نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۶، شماره ویژه ۱، سال ۱۳۹۸، صفحه ۱۸۷ تا ۱۹۸

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

بهینه‌سازی عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان در مجاورت محلول سدیم‌کلرید با استفاده از روش سطح پاسخ

حمید اسکندری نداف[۱*]، روشنک خسروجردی [۲]، رعنا کوشکی[۳]

۱- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
۳- کارشناس ارشد مهندسی آب و خاک، وزارت نیرو ، تهران، ایران

چکیده

مقاومت فشاری و خمشی ملات از مهم‌ترین خواص مکانیکی بتن است و در طرح اختلاط ملات نسبت آب به سیمان، سنگدانه به سیمان و نوع رده مقاومتی سیمان از پارامترهای تعیین‌کننده این خواص است. امروزه علم بهینه‌سازی در فناوری بتن و طرح اختلاط آن نقش مهمی دارد و یکی از روش‌های آماری که اخیراً به‌منظور بهینه‌سازی موردتوجه محققین قرارگرفته است روش سطح پاسخ (RSM) است که در این مقاله برای دستیابی به طرح اختلاط بهینه و بررسی عوامل مؤثر بر خواص کیفیت ملات، از این روش استفاده‌شده است. در این راستا، ۱۲ طرح مورد بررسی قرارگرفته‌اند و نمونه‌ها در مجاورت محلول‌های حاوی ۰ تا ۵ درصد سدیم کلرید قرارگرفته‌اند. نتایج نشان‌دهنده امکان به‌کارگیری این روش در بهبود مداوم طرح اختلاط بتن است که می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب در واحدهای تولید بتن و واحدهای تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی مورداستفاده قرار گیرد. بررسی نتایج بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ برای مقاومت فشاری و خمشی نشان می‌دهند که طرح اختلاط بهینه برای دستیابی به بیشینه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها، طرحی می باشد که در آن درصد کلر استفاده‌شده به میزان ۵ درصد، رده مقاومتی سیمان مقدار بالاتر می‌باشد که مقدار آن در این مقاله ۴۲/۵ مگاپاسکال است و نسبت سنگدانه به سیمان در مقدار بیشتر و نسبت آب به سیمان حداقل مقدار است.

کلمات کلیدی: روش سطح پاسخ (RSM)، سدیم کلرید، بهینه‌سازی طرح اختلاط ملات، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2018.99589.1339
۱۳۹۶/۰۷/۰۵	۱۳۹۶/۰۹/۲۷	۱۳۹۶/۱۰/۱۹	۱۳۹۶/۱۰/۱۹	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	doi: 10.22065/JSCE.2018.99589.1339

*نویسنده مسئول: حمید اسکندری نداف

پست الکترونیکی: h.eskandari@hsu.ac.ir

Optimization Effective Factors on Compressive and Flexural Strength of Mortars using Response Surface Method

Hamid Eskandari-Naddaf [1*], Roshanak Khosrojerdi [2], Rana Koshki[3]

1- Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
2- B.S Student in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
3-MS.c. in Water and Soil Engineering, Ministry of Power, Tehran, Iran

ABSTRACT

Compressive strength and flexural properties of the cement mortar, and Water-cement ratio in the mix design, the ratio of aggregates to cement and cement strength class are the main parameters determining the properties of cement mortar. The optimization of the concrete mix design technology plays an important role, recently statistical method that has been considered by researchers to optimize the response surface methodology (RSM). In this article to achieve an optimal mix of factors affecting the quality of the mortar properties of this method has been used. In this regard, 12 mix design has been evaluated. The samples in the vicinity of solutions containing 0, 5 and 10% sodium chloride are located. The result of the paper represents the possibility of using this method is the continuous improvement of concrete mix design. Which can serve as a useful tool in concrete production units and production units used prefabricated concrete. Search optimization results with response surface method for compressive strength and flexural show that optimal mix design to achieve maximum compressive and flexural strength a mix design which the percentage of chlorine used at a rate of 5%, cement strength class is highest (42.5 MPa) and water to cement ratio is the minimum amount.

ARTICLE INFO

Received: 27/09/2017
Revised: 18/12/2017
Accepted: 09/01/2018

Keywords:
Response surface methodology (RSM),
Sodium chloride,
optimized mix design of concrete,
Compressive strength,
Flexural strength.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.99589.1339

*Corresponding author: Hamid Eskandari-Naddaf
Email address: h.eskandari@hsu.ac.ir

۱- مقدمه

در بخش طرح اختلاط بتن در پروژه‌های عمرانی عوامل ورودی متعددی با سطوح مختلف وجود دارند که هرکدام ممکن است، بر روی خواص نهایی بتن ساخته‌شده تأثیر داشته باشند و در بسیاری از این فرآیندها از روش سعی و خطا برای شناسایی عوامل ورودی مؤثر، استفاده می‌شود، اما اجرای روش سعی و خطا به تعداد آزمایش‌های زیادی احتیاج دارد، لذا هزینه و صرف زمان بالا را برای مهندسین به وجود می‌آورد [۱]. بنابراین، طراحی آزمایش یک ابزار مهم جهت تعیین پارامترهای مؤثر بر این فرآیندها و بهبود آن‌ها محسوب می‌شود. لذا این ابزار می‌تواند به مهندسین کمک نماید تا بهترین ترکیب از پارامترهای طرح اختلاط را به‌منظور دستیابی به هدف مشخص شناسایی نمایند [۲]. روش بهینه‌سازی سطح پاسخ، ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آمار است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که متغیر پاسخ موردنظر تحت تأثیر چندین متغیر ورودی قرار می‌گیرد، مفید می‌باشد و هدف آن بهینه‌سازی پاسخ است در این تحقیق برای بررسی هم‌زمان چهار عامل نسبت آب به سیمان، نسبت سنگدانه به سیمان، رده مقاومتی سیمان و میزان سدیم کلرید بر خواص مکانیکی ملات و تعیین مقادیر بهینه این پارامترها، روش بهینه‌سازی سطح پاسخ استفاده‌شده است. مبنای پیشنهاد RSM مدل رگرسیون می‌باشد که می‌تواند با درون‌یابی مقادیر دقیق‌تری را ارائه دهد. بررسی جزییات سازه‌های بتن مسلح حاشیه مناطق دریایی، به دلیل در معرض قرارگرفتن در محیط یون‌های کلرید از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۳]. نفوذ کلرید یون‌ها از طریق پوشش بتن مشکل عمده سازه‌های دریایی است [۴, ۵]. نفوذپذیری بتن از عواملی هست که دوام بتن را در برابر حمله یون‌های کلر تحت تأثیر قرار می‌دهد [۶, ۷].

در این پژوهش تأثیر درصدهای مختلف یون‌های کلرید موجود در آب عمل‌آوری را بر مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی موردبررسی قرار دهیم. اختلاف موجود بین تحقیق حاضر و تحقیق‌های پیشین در این است که در این تحقیق یون‌های کلرید در آب عمل‌آوری قرار دارد، حال‌آنکه در تحقیق‌های پیشین یون‌های کلرید در آب اختلاط ملات موجود بوده است. بنابراین برخلاف تحقیق‌های قبلی، یون‌های کلرید تحقیق حاضر از ابتدا در داخل ملات نبوده و پس از طی مدت‌زمانی به داخل ملات راه‌یافته و در واکنش‌ها شرکت می‌کند. لذا انتظار داریم که در زمان‌های اولیه تغییری در مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی مغروق در محلول نمک نسبت به نمونه‌های شاهد مغروق در آب نداشته باشیم و رخداد تغییرات مقاومت فشاری اعم از کاهشی یا افزایشی در زمان‌های بالاتری از ۳، ۷ و ۱۴و حتی در بعضی موارد ۲۸ روز، داشته باشیم.

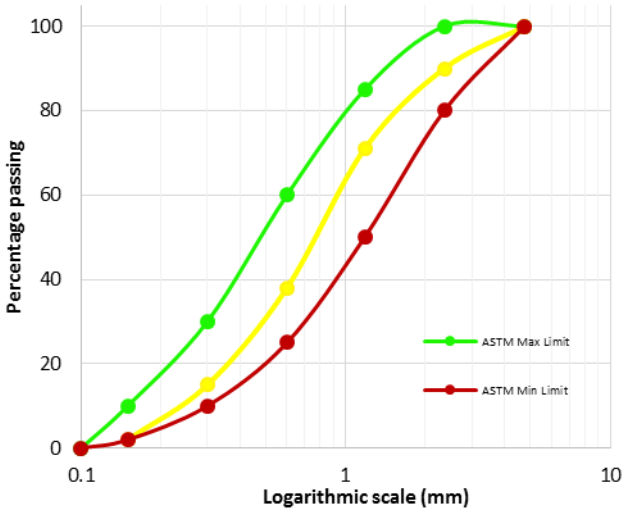
آبرامز در پژوهشی عنوان نمود که به‌کارگیری آب حاوی یون‌های کلرید در ساخت بتن منجر به افزایش مقاومت فشاری سه‌روزه و هفت‌روزه و کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه و سنین بالاتر می‌گردد [۸]. نارور در تحقیقی نشان داد که استفاده از آب حاوی یون‌های کلراید در ساخت بتن، موجبات افزایش مقاومت فشاری تا سن ۳ ماهگی و کاهش آن بعد از ۳ ماهگی را پدید می‌آورد [۹]. گریفین و همکاران [۱۰] در مقاله‌ای بیان کردند که به‌کارگیری آب حاوی یون‌های کلرید مقاومت فشاری در کلیه سنین را افزایش می‌دهد . در یک ملات سیمان مرسوم عوامل مختلفی ازجمله مصالح مورداستفاده تأثیر چشم‌گیری بر خواص مکانیکی ملات سیمان دارد [۱۱]. ازاین‌رو عوامل مهمی وجود دارند که بر روی مقاومت ملات مؤثر هستند. تحقیقات اولیه بر روی ملات درباره تأثیر نسبت آب به سیمان بوده [۱۲] و پس از آن تحقیقات مختلفی بر روی مقاومت فشاری بتن انجام شده که نشان داده است مقاومت فشاری به‌شدت با تغیر نسبت آب به سیمان و در پی آن مقدار سیمان متغیر خواهد بود [۱۳] همچنین اثر مواد سنگی در ملات زیاد موردمطالعه قرارگرفته نشده است [۱۴] با این‌حال نویل در تحقیقاتش بیان کرده که مواد سنگی بر روی خواص بتن تازه و مکانیکی ملات تأثیرگذار است. مطالعاتی نیز درباره نوع سنگدانه و تأثیر آن بر ملات انجام شده است که از تأثیر چشم‌گیر نوع سنگدانه بر خواص ملات حکایت دارد [۱۵] لذا با توجه به اینکه تولید انواع سیمان رو به گسترش می‌باشد، این تحقیقات در بررسی تأثیر یون کلرید بر قطعات بتن مسلح به‌صورت تفکیک و مشخص مورد بررسی قرارگرفته که نتایج آن به‌صورت کاربردی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۶]. در این مقاله نمونه‌های فشاری و خمشی ملات در نسبت‌های مختلف سنگدانه به سیمان با مقاومت‌های مختلف سیمان (۳۲/۵ و ۴۲/۵ مگاپاسکال) ساخته‌شده است که در محیط‌هایی با درصدهای مختلف کلر قرار گرفته اند، و آزمایش‌های فشاری و خمشی روی نمونه‌ها صورت گرفته و نتایج به‌دست‌آمده به‌منظور دستیابی به طرح اختلاط بهینه با روش سطح پاسخ بهینه‌سازی شده اند.

۲- مواد و مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌ها از دو نوع سیمان تیپ یک سبزوار با مقاومت ۳۲/۵ مگاپاسکال و تیپ یک بجنورد با مقاومت ۴۲/۵ مگاپاسکال استفاده‌شده که مشخصات شیمیایی آن‌ها به ترتیب در جدول ۱ آمده است. آب مصرفی مورداستفاده در طرح اختلاط از آب شرب شهر سبزوار بوده است و به‌منظور دستیابی به روانی مطلوب و کمک به توزیع بهتر و یکنواخت‌تر ذرات در ملات سیمان از فوق روان کننده استفاده‌شده است. فوق روان کننده مصرفی با پایه پلی‌کربوکسیلات‌های اصلاح‌شده و نام تجاری PCE می‌باشد. سدیم کلرید نیز در مقادیر ۰ تا ۵ درصد برای ایجاد شرایط محیطی کلریدی وجود دارد. سنگدانه مصرفی در طرح اختلاط از معادن شرکت تکنوسیلیس تهران تهیه‌شده که سیلیسی بوده و حداکثر قطر سنگدانه ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی ماسه بوده و نشان می‌دهد که دانه‌بندی آن در حدود استاندارد قرار می‌گیرد.

جدول ۱: خواص شیمیایی سیمان با مقاومت‌های ۳۲/۵ و ۴۲/۵ مگاپاسکال

Properties of Cement	C 32.5	C 42.5
SiO_2	20.4	20.2
$Al2O_3$	4.56	4.6
Fe_2O_3	3.4	3.5
CaO	64.12	64
MgO	1.93	1.94
SO_3	2.3	2.4
Na_2O	0.32	0.35
K_2O	0.7	0.7
LOI	2.2	2.7
F.CaO	1.3	1.3
C_3A	6.33	6.27
C_3S	63.94	64.27



شکل ۱: نمودار سنگدانه مصرفی در طرح اختلاط نمونه‌های ملات

۳ ساخت نمونه و آزمایش نمونه‌ها

با ۱۲ طرح اختلاط تعداد ۷۲ نمونه برای مقاومت فشاری و ۴۸ نمونه برای مقاومت خمشی در نسبت‌های متفاوت آب به سیمان، سنگدانه به سیمان، انواع سیمان و فوق روان کننده، در ابعاد ۵×۵×۵ و ۴×۴×۱۶ سانتی‌متر مکعب ساخته شد. طرح‌های اختلاط به ازای سه غلظت مختلف از سدیم کلرید برای مقاومت فشاری و دو غلظت برای مقاومت خمشی آزمایش می‌شود. جزئیات کامل طرح‌های اختلاط در جدول ۲ آورده شده است.

نمونه‌های مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب با ابعاد ۵×۵×۵ و ۴×۴×۱۶ هستند. ساخت نمونه‌ها با توزین سیمان و ماسه شروع‌شده و به‌گونه‌ای مخلوط شدند که هیدراتاسیون کامل انجام شود. نمونه‌های فشاری بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و در سه ظرف مختلف حاوی ۰، ۱/۲۵، ۲/۵، ۳/۷۵ و ۵ درصد سدیم‌کلرید به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. سپس نمونه‌ها از آب خارج‌شده و جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری تحت آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌های خمشی نیز در شرایط مشابه مورد آزمایش قرار گرفتند با این تفاوت که آن‌ها تنها در دو ظرف حاوی ۵ و ۱۰ درصد سدیم‌کلرید عمل‌آوری شده و پس از گذشت زمان ۶۰ روز آزمایش شدند. نمونه‌های آزمایش‌شده در شکل ۲ نشان داده‌شده است.

جدول ۲: طرح اختلاط نمونه‌های ملات آزمایشگاهی

Mixture Number	Cement Class	C	W/C	S/C	SP	C/(W+S)
1	325	700	0.3	3	6	0.3
2	325	700	0.3	2.5	6	0.36
3	325	700	0.4	3	4	0.29
4	325	700	0.4	2.5	4	0.34
5	325	700	0.6	3	0	0.28
6	325	700	0.6	2.5	0	0.32
7	425	700	0.3	3	6	0.3
8	425	700	0.3	2.5	6	0.36
9	425	700	0.4	3	4	0.29
10	425	700	0.4	2.5	4	0.34
11	425	700	0.6	3	0	0.28
12	425	700	0.6	2.5	0	0.32

شکل ۲: نمونه‌های فشاری و خمشی ساخته شده پس از انجام آزمایش

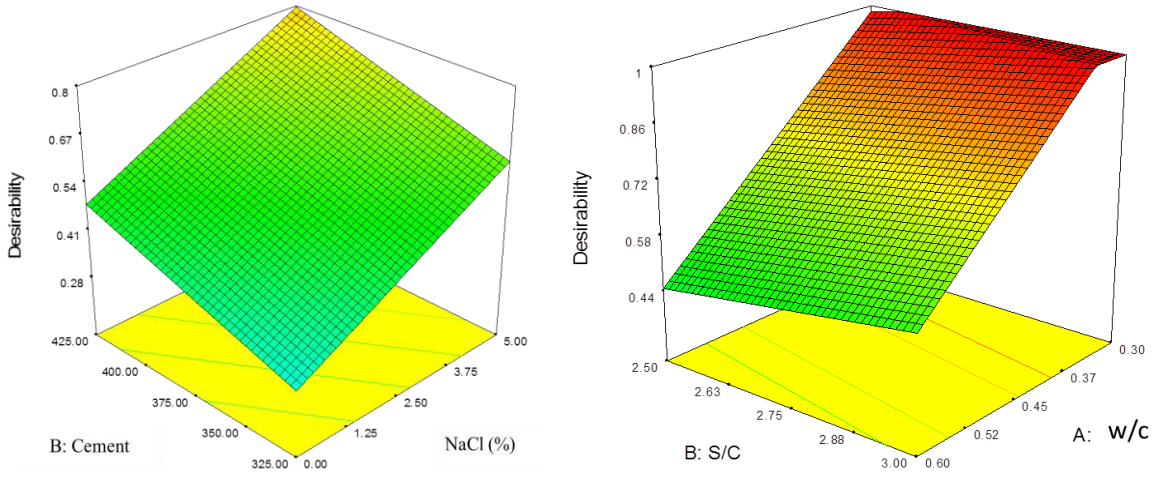
۴- روش سطح پاسخ

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های ملات توسط نرم‌افزار Design Expert مورد تجزیه وتحلیل آماری قرار گرفت. در این روش مقادیر آب به سیمان به‌عنوان متغیر ورودی A، مقادیر سنگدانه به سیمان به‌عنوان متغیر ورودی B، مقدار سدیم کلرید به‌عنوان متغیر ورودی C و مقدار مقاومت فشاری و خمشی به‌عنوان پاسخ به نرم‌افزار معرفی‌شده‌اند. نتایج آزمایش در جدول ۳ و۴ آورده شده است. در کارهای مهندسی دستیابی به حالت بهینه با در نظر گرفتن پارامترها و سطوح فاکتورها می‌تواند بسته به شرایط بیشترین یا کمترین در یک مقدار مورد نظر باشد.

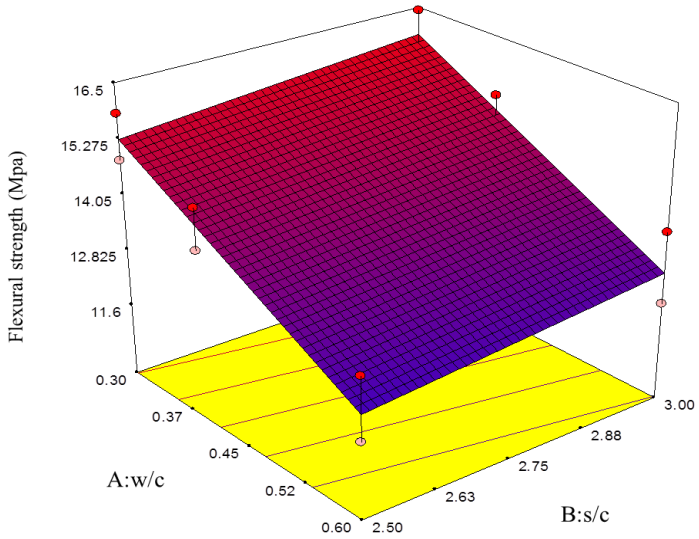
روش RSM یکی از روش‌های DOE[1] است که می‌تواند برای بهینه‌سازی سیستم‌های چند متغیره با طراحی دقیق و مناسب که به دنبال یافتن ارتباط بین یک متغیر خروجی با متغیرهای ورودی یا پیش‌بینی‌شده و سطوح آن‌که بر پاسخ موثراند، مناسب باشد. در ابتدا این روش صرفاً برای یافتن ارتباط بین پاسخ و متغیرهای ورودی بود اما پس از چندی توانستند بهینه‌سازی را با این روش انجام دهند.

جدول آنووا نشان می‌دهد که آزمون عدم برازش برای تمامپارامتر های مورد اندازه، معنی‌دار نبوده است. از طرف دیگر پاسخ‌ها با ضرایب اطمینان ۹۵ درصد قابل‌توجه بود که این امر نشان‌دهنده این است که تمام مدل‌ها به‌خوبی روند تغییر داده‌ها را نشان می‌دهند. از طرف دیگر ضریب تعیین پراکندگی[2] تصحیح‌شده نیز به‌منظور اطمینان از این مسئله که مدل می‌تواند به‌خوبی اعداد را تخمین بزند، محاسبه شد؛ ضریب تعیین پراکندگی به‌عنوان نسبت تغییرات توصیف‌شده توسط مدل به تغییرات کل بیان می‌شود که معیاری از درجه تناسب برازش می‌باشد. هرچه مقدار ضریب تعیین پراکندگی که همان قدرت مدل برازش یافته در توصیف تغییرات پاسخ به‌عنوان تابعی از متغیرهای مستقل بیشتر باشد، با توجه به جدول برای فاکتور راندمان، مدل درجه دوم کاسته ازنظر آماری معنی‌دار بود، مقدار بالای ضریب تعیین پراکندگی ۰/۸۶۸۷ برای مقاومت فشاری و ۰/۸۵۶۳ برای مقاومت خمشی بیانگر قدرت بالای مدل درجه دوم در پیش‌بینی بوده است. مشاهدات انجام شده، بیانگر همبستگی بسیار خوب بین نتایج به‌دست‌آمده با روش تجربی و مقادیر پیش‌بینی‌شده با روش آماری است[۱۶]. با به‌کارگیری روش آماری سطح پاسخ، معادله اخیر که نشان‌دهنده ارتباط تجربی متغیرهای آزمایش و مقاومت به‌صورت کدگذاری شده و غیر کدگذاری به‌دست‌آمده است:

[1] Design of experiment
[2] R-Squared



شکل ۳: نمایش سه‌بعدی ارزش شایستگی پاسخ



شکل ۴: نمایش سه‌بعدی تأثیر فاکتورهای مؤثر بر مقاومت خمشی

نمودار Desirability به آنالیز تابع شایستگی می‌پردازد که اساس آن کاهش گرادیان الگوریتم به‌منظور دستیابی به بیشترین ارزش پاسخ و شایستگی جهت رسیدن به بهینه‌ترین راهکار و پاسخ است. محدوده‌ی این ارزش بین بازه ۰ تا ۱ بوده و هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان دقت بالای نتایج و پاسخ‌های حاصل از آزمایش می‌باشد بر اساس شکل ۸ در حضور فاکتور C و نوع سیمان مصرفی مقدار ارزش شایستگی در مقدار نمک ۵ درصد و سیمان با مقاومت ۴۲/۵ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. ازآنجایی‌که مقاومت و جذب آب بتن به‌طور قابل ملاحظه‌ای وابسته به نسبت آب به سیمان می‌باشد کاهش نسبت آب به سیمان در یک عیار سیمان ثابت موجب افزایش مقاومت و کاهش جذب آب در بتن می‌گردد [۱۷, ۱۸]. از طرفی بیشترین مقدار شایستگی فرآیند پاسخ در هنگام حضور نسبت آب به سیمان و سنگدانه به سیمان در سطح در کمترین سطح نسبت آب به سیمان و بیشترین سطح نسبت سنگدانه به سیمان رخ می‌دهد. شکل ۴ تأثیر هم‌زمان دو فاکتور سنگدانه به سیمان و نسبت آب به سیمان را برای بیشینه مقاومت خمشی نشان می‌دهد و بیان می‌کند که در نسبت سنگدانه به سیمان ۳ و کمترین نسبت آب به سیمان که مقدار آن ۰/۳ است، طرح اختلاط بهینه است و بیشترین مقاومت خمشی در این سطوح به دست می‌آید. همچنین با کاهش مقدار آب به سیمان مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. در جدول تحلیل واریانس به هر

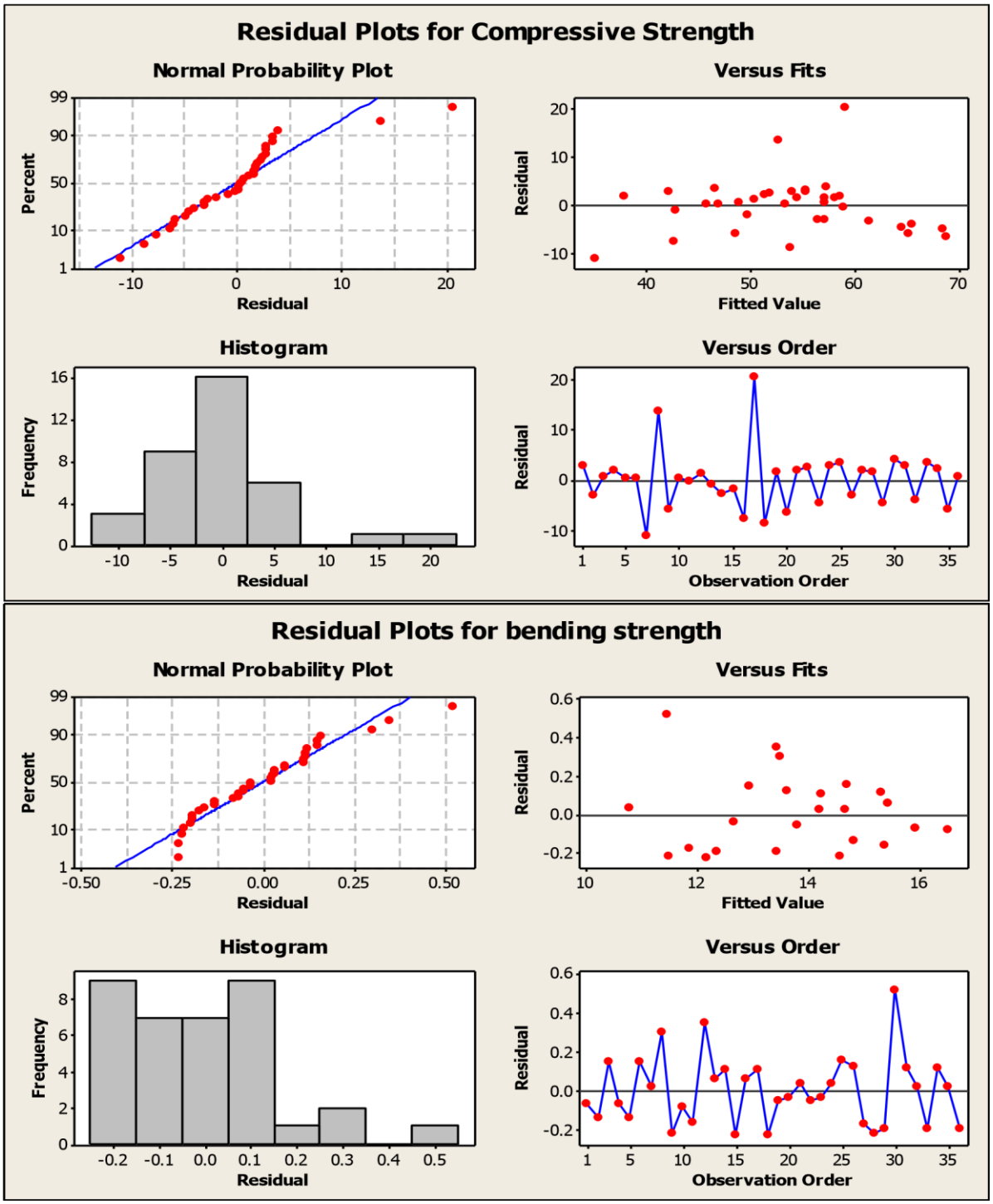
عاملی که ارزش p کمتر از ۰/۰۵ داشت، یک فاکتور مؤثر گویند. بر همین اساس مطابق جدول ۳ می‌توان دریافت که مدل دارای ارزش p کمتر از ۰/۰۵ است که این نشان از درست بودن مدل و مؤثر بودن آن بر فرآیند سطح پاسخ است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که فاکتور آب به سیمان و سیمان به نمک به دلیل داشتن ارزش p کمتر از ۰/۰۵ به‌عنوان فاکتورهای مؤثر و چشم‌گیر بر فرآیند پاسخ که مقاومت فشاری است، تلقی می‌شوند. از طرفی ارزش F بالای نسبت آب به سیمان برای مقاومت فشاری نشان تأثیر چشم‌گیر این فاکتور بر مقاومت فشاری ملات است. برای مقاومت خمشی نیز فاکتورهای سیمان و سدیم‌کلرید فاکتورهای مهم و تأثیرگذاری بر مقاومت خمشی ملات دارند که این نتایج با ارزشF بالای هر فاکتور مؤثر قابل توجیه است.

جدول ۳ : نتایج تحلیل واریانس نهایی برای مقاومت فشاری

Source	Sum of Square	df	Mean square	F value	p-value prob> F	Significance
Model	70.68	3	23.56	70.54	< 0.0001	significant
A-W/C	57.24	1	57.24	171.4	< 0.0001	significant
B-S/C	3.08	1	3.08	9.22	< 0/0047	significant
C-NaCl	10.36	1	10.36	31.01	< 0.0001	significant
Residual	10.69	32	0.33	-	-	-
Lack of Fit	1.75	8	0.22	0.59	0.778	not significant
Pure Error	8.94	24	0.37	-	-	-
Cor Total	81.36	35	-	-	-	-

جدول ۴ : نتایج تحلیل واریانس نهایی برای مقاومت خمشی

Source	Sum of Square	df	Mean square	F value	p-value prob> F	Significance
Model	160566015.4	5	32113203.08	44.53610231	< 0.0001	significant
A-NaCl	135960176.7	1	135960176.7	188.5559757	< 0.0001	significant
B-cement	19830972.86	1	19830972.86	27.50252704	< 0.0001	significant
C-w/c	1008411.782	1	1008411.782	1.398512948	0.2463	not significant
D-s/c	30532.74588	1	30532.74588	0.04234425	0.8384	not significant
E-c/w+s	57872.02733	1	57872.02733	0.080259653	0.7789	not significant
Residual	21631800.77	30	721060.0258	-	-	-
Cor Total	182197816.2	35	-	-	-	-



شکل ۵: نمودار باقی‌مانده برای مقاومت فشاری و خمشی

شکل ۵ بیانگر نمودار های باقیمانده برای بررسی صحت آماری مدل برای مقاومت های فشاری و خمشی می باشد که به چهار فرضیه تقسیم بندی شده که هریک می بایت شرایط خاص خود را داشته باشد. فرض اول به بررسی نرمال بودن داده ها می پردازد. با توجه به اینکه خطاها دارای توزیع نرمال با میانگین صفر می‌باشند، با رسم نمودار احتمال خطاها درصورتی‌که این نمودار شبیه یک خط مستقیم باشند می‌توان به‌کفایت مدل دست‌یافت. در بررسی واریانس خطا اگر مدل درست باشد، خطاها باید بی ساختار باشند و به هیچ متغیری ازجمله متغیر پاسخ وابسته نباشند. این بررسی برای کفایت مدل‌ها و پراکنش خطای پارامترها در نمودارNormal probability plot (نمودار احتمال نرمال) و Versus Fits نشان داده‌شده است. بنابراین با اجرای این روش طراحی، پارامترهای مؤثر بر بهبود مقاومت فشاری و خمشی، تعیین گردید، در ادامه تعیین مقادیر بهینه این پارامترها نیز مدنظر است. نمودار احتمال نرمال، نرمال بودن داده‌ها را بررسی می‌کند. در اینجا بهترین خط گذرنده بین داده رسم شده است و هرچه این نقاط به خط مطلوب نزدیک‌تر باشند نشان از نرمال بودن داده می‌دهد و می‌توان دید که داده‌ها تقریباً نرمال و توزیع یکسان و مطلوبی صورت گرفته است.

فرض بعدی Versus Fit مربوط به ثابت بودن واریانس‌ها است. واریانس داده‌ها در صورتی ثابت است که تغییرات باقیمانده‌ها از روند خاصی پیروی نکنند و شکل خاصی نداشته باشند. همان‌طور که در شکل پیداست روند خاصی مشاهده نمی‌شود پس می‌توان نتیجه گرفت که واریانس داده‌ها ثابت می‌باشد.

نمودار هیستوگرام شرط انحراف داده‌ها را بررسی می‌کند. هرچه میزان انحراف داده‌ها کمتر باشد نشان از مطلوب بودن داده است. از طرفی شکل نمودار باید حالت زنگوله‌ای داشته باشد. این شرط به‌طور تقریبی برقرار است و می‌توان نتیجه گرفت که داده‌ها از یک جمعیت نرمال آمده‌اند. فرض آخر فرض استقلال داده نسبت به زمان است. در اینجا ترتیب آزمایش صورت گرفته برای دو فاکتور نشان داده‌شده است و چون شکل و روند خاصی در شکل دیده نمی‌شود پس داده‌های ما نسبت به زمان مستقل می‌باشند.

یک سری از نمودارها جهت بررسی صحت مدل و قابل‌اعتماد بودن آن استفاده می‌شود. نمودارهای شماره ۵ نمودارهای باقیمانده نام دارند که برای بررسی کفایت مدل از آن‌ها استفاده می‌شود. برای این بررسی چهار فرض در نظر گرفته می‌شود. فرض اول نرمال بودن داده‌ها را بررسی می‌کند. در این نمودار با مشخص کردن نقاط و بهترین خط عبوری میان داده‌ها می‌توان به نرمال بودن داده‌ها پی برد. بر این اساس هرچه این نقاط به خط موردنظر نزدیک‌تر باشد نرمال بودن داده‌ها را نتیجه می‌دهد. پس می‌توان نتیجه گرفت که توزیع داده‌ها مطلوب است و داده‌ها تقریباً نزدیک خط هستند و نرمال می‌باشند. فرض بعدی فرض ثابت بودن واریانس‌ها می‌باشد. بر این اساس اگر تغییرات باقیمانده‌ها از یک‌روند خاصی پیروی نکند شرط ثابت بودن واریانس برقرار است. پس می‌توان دید که باقیمانده‌ها روند خاصی را نشان نداده پس تقریباً واریانس بین داده‌ها ثابت می‌باشد.

فرض سوم هیستوگرام می‌باشد. این نمودار پرت بودن داده‌ها را نیز نشان می‌دهد. هرچه این پرت بودن کمتر باشد داده‌ها مطلوب‌تر می‌باشند. در این نمودار می‌بایست تغییرات باقیمانده‌ها حالت زنگوله‌ای به خود بگیرد. این شرط تقریباً برقرار است پس می‌توان دید که داده‌ها از یک جمعیت نرمال آمده‌اند. فرض بعدی فرض استقلال داده‌ها نسبت به زمان است. در این فرض به بررسی مستقل بودن داده‌ها اشاره می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این نمودار ترتیب نمونه آزمایش‌شده برای دو فاکتور را نشان می‌دهد و چون شکل نمودار از روند خاصی پیروی نمی‌کند. پس داده‌ها نسبت به زمان مستقل هستند.

در نمودار مستطیلی وقتی یک یا دومیله به دور از بقیه هستند، این نقاط پرت محسوب می‌شوند. در نمودار مستطیلی مربوط به مقاومت خمشی بتن نقاط پرت مربوط به مقادیر W/C بزرگ‌تر از ۰/۴ و در نمودار مستطیلی مقاومت فشاری این نقاط مربوط به نمک بزرگ‌تر از ۵٪ هستند. هیستوگرام یک ابزار اکتشافی برای نشان دادن ویژگی‌های کلی باقی‌مانده‌هاست و دربرگیرنده : مقادیر معمول، اثرات پراکندگی و قالب است. هیستوگرام ثابت می‌کند که داده‌ها اریب هستند اندکی پرتی وجود دارد. بر این اساس با توجه به اینکه در روش آماری سطح پاسخ مدل های آماری و نمودار های باقیمانده برای مقاومت های فشاری و خمشی قوانین و شرایط خود رعایت کرده اند و راستی آزمایی آماری به درستی انجام شده است، پس می توان گفت که نتایج خروجی روش آماری سطح پاسخ قابل توجیه و قابل قبول است.

۵- نتیجه‌گیری

روش آماری سطح پاسخ برای بررسی تأثیر فاکتورهای نسبت آب به سیمان، نسبت سنگدانه به سیمان و رده مقاومتی سیمان کارایی مناسب دارد که راه‌حلی مناسب برای بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن با استفاده از آزمایش‌های طراحی‌شده می‌باشد. هدف از این مطالعه به دست آوردن طرح اختلاط بهینه جهت دستیابی به بیشینه مقاومت فشاری و خمشی بتن می‌باشد. با استفاده از روش طراحی بهینه آزمایش‌ها می‌توان به گرفتن نتایج مطلوب با صرف حداقل هزینه دست‌یافت.

در روش سطح پاسخ نیز فاکتور W/C به‌عنوان مؤثرترین فاکتور بر مقاومت فشاری ملات سیمان تلقی شده است و بهینه‌ترین سطح آن سطح اول این فاکتور (۰/۳) می‌باشد و حالت بهینه سطح سدیم کلرید ۵ درصد می‌باشد که به‌عنوان سطح بهینه در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نمودار سرفیس روش سطح پاسخ، بیشترین مقاومت فشاری در کمترین نسبت W/C و شیب زیاد این فاکتور در نمودار نشان از تأثیر چشم‌گیر این فاکتور بر مقاومت پاسخ دارد.

با توجه به تحلیل نمودارهای سطح پاسخ می‌توان دریافت که طرح اختلاط بهینه برای بیشینه مقاومت فشاری سیمان با رده مقاومتی ۴۲/۵ مگاپاسکال است و مقدار سدیم کلرید محیط ۵٪ می‌باشد و هرچه درصد یون کلر افزایش‌یافته و رده مقاومتی از ۳۲۵ به ۴۲۵ افزایش یابد، به بهبود مقاومت فشاری کمک می‌کند.

با توجه به نمودارهای به‌دست آمده از نتایج سطح پاسخ برای به دست آوردن بیشینه مقاومت خمشی، هرچقدر نسبت سنگدانه به سیمان بالاتر رود و از سطح ۲/۵ به ۳ افزایش یابد و همچنین نسبت آب به سیمان در محدود حداقل باشد، در رده مقاومتی ۴۲/۵ مگاپاسکال برای سیمان، طرح اختلاط بهینه است.

مراجع

[1]Mundra, P., K. Desai, and S. Lele, *Application of response surface methodology to cell immobilization for the production of palatinose.* Bioresource Technology, 2007. 98(15): p. 2892-2896.

[2]Verran, G., R. Mendes, and L. Dalla Valentina, *DOE applied to optimization of aluminum alloy die castings.* Journal of materials processing technology, 2008. 200(1): p. 120-125.

[3]El-Dieb, A.S., *Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers.* Materials & Design, 2009. 30(10): p. 4286-4292.

[4]Shi, X., et al., *Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview.* Construction and Building Materials, 2012. 30: p. 125-138.

[5]Farahani, A., H. Taghaddos, and M. Shekarchi, *Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment.* Cement and Concrete Composites, 2015. 59: p. 10-17.

[6]Basheer, L., J. Kropp, and D.J. Cleland, *Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review.* Construction and building materials, 2001. 15(2): p. 93-103.

[7]Eskandari, H., A.M. Nic, and A. Ghanei, *Effect of Air Entraining Admixture on Corrosion of Reinforced Concrete.* Procedia Engineering, 2016. 150: p. 2178-2184.

[8]Abrams, D.A. *Tests of impure waters for mixing concrete*. in *Journal Proceedings*. 1924.

[9]Narver, D., *Good concrete made with coral and water.* Civil Engineering, 1964. 24: p. 654-658.

[10]Griffin, D.F. and R.L. Henry, *The effect of salt in concrete on compressive strength, water vapor transmission, and corrosion of reinforcing steel*. 1962, NAVAL CIVIL ENGINEERING LAB PORT HUENEME CA.

[11]Praveen, K. and R. Krishna, *Strength and workability of cement mortar with manufactured sand.* International Journal of Research in Engineering and Technology, 2015. 4: p. 186-89.

[12]Feret, R., *Essais de divers sables et mortiers hydrauliques.* Ann. Ponts Chauss. Mémoires et Documents, 1896. 7: p. 174-197.

[13]Rao, G.A., *Generalization of Abrams' law for cement mortars.* Cement and Concrete Research, 2001. 31(3): p. 495-502.

[14]Haach, V.G., G. Vasconcelos, and P.B. Lourenço, *Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars.* Construction and Building Materials, 2011. 25(6): p. 2980-2987.

[15]De Schutter, G. and A.-M. Poppe, *Quantification of the water demand of sand in mortar.* Construction and Building Materials, 2004. 18(7): p. 517-521.

[16]Razak, H.A., H. Chai, and H. Wong, *Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials.* Cement and Concrete Composites, 2004. 26(7): p. 883-889.
[17]Kolias, S. and C. Georgiou, *The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete.* Cement and Concrete Composites, 2005. 27(2): p. 211-216.
[18]Kostić, S., N. Vasović, and D. Sunarić, *A new approach to grid search method in slope stability analysis using Box–Behnken statistical design.* Applied Mathematics and Computation, 2015. 256: p. 425-437.