۱۰۰ |
| میکروسلیس (درصدی از وزن سیمان) (فاکتور ۵) | ۵ % | ۷.۵ % | ۱۰ % | ۱۲.۵ % |

طبق جدول طراحی تاگوچی برای ۵ فاکتور با ۴ سطح (۴^۵) از آرایه ارتوگونال L₁₆ استفاده می‌شود [۳]. بر اساس آرایه L₁₆، سطوح فاکتورها در ساخت نمونه‌ها مطابق جدول ۶ می‌باشد.

جدول ۶- سطح مورد استفاده از هر یک فاکتورها در ساخت نمونه‌ها

| شماره نمونه | فاکتور ۱ | فاکتور ۲ | فاکتور ۳ | فاکتور ۴ | فاکتور ۵ |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ۱ | ۴۰/۶۰ | ۱۰۰/۰ | ۱۰۰/۰ | ۱۰۰/۰ | ۵ % |
| ۲ | ۴۰/۶۰ | ۶۵/۳۵ | ۶۵/۳۵ | ۶۵/۳۵ | ۵/۷ % |
| ۳ | ۴۰/۶۰ | ۳۵/۶۵ | ۳۵/۶۵ | ۳۵/۶۵ | ۱۰ % |
| ۴ | ۴۰/۶۰ | ۰/۱۰۰ | ۰/۱۰۰ | ۰/۱۰۰ | ۵/۱۲ % |
| ۵ | ۵۰/۵۰ | ۱۰۰/۰ | ۶۵/۳۵ | ۳۵/۶۵ | ۵/۱۲ % |
| ۶ | ۵۰/۵۰ | ۶۵/۳۵ | ۱۰۰/۰ | ۰/۱۰۰ | ۱۰ % |
| ۷ | ۵۰/۵۰ | ۳۵/۶۵ | ۰/۱۰۰ | ۱۰۰/۰ | ۵/۷ % |
| ۸ | ۵۰/۵۰ | ۰/۱۰۰ | ۳۵/۶۵ | ۶۵/۳۵ | ۵ % |
| ۹ | ۶۰/۴۰ | ۱۰۰/۰ | ۳۵/۶۵ | ۰/۱۰۰ | ۵/۷ % |
| ۱۰ | ۶۰/۴۰ | ۶۵/۳۵ | ۰/۱۰۰ | ۳۵/۶۵ | ۵ % |
| ۱۱ | ۶۰/۴۰ | ۳۵/۶۵ | ۱۰۰/۰ | ۶۵/۳۵ | ۵/۱۲ % |
| ۱۲ | ۶۰/۴۰ | ۰/۱۰۰ | ۶۵/۳۵ | ۱۰۰/۰ | ۱۰ % |
| ۱۳ | ۷۰/۳۰ | ۱۰۰/۰ | ۰/۱۰۰ | ۶۵/۳۵ | ۱۰ % |
| ۱۴ | ۷۰/۳۰ | ۶۵/۳۵ | ۳۵/۶۵ | ۱۰۰/۰ | ۵/۱۲ % |
| ۱۵ | ۷۰/۳۰ | ۳۵/۶۵ | ۶۵/۳۵ | ۰/۱۰۰ | ۵ % |
| ۱۶ | ۷۰/۳۰ | ۰/۱۰۰ | ۱۰۰/۰ | ۳۵/۶۵ | ۵/۷ % |

۴- شاخص کیفیت در روش ناگوچی

برای بیان نحوه عملکرد خوب یک محصول از بعضی مشخصه‌های قابل اندازه‌گیری استفاده می‌شود که بطور کلی بعنوان شاخص کیفیت هستند [۳].

با توجه به پراکندگی زیاد بین نتایج وزن مخصوص و مقاومت فشاری، معیار مطلوب کیفیت باید بگونه‌ای تعریف گردد که بتواند ملاک مناسبی برای ارزشیابی توأمان وزن مخصوص کم و مقاومت فشاری زیاد باشد. در اینجا استراتژی بر این بوده است که افزایش مقاومت تا یک حدی (300 Kg/Cm^2 مکعبی) ضروری بوده و برای مقاومت‌های بیشتر از آن در صورتی که وزن مخصوص نیز افزایش پیدا کند، شاخص کیفیت نباید به همان نسبت افزایش مقاومت، بهبود یابد. بعبارت دیگر از یک محدوده مقاومتی بیشتر، اثر وزن مخصوص اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. به همین منظور در این تحقیق، رابطه (۱) بعنوان شاخص کیفیت، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f - (f - 300) \times \alpha / (\gamma \times 1000) = \quad (1)$$

که در آن f مقاومت فشاری مکعبی 42 روزه بر حسب (Kg/Cm^2) و γ وزن مخصوص خشک‌شده در هوا بر حسب (Kg/m^3) می‌باشد. α نیز ضریبی است که برای اصلاح مقاومت‌های فشاری مکعبی بالاتر از (300 Kg/Cm^2) بسته به محدوده مقاومت نمونه‌ها استفاده می‌شود (جدول ۷).

