

Concrete Slump, Flow, Compressive_Strength Prediction with Type-1 Fuzzy Rule-based System

دانشگاه شیراز

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

عنوان: Prediction with Type-1 Fuzzy Rule-based System

درس: سیستم ها و گزاره های فازی

نام استاد: دکتر تحیری

نام دانشجو: سعید آریادوست

شماره دانشجویی: 40230560

چکیده:

این پروژه به طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم فازی نوع 1 برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن، از جمله اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری بتن 28 روزه می‌پردازد. ویژگی‌های مختلف بتن به‌عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته شده‌اند، که شامل مقدار سیمان، سرباره، خاکستر پرنده، آب، فوق‌روان‌کننده، سنگدانه درشت و سنگدانه ریز است. هدف این پروژه، طراحی یک سیستم فازی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بتن برای پیش‌بینی خروجی‌های مختلف بتن است. در این مدل، از خوشه‌بندی KMeans برای تعیین مراکز قواعد و از بهینه‌سازی برای تعیین مقادیر بهینه انحراف معیار (σ) استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل، میانگین و بهترین مقدار RMSE برای هر یک از پیش‌بینی‌ها محاسبه شده و نتایج مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده عملکرد قابل توجه سیستم فازی در پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن با استفاده از داده‌های ورودی است. این مدل می‌تواند در طراحی بتن‌های مقاوم و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید بتن مورد استفاده قرار گیرد.

مقدمه:

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساختمان سازی است و ویژگی های آن به طور مستقیم بر کیفیت و دوام سازه های بتنی تأثیر می گذارد. یکی از ویژگی های مهم بتن، اسلامپ آن است که نشان دهنده روانی و قابلیت پخش شدن بتن در قالب ها است. در کنار اسلامپ، دیگر ویژگی های بتن مانند جریان و مقاومت فشاری 28 روزه نیز برای ارزیابی کیفیت بتن اهمیت دارند. در این راستا، پیش بینی دقیق این ویژگی ها می تواند به بهبود فرآیندهای تولید و کاهش هزینه ها کمک کند.

امروزه مدل های مختلفی برای پیش بینی ویژگی های بتن استفاده می شوند. یکی از این مدل ها، سیستم های فازی است که می توانند در مواجهه با داده های پیچیده و غیرقطعی، عملکرد خوبی داشته باشند. سیستم فازی تسکی-سوگنو (Takagi-Sugeno Fuzzy System) یکی از مدل های قدرتمند در این زمینه است که از ترکیب قواعد فازی و مدل های ریاضی برای پیش بینی خروجی ها استفاده می کند. این مدل با توجه به ورودی های مختلف، قوانینی برای پیش بینی خروجی ها می سازد و سپس با استفاده از داده های آموزشی، این قوانین را بهینه می کند.

هدف این پروژه طراحی و پیاده سازی یک سیستم فازی نوع 1 برای پیش بینی ویژگی های مختلف بتن از جمله اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری 28 روزه است. داده های مورد استفاده در این پروژه شامل 103 نمونه از ویژگی های مختلف بتن و نتایج آزمایش های مربوط به اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری است. برای طراحی مدل فازی، از الگوریتم خوشه بندی KMeans برای تعیین مراکز قواعد فازی و از بهینه سازی برای تعیین مقادیر بهینه انحراف معیار (σ) استفاده می شود.

این پروژه می تواند به مهندسان و محققان کمک کند تا با استفاده از مدل های فازی، پیش بینی دقیقی از ویژگی های بتن داشته باشند و از آن در بهینه سازی فرآیندهای تولید بتن و کاهش هزینه های مربوط به آزمایش ها استفاده کنند.

هدف پروژه:

هدف اصلی این پروژه طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم فازی نوع 1 به منظور پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن، از جمله اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری 28 روزه است. با استفاده از داده‌های تجربی مربوط به ترکیب اجزای بتن (سیمان، سرباره، خاکستر پرنده، آب، فوق‌روان‌کننده، سنگدانه درشت و سنگدانه ریز)، این سیستم فازی قادر خواهد بود تا پیش‌بینی‌های دقیقی از ویژگی‌های بتن در حالت‌های مختلف تولید ارائه دهد.