جدول ۷- مقادیر مختلف α بر اساس محدوده مقاومتی نمونه‌ها

| | | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| $f > 0 < 300$ | $\alpha = 0$ | $f > 300 < 350$ | $\alpha = 0.07$ |
| $f > 350 < 400$ | $\alpha = 0.0725$ | $f > 400 < 450$ | $\alpha = 0.0750$ |
| $f > 450 < 500$ | $\alpha = 0.0775$ | $f > 500 < 550$ | $\alpha = 0.08$ |
| $f > 550 < 600$ | $\alpha = 0.0825$ | $f > 600 < 650$ | $\alpha = 0.0850$ |
| $f > 650 < 700$ | $\alpha = 0.0875$ | | |

۵- نحوه ساخت نمونه‌ها و نتایج آنها

با در نظر گرفتن توضیحات بند ۳ و بر اساس جدول ۶، شانزده طرح اختلاط مختلف در قالب‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ ساخته شد. جدول ۸ نتیجه آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۸- نتایج وزن مخصوص و مقاومت فشاری نمونه‌ها و تعیین معیار کیفیت آنها

| شماره نمونه | γ (Kg/m^3) | f (Kg/cm^2) | معیار کیفیت | شماره نمونه | γ (Kg/m^3) | f (Kg/cm^2) | معیار کیفیت |
|-------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------|-------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------|
| ۱ | ۲۳۸۰ | ۶۹۸ | ۱۴۷ | ۹ | ۲۱۳۰ | ۶۶۶ | ۱۶۲ |
| ۲ | ۲۱۹۰ | ۶۲۰ | ۱۵۹ | ۱۰ | ۱۸۶۰ | ۴۲۰ | ۱۷۷ |
| ۳ | ۱۹۵۰ | ۵۴۰ | ۱۷۸ | ۱۱ | ۲۱۷۰ | ۶۲۰ | ۱۶۰ |
| ۴ | ۱۸۵۰ | ۴۸۰ | ۱۸۴ | ۱۲ | ۱۹۴۰ | ۵۵۰ | ۱۸۰ |
| ۵ | ۲۲۴۵ | ۶۹۰ | ۱۵۵ | ۱۳ | ۱۸۰۵ | ۴۱۰ | ۱۸۱ |
| ۶ | ۱۸۲۰ | ۴۷۵ | ۱۸۶ | ۱۴ | ۱۸۸۰ | ۴۹۳ | ۱۸۳ |
| ۷ | ۱۶۷۵ | ۳۳۵ | ۱۸۵ | ۱۵ | ۲۱۰۰ | ۵۷۶ | ۱۶۶ |
| ۸ | ۱۷۹۰ | ۳۵۰ | ۱۷۶ | ۱۶ | ۲۱۶۰ | ۵۲۸ | ۱۶۰ |

با توجه به تخلخل زیاد سبکدانه‌ها که می‌توانند آب اضافی درون خود نگه دارند، به منظور عمل‌آوری داخلی (Curing Internal) در بتن در این تحقیق مصالح دانه‌ای بصورت پیش‌مرطوب مورد استفاده قرار گرفتند. به همین دلیل، قبل از اختلاط، به اندازه جذب آب سنگدانه‌ها به آنها آب اضافه می‌شد.

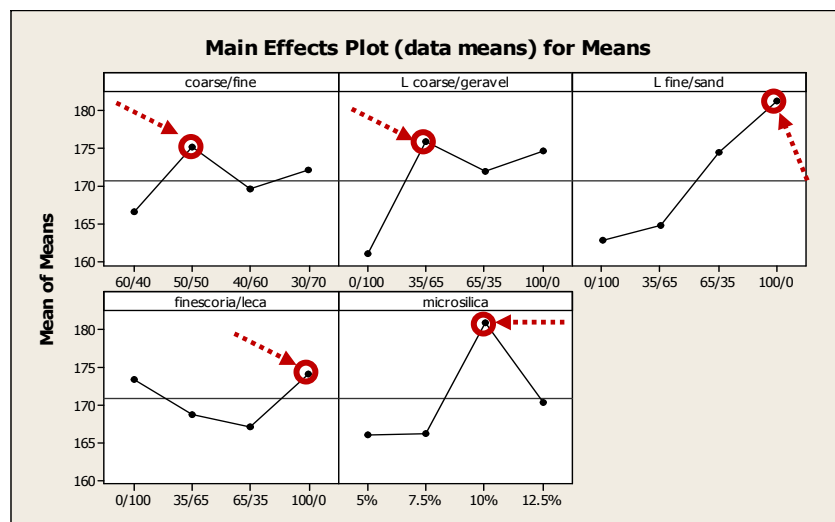
۶- تحلیل تاگوچی با استفاده از نرم‌افزار MINITAB و تعیین ترکیب بهینه و تأثیر فاکتورها در معیار کیفیت

در این پژوهش به منظور تجزیه و تحلیل نتایج طراحی سیستماتیک آزمایشات، از نرم‌افزار minitab استفاده شده است. ورودی‌های این نرم‌افزار شامل: معرفی فاکتورها و تعداد سطوح هر یک از آنها، انتخاب آرایه ارتوگونال مناسب [۳] و اختصاص فاکتورها در ستون‌های مناسب می‌باشد. پس از انجام آزمایشات آزمایشگاهی بر اساس برنامه طرح اختلاط سیستماتیک تاگوچی (آرایه متعامد انتخاب شده) و ارائه نتایج حاصل از آنها به نرم‌افزار و آنالیز نتایج، می‌توان اطلاعاتی همچون آثار عمده هر فاکتور، جداول واریانس حاصل از تحلیل استاندارد و تحلیل S/N، درصد مشارکت هر فاکتور، گراف‌های تأثیر سطوح هر فاکتور، پیش‌بینی ترکیب بهینه، پیش‌بینی شاخص کیفیت در حالت بهینه و بررسی خطای باقیمانده در آزمایشات را بعنوان خروجی این نرم‌افزار استخراج نمود. در شکل ۳ تحلیل واریانس در حالت استاندارد برای فاکتورهای این تحقیق که توسط نرم‌افزار minitab آنالیز گردیده، نشان داده شده است.

| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P | درصد مشارکت |
|------------------|----|---------|---------|---------|---|---|-------------|
| coarse/fine | 3 | 180.06 | 180.063 | 53.354 | * | * | 6.89 |
| L coarse/geravel | 3 | 545.31 | 545.313 | 181.771 | * | * | 23.49 |
| L fine/sand | 3 | 885.56 | 885.562 | 295.187 | * | * | 38.15 |
| finescoria/leca | 3 | 143.69 | 143.688 | 47.895 | * | * | 6.19 |
| microsilica | 3 | 586.81 | 586.812 | 195.604 | * | * | 25.28 |
| Residual Error | 0 | | | | | | |
| Total | 15 | 2321.44 | | | | | 100 |

شکل ۳- جدول واریانس در حالت تحلیل استاندارد در نرم‌افزار MINITAB

همچنین نمودار تأثیر سطوح هر یک از فاکتورها نیز بصورت شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۴- نمودار تأثیر سطوح فاکتورها بر روی معیار کیفیت در حالت تحلیل استاندارد

از نمودار قبلی می‌توان سطوح بهینه فاکتورها را بصورت زیر تعیین نمود:

فاکتور ۱: نسبت درشت‌دانه به ریزدانه ۵۰ / ۵۰

فاکتور ۲: نسبت سبک‌دانه درشت به شن ۳۵ / ۶۵

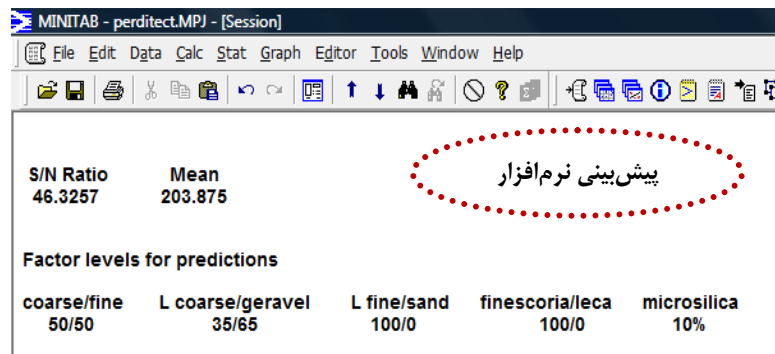
فاکتور ۳: نسبت سبک‌دانه ریز به ماسه ۱۰۰ / ۰

فاکتور ۴: نسبت سبک‌دانه ریز اسکوریا به سبک‌دانه ریز لیکا ۱۰۰ / ۰

فاکتور ۵: میکروسیلیس ۱۰٪

۷- پیش‌بینی معیار کیفیت در حالت بهینه و انجام آزمایش تأییدی

همانطوریکه قبلاً توضیح داده شد، هدف اصلی از طراحی سیستماتیک آزمایشات، تعیین سطوح بهینه عوامل تأثیرگذار بر مشخصه کیفیت می‌باشد. از قابلیت‌های نرم‌افزار minitab، پیش‌بینی معیار کیفیت در حالت ترکیب بهینه بوده که پس از تعیین سطوح بهینه، مشخص می‌شود. در این مطالعه، بر اساس روش تاگوچی، عدد معیار کیفیت برای ترکیب بهینه در حالت تحلیل استاندارد ۲۰۳/۸۷۵ پیش‌بینی می‌شود. این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- پیش‌بینی معیار کیفیت در حالت ترکیب بهینه با استفاده از نرم‌افزار minitab

به منظور بررسی اعتبار این پیش‌بینی در حالت ترکیب بهینه، یک سری نمونه با سطوح بهینه مشخص شده ساخته شد که نتیجه آن در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹- نتیجه آزمایش تأییدی در ترکیب بهینه

| شماره نمونه | γ (Kg/m ³) | f (Kg/cm ²) | معیار کیفیت |
|-------------|-------------------------------|-------------------------|-------------|
| T | ۱۷۴۰ | ۴۱۹ | ۱۹۰ |

ملاحظه می‌شود که عدد معیار کیفیت برای ترکیب بهینه، ۱۹۰ بدست آمد. این عدد هرچند مقداری با پیش‌بینی عدد نرم‌افزار (۲۰۳/۸۷۵) تفاوت دارد، اما نشان از افزایش کیفیت در هدف مورد نظر دارد.

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایشات مربوط به استفاده از سبکدانه‌های اسکوریا، مشخص گردید که این نوع از سبکدانه‌های طبیعی می‌توانند بطور مناسبی الزامات بتن سبک سازه‌ای را برآورده سازند. به همین دلیل می‌توان از این پوک‌معدنی در ساخت انواع بتن سبک با مقاومت فشاری و وزن مخصوص‌های مختلف استفاده نمود. از جمله فعالیت‌های مهم انجام شده در این پژوهش، استفاده از روش طراحی سیستماتیک آزمایشات (DOE) بود که در اینجا از روش تاگوچی استفاده گردید. با انتخاب ۵ فاکتور بعنوان عوامل موثر و اختصاص ۴ سطح مختلف به هر یک از آنها، ترکیب بهینه این عوامل و همچنین میزان تأثیر کلی متغیرها و حتی شدت این تأثیرات بدست آمد. پس از آن، با داشتن ترکیب بهینه، دقت روش تاگوچی در تخمین عدد معیار کیفیت در حالت بهینه با ساخت یک نمونه تأییدی در آزمایشگاه ارزیابی گردید. نتیجه قابل قبول بدست آمده از مقایسه نتیجه آزمایش نمونه تأییدی با تخمین تاگوچی، توانمندی این روش را به منظور استفاده در برنامه‌های آزمایشگاهی جهت صرفه‌جویی در هزینه‌های زمانی و اقتصادی پژوهشگران نسبت به روش‌های متداول آزمایشگاهی، آشکار می‌سازد.

۹- مراجع

- 1- JO Grothee. Sarah, Evaluation of Lightweight Concrete mixtures for bridge deck and prestressed bridge girder applications, thesis for the degree master of science, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Kansas State University, 2006
- 2- Expanded shale, clay and slate Institute, 1971, Physical and Engineering properties of clay, 110-124
- ۳- رحمانی، حمیدرضا؛ یزدانی، محمود. کاربرد روش تاگوچی در طرح اختلاط سیستماتیک بتن سبک نیمه‌سازهای با استفاده از سبکدانه‌های پومیس. اولین کنفرانس ملی بتن سبک، ۱۳۹۰، ارسال شده به کنفرانس
- ۴- نیکودل، محمدرضا. مطالعه معیارهای شناخت زوال‌پذیری سنگ. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۶۹، دانشگاه تربیت مدرس.
- 5- BS812, Part112, 1990; Test Method for Aggregate Impact Value, 2002.
- ۶- پرهیزکار، طیبه؛ قدوسی، پرویز. بررسی و ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن دانه‌سبک با استفاده از میکروسیلیس، اولین کنفرانس بین‌المللی بتن و توسعه، ۱۳۸۰، تهران