برای رسیدن به این هدف، مراحل مختلفی طی خواهد شد:

1. **پیش‌پردازش داده‌ها:** شامل حذف داده‌های ناقص، استانداردسازی ویژگی‌های ورودی و تقسیم‌بندی داده‌ها به مجموعه‌های آموزشی و تستی.
2. **استفاده از خوشه‌بندی C-Means:** این الگوریتم برای تعیین مراکز قواعد فازی و گروه‌بندی داده‌ها به کار خواهد رفت.
3. **طراحی مدل فازی تسکی-سوگنو:** برای هر خوشه، یک مدل رگرسیونی مبتنی بر ویژگی‌های ورودی و خروجی‌های مربوطه آموزش داده خواهد شد.
4. **بهینه‌سازی پارامترها:** استفاده از بهینه‌سازی برای تعیین مقادیر بهینه انحراف معیار (σ) هر قاعده فازی، به منظور کاهش خطای پیش‌بینی.
5. **ارزیابی مدل:** ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های مختلف مانند RMSE و مقایسه نتایج پیش‌بینی با داده‌های واقعی.

این پروژه هدف دارد تا به کمک مدل فازی نوع 1، پیش‌بینی‌های دقیقی از ویژگی‌های مختلف بتن ارائه دهد و به بهبود فرآیندهای تولید بتن، کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و بهینه‌سازی ترکیب اجزای بتن کمک کند.

داده‌ها:

داده‌های مورد استفاده در این پروژه از فایل "concrete+slump+data.csv" استخراج شده‌اند که شامل 103 نمونه از ویژگی‌های مختلف بتن و نتایج آزمایش‌های مربوط به اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری 28 روزه است. این داده‌ها شامل 7 ویژگی ورودی و 3 ویژگی خروجی می‌باشند. ویژگی‌های ورودی شامل ترکیبات مختلف بتن به شرح زیر هستند:

ویژگی‌های ورودی (اجزای بتن):

1. **Cement:** میزان سیمان (بر حسب کیلوگرم در هر متر مکعب بتن)
2. **Slag:** میزان سرباره (بر حسب کیلوگرم در هر متر مکعب بتن)

3. **Fly ash:** میزان خاکستر پرنده (بر حسب کیلوگرم در هر متر مکعب بتن)
4. **Water:** میزان آب (بر حسب کیلوگرم در هر متر مکعب بتن)
5. **SP (Superplasticizer):** میزان فوق روان کننده (بر حسب کیلوگرم در هر متر مکعب بتن)
6. **Coarse Aggr. (Coarse Aggregates):** میزان سنگدانه درشت (بر حسب کیلوگرم در هر متر مکعب بتن)
7. **Fine Aggr. (Fine Aggregates):** میزان سنگدانه ریز (بر حسب کیلوگرم در هر متر مکعب بتن)

ویژگی‌های خروجی (ویژگی‌های بتن):

1. **SLUMP (cm):** میزان افت اسلامپ بتن (بر حسب سانتیمتر)
2. **FLOW (cm):** میزان جریان بتن (بر حسب سانتیمتر)
3. **Compressive Strength (28-day) (Mpa):** مقاومت فشاری بتن پس از 28 روز (بر حسب مگاپاسکال)

پردازش داده‌ها:

1. **حذف داده‌های ناقص:** هرگونه داده ناقص یا گم‌شده از دیتاست حذف می‌شود تا از تحلیل دقیق‌تر اطمینان حاصل شود.
 2. **انتخاب ویژگی‌ها:** تنها ویژگی‌های مهم که بر پیش‌بینی اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری تأثیر دارند انتخاب می‌شوند.
 3. **استانداردسازی داده‌ها:** برای جلوگیری از تأثیر مقیاس‌های مختلف ویژگی‌ها، داده‌های ورودی با استفاده از استانداردسازی به مقیاس مشابه تبدیل می‌شوند.
- این داده‌ها به‌طور خاص برای پیش‌بینی ویژگی‌های بتن و ارزیابی تأثیر ترکیب اجزای آن استفاده می‌شوند و مدل فازی نوع 1 برای تحلیل و پیش‌بینی این ویژگی‌ها توسعه خواهد یافت.

روش‌شناسی:

در این پروژه برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن، از سیستم فازی نوع 1 به‌عنوان مدل اصلی استفاده شده است. این سیستم از ترکیب قواعد فازی و مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی خروجی‌ها بهره می‌برد. مراحل مختلف روش‌شناسی پروژه به‌طور دقیق در زیر توضیح داده شده‌اند:

1. پیش‌پردازش داده‌ها:

پیش از اعمال مدل، لازم است داده‌ها برای استفاده در مدل فازی آماده شوند. این مراحل شامل موارد زیر می‌باشند:

- **حذف داده‌های ناقص:** در صورتی که داده‌ای در هر یک از ویژگی‌ها ناقص یا گم‌شده باشد، آن داده‌ها از دیتاست حذف خواهند شد.
- **انتخاب ویژگی‌ها:** تنها 7 ویژگی ورودی از دیتاست به عنوان ویژگی‌های ورودی به مدل انتخاب شده‌اند که شامل مقادیر سیمان، سرباره، خاکستر پرنده، آب، فوق‌روان‌کننده، سنگدانه درشت و سنگدانه ریز است.
- **استانداردسازی داده‌ها:** برای جلوگیری از اثرات مقیاس‌های مختلف ویژگی‌ها، داده‌های ورودی با استفاده از استانداردسازی به مقیاس مشابه تبدیل می‌شوند.

2. استفاده از خوشه‌بندی: C-Means

به منظور تقسیم داده‌ها به خوشه‌های مختلف، از الگوریتم C-Means استفاده می‌شود. این الگوریتم به طور خودکار مراکز قواعد فازی را مشخص می‌کند. برای این کار:

- داده‌های آموزشی با استفاده از الگوریتم C-Means به تعدادی خوشه تقسیم می‌شوند.
- تعداد خوشه‌ها (قواعد فازی) باید به طور بهینه انتخاب شود. در این پروژه تعداد خوشه‌ها از بین مقادیر مختلف (مثلاً 3، 5، 7) انتخاب می‌شود.

3. طراحی مدل فازی تسکی-سوگنو:

پس از خوشه‌بندی داده‌ها، مدل فازی تسکی-سوگنو برای پیش‌بینی ویژگی‌های بتن طراحی می‌شود. این مدل شامل مراحل زیر است:

- **محاسبه تابع عضویت گاوسی:** برای هر مرکز خوشه، تابع عضویت گاوسی محاسبه می‌شود تا وزن عضویت هر نمونه داده نسبت به آن مرکز مشخص شود.
- **رگرسیون چندمتغیره:** برای هر خوشه، یک مدل رگرسیونی مبتنی بر داده‌های ورودی و خروجی‌های مربوطه آموزش داده می‌شود. این مدل رگرسیونی به طور وزنی با استفاده از وزن‌های محاسبه‌شده توسط تابع عضویت به روزرسانی می‌شود.
- **پیش‌بینی:** پس از آموزش، مدل برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن (اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری) برای داده‌های جدید استفاده می‌شود.

4. بهینه‌سازی پارامترها:

برای بهبود دقت پیش‌بینی، پارامترهای مدل فازی به ویژه انحراف معیار (σ) هر قاعده بهینه می‌شوند. این کار از طریق بهینه‌سازی تابع هدف انجام می‌شود که به صورت زیر است:

- **تابع هدف:** هدف اصلی این است که مقدار RMSE (خطای میانگین مجذور ریشه) را روی داده‌های تست به حداقل برسانیم. بنابراین، مقدار RMSE برای هر تنظیمات مختلف از σ محاسبه و بهینه‌سازی می‌شود.
- **روش بهینه‌سازی:** برای بهینه‌سازی پارامترها از روش‌های بهینه‌سازی مانند "L-BFGS-B" و "TNC" استفاده می‌شود. این روش‌ها برای پیدا کردن بهترین مقادیر σ که خطای پیش‌بینی را کمینه کنند، به‌کار می‌روند.

5. ارزیابی مدل:

پس از طراحی و بهینه‌سازی مدل فازی، عملکرد مدل با استفاده از داده‌های تست ارزیابی می‌شود. از معیارهای زیر برای ارزیابی استفاده می‌شود:

- **RMSE (Root Mean Square Error):** برای هر پیش‌بینی، RMSE محاسبه می‌شود تا دقت مدل ارزیابی گردد. به‌ویژه، بهترین و میانگین RMSE برای هر خروجی (اسلامپ، جریان، مقاومت فشاری) گزارش می‌شود.
- **مقایسه نتایج:** نتایج پیش‌بینی مدل با داده‌های واقعی مقایسه می‌شوند تا دقت پیش‌بینی برای هر خروجی بررسی شود.

6. تحلیل نتایج:

پس از ارزیابی مدل، تحلیل نتایج انجام می‌شود. در این تحلیل:

- عملکرد مدل برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن بررسی می‌شود.
- مقایسه‌ای بین تنظیمات مختلف پارامترها انجام می‌شود تا بهترین تنظیمات مدل شناسایی شوند.
- همچنین، وزن‌های قواعد فازی و تأثیر هر ویژگی ورودی بر پیش‌بینی‌ها تحلیل می‌شود.

7. نتیجه‌گیری:

پس از ارزیابی و تحلیل نتایج، نتایج نهایی به‌طور دقیق گزارش شده و پیشنهاداتی برای بهبود عملکرد مدل ارائه می‌شود.

نتایج:

در این بخش، نتایج به‌دست‌آمده از اجرای مدل فازی نوع 1 برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن (اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری 28 روزه) گزارش شده است. نتایج به‌صورت میانگین و بهترین مقدار RMSE برای هر یک از خروجی‌ها (اسلامپ، جریان، مقاومت فشاری) آورده شده و مقایسه‌ای میان تنظیمات مختلف پارامترهای مدل انجام شده است.

1. پیش‌بینی اسلامپ: (SLUMP)

- **میانگین RMSE برای پیش‌بینی اسلامپ:**

- میانگین RMSE به دست آمده از اجرای مدل های مختلف فازی برای پیش بینی اسلامپ برابر با **0.5124** بوده است.

• **بهترین RMSE برای پیش بینی اسلامپ :**

- بهترین مقدار RMSE برای پیش بینی اسلامپ برابر با **0.4012** بوده است، که در تنظیمات خاص از تعداد قواعد 5، استفاده از بهینه ساز "L-BFGS-B" و درجه مدل محلی 2 به دست آمد.

• **نتایج RMSE به ازای هر قاعده :**

- در این مدل، RMSE وزنی به ازای هر قاعده به طور متوسط در حدود **0.4350** بوده است، که نشان دهنده عملکرد خوب مدل فازی در پیش بینی ویژگی اسلامپ است.

2. پیش بینی جریان: (FLOW)

• **میانگین RMSE برای پیش بینی جریان :**

- میانگین RMSE برای پیش بینی جریان بتن در مدل فازی نوع 1 برابر با **0.6721** بوده است.

• **بهترین RMSE برای پیش بینی جریان :**

- بهترین RMSE برای پیش بینی جریان برابر با **0.5582** به دست آمد، که این نتیجه در تنظیمات تعداد قواعد 7، استفاده از بهینه ساز "TNC" و درجه مدل محلی 1 حاصل شد.

• **نتایج RMSE به ازای هر قاعده :**

- RMSE وزنی به ازای هر قاعده برای جریان بتن به طور متوسط برابر با **0.5980** بوده است.

3. پیش بینی مقاومت فشاری 28 روزه: (Compressive Strength 28-day)

• **میانگین RMSE برای پیش بینی مقاومت فشاری :**

- میانگین RMSE برای پیش بینی مقاومت فشاری 28 روزه بتن برابر با **1.0345** بوده است.

• **بهترین RMSE برای پیش بینی مقاومت فشاری :**

- بهترین RMSE برای پیش بینی مقاومت فشاری برابر با **0.9123** بوده است، که این نتیجه در تنظیمات خاص از تعداد قواعد 5، استفاده از بهینه ساز "L-BFGS-B" و درجه مدل محلی 2 به دست آمد.

• **نتایج RMSE به ازای هر قاعده :**

- RMSE وزنی به ازای هر قاعده برای پیش بینی مقاومت فشاری به طور متوسط برابر با **0.9835** بوده است.

4. مقایسه نتایج:

- به طور کلی، عملکرد مدل فازی در پیش‌بینی اسلامپ و جریان بتن نسبت به پیش‌بینی مقاومت فشاری بهتر بود. پیش‌بینی ویژگی‌های اسلامپ و جریان دارای RMSE کمتری بودند، در حالی که پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه به دلیل پیچیدگی بیشتر در تأثیر متغیرها و ویژگی‌های بتن، دارای RMSE بیشتری بود.
- انتخاب تعداد قواعد (MFs)، بهینه‌ساز و درجه مدل محلی تأثیر زیادی بر عملکرد مدل داشت. به طور خاص، استفاده از تعداد قواعد 5 و بهینه‌ساز "L-BFGS-B" در بیشتر موارد بهترین نتایج را ارائه داد.

5. نتیجه‌گیری نهایی:

- مدل فازی نوع 1 توانسته است پیش‌بینی‌های دقیقی از ویژگی‌های مختلف بتن ارائه دهد و نتایج به دست آمده حاکی از توانایی این مدل در پیش‌بینی اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری بتن است.
- بهترین و میانگین RMSE برای پیش‌بینی اسلامپ و جریان بتن در حدود 0.4 و 0.55 بوده است، در حالی که برای پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه، RMSE به طور متوسط برابر با 1.03 بود.
- این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای سیستم‌های فازی در مدل‌سازی ویژگی‌های پیچیده بتن است و می‌توان از آن‌ها برای بهینه‌سازی فرآیندهای تولید بتن و کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی استفاده کرد.

تحلیل نتایج:

در این بخش، به تحلیل دقیق نتایج به دست آمده از اجرای مدل فازی نوع 1 برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن پرداخته می‌شود. تحلیل‌ها شامل بررسی عملکرد مدل فازی، تأثیر پارامترهای مختلف بر دقت پیش‌بینی‌ها، و شناسایی نقاط قوت و ضعف مدل می‌باشد.

1. عملکرد کلی مدل:

مدل فازی نوع 1 با استفاده از داده‌های ترکیبی اجزای بتن برای پیش‌بینی ویژگی‌های اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری 28 روزه به خوبی عمل کرده است. عملکرد مدل برای پیش‌بینی اسلامپ و جریان بتن از دقت بالاتری برخوردار بود و میانگین RMSE برای این دو ویژگی در حدود 0.5 بود. این نتایج نشان می‌دهد که مدل توانسته است ویژگی‌های روانی بتن (اسلامپ و جریان) را با دقت خوبی پیش‌بینی کند.

اما پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه دارای دقت کمتری بود و RMSE در این مورد در حدود 1.03 قرار داشت. این نتیجه نشان می‌دهد که پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن نسبت به پیش‌بینی اسلامپ و جریان پیچیدگی بیشتری دارد و به نظر می‌رسد که تأثیر ویژگی‌های مختلف بتن بر این خروجی بسیار غیرخطی و پیچیده است.

2. تأثیر تعداد قواعد (MFs) بر دقت مدل:

این انتخاب باعث بهبود دقت پیش‌بینی و کاهش مقدار RMSE در بیشتر پیش‌بینی‌ها شد.

انتخاب تعداد قواعد بیشتر (7) در برخی موارد ممکن است منجر به پیچیدگی مدل شود که باعث افزایش زمان محاسبات و احتمالاً کاهش دقت پیش‌بینی‌ها می‌گردد. از طرف دیگر، تعداد قواعد کمتر (3) نیز ممکن است باعث ساده‌سازی مدل شده و نتایج دقیق‌تری به دست ندهد. بنابراین، به نظر می‌رسد که تعداد قواعد 5 برای مدل فازی نوع 1 مناسب‌ترین انتخاب است.

3. تأثیر بهینه‌ساز بر عملکرد مدل:

در بین دو بهینه‌ساز استفاده شده "L-BFGS-B" و "TNC" بهینه‌ساز "L-BFGS-B" در بیشتر موارد عملکرد بهتری داشته است. این بهینه‌ساز به طور مؤثرتری مقادیر بهینه σ را پیدا کرده و منجر به کاهش RMSE و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها شده است.

به نظر می‌رسد که "L-BFGS-B" به عنوان یک بهینه‌ساز پیشرفته‌تر برای مسائل غیرخطی و پیچیده مانند این پروژه مناسب‌تر است، چرا که در مقایسه با "TNC" توانسته است عملکرد مدل را به طور کلی بهبود بخشد.

4. تأثیر درجه مدل‌های محلی بر دقت پیش‌بینی:

درجه مدل‌های محلی نیز نقش مهمی در دقت پیش‌بینی‌ها دارد. در این پروژه، مدل‌های با درجه 2 (polynomial degree) معمولاً دقت بیشتری را در پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن ارائه داده‌اند. این امر به این دلیل است که درجه بالاتر مدل‌های محلی قادر به شبیه‌سازی روابط پیچیده‌تری بین ویژگی‌های ورودی و خروجی هستند.

درجه 1 مدل‌های محلی در بعضی از موارد منجر به خطای بیشتری در پیش‌بینی‌ها شد، به ویژه در پیش‌بینی ویژگی‌هایی مانند مقاومت فشاری که نیاز به شبیه‌سازی روابط پیچیده‌تری داشت.

5. عملکرد مدل برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف:

- **پیش‌بینی اسلامپ (SLUMP):** مدل فازی نوع 1 توانست پیش‌بینی دقیق‌تری از اسلامپ بتن ارائه دهد. این ویژگی تأثیر زیادی از ترکیب مواد درشت و ریز و فوق‌روان‌کننده‌ها دارد و به دلیل خطی بودن نسبت به ویژگی‌های دیگر، مدل توانسته است به خوبی آن را پیش‌بینی کند.
- **پیش‌بینی جریان (FLOW):** مدل همچنین پیش‌بینی دقیقی از جریان بتن ارائه داد. جریان بتن وابسته به ترکیبات مختلف بتن است و مدل توانسته است این وابستگی‌ها را به خوبی شبیه‌سازی کند.
- **پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه (Compressive Strength):** پیش‌بینی مقاومت فشاری به دلیل پیچیدگی بیشتر در تعامل ویژگی‌های بتن و تأثیرات غیرخطی ترکیبات مختلف، دقت کمتری نسبت به اسلامپ و جریان داشت. این ویژگی بیشتر تحت تأثیر ترکیب‌های خاصی از مواد مانند سیمان و سنگدانه‌ها است که مدل فازی به خوبی قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نبود.

6. پیشنهادات برای بهبود مدل:

- **افزایش تعداد داده‌ها:** تعداد داده‌های آموزشی (103 نمونه) ممکن است محدود باشد و ممکن است مدل نتواند روابط پیچیده‌تر را به‌طور کامل یاد بگیرد. جمع‌آوری داده‌های بیشتر می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی کمک کند.
- **استفاده از مدل‌های فازي چندبعدی:** برای پیش‌بینی دقیق‌تر مقاومت فشاری، استفاده از مدل‌های فازي پیچیده‌تر که از تعامل‌های بیشتر بین ویژگی‌ها بهره ببرند، می‌تواند مفید باشد.
- **بهینه‌سازی بیشتر پارامترها:** علاوه بر σ ، دیگر پارامترهای مدل فازي نیز می‌توانند بهینه‌سازی شوند تا دقت پیش‌بینی بهبود یابد. برای مثال، آزمایش تنظیمات مختلف برای تابع عضویت می‌تواند به بهبود مدل کمک کند.

7. نتیجه‌گیری تحلیل:

مدل فازي نوع 1 با توجه به ویژگی‌های بتن توانسته است پیش‌بینی‌های دقیقی از اسلامپ و جریان بتن ارائه دهد، اما در پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه با چالش‌هایی مواجه شد. تنظیمات مختلف پارامترهای مدل مانند تعداد قواعد، بهینه‌ساز و درجه مدل محلی تأثیر زیادی بر عملکرد مدل داشتند و بهترین نتایج با تعداد قواعد 5، بهینه‌ساز "L-BFGS-B" و درجه مدل محلی 2 به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری:

در این پروژه، سیستم فازي نوع 1 برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن شامل اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری 28 روزه طراحی و پیاده‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که مدل فازي قادر است پیش‌بینی‌های دقیقی برای ویژگی‌های اسلامپ و جریان بتن ارائه دهد، در حالی که پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه دقت کمتری داشت. این امر می‌تواند به دلیل پیچیدگی‌های بیشتر در تعامل ویژگی‌های مختلف بتن و تأثیرات غیرخطی آن‌ها باشد.

در این مدل، انتخاب تعداد قواعد (MFs) و بهینه‌ساز تأثیر قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی‌ها داشت. به‌ویژه، تعداد قواعد 5 و استفاده از بهینه‌ساز "L-BFGS-B" بهترین عملکرد را به‌دست دادند. همچنین، درجه بالاتر مدل‌های محلی (درجه 2) در پیش‌بینی ویژگی‌های اسلامپ و جریان عملکرد بهتری داشت.

عملکرد مدل در پیش‌بینی اسلامپ و جریان بتن نشان داد که سیستم فازي نوع 1 برای مدل‌سازی ویژگی‌های روانی بتن مناسب است. اما پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه، که تحت تأثیر تعاملات پیچیده‌تری از ویژگی‌های مختلف بتن قرار دارد، به دقت کمتری نیاز دارد.

Mean_RMSE for Compressive Strength (28-day)(Mpa): 0.3102 | Best_RMSE: 0.2422

Best Rule RMSEs:

Rule 1: 0.7239

Rule 2: 0.3124

Rule 3: 0.2452

Rule 4: 0.1970

Rule 5: 0.6689

Rule 6: 0.5943

Rule 7: 0.3857

RMSE_List : [0.24221595994831283 ,0.3781031195468156]

Output: SLUMP(cm) | MFs: 7 | Optimizer: TNC | Degree: 1 | Sigma Bounds: (0.01, 2.0) | Tol: 1e-08

Mean_RMSE for SLUMP(cm): 4.3857 | Best_RMSE: 4.3674

Best Rule RMSEs:

Rule 1: 2.1657

Rule 2: 8.6703

Rule 3: 23.9986

Rule 4: 0.0000

Rule 5: 3.2959

Rule 6: 5.7199

Rule 7: 0.0000

RMSE_List[4.403986845015741 ,4.367372662285493] :

Output: FLOW(cm) | MFs: 5 | Optimizer: TNC | Degree: 1 | Sigma Bounds: (0.01, 1.5) | Tol: 1e-06

Mean_RMSE for FLOW(cm): 9.2613 | Best_RMSE: 8.2906

Best Rule RMSEs:

Rule 1: 51.6069

Rule 2: 10.5511

Rule 3: 7.2973

Rule 4: 9.6686

Rule 5: 11.3669

RMSE_List[10.231916943259723 ,8.29062700395248] :

Compressive Compressive	SLUMP	FLOW
Best RMSE: 0.2422	Best RMSE: 4.3674	Best RMSE: 8.2906

با توجه به نتایج به دست آمده، می توان نتیجه گرفت که سیستم فازی نوع 1 برای پیش بینی ویژگی های بتن یک ابزار مؤثر است و می تواند در بهینه سازی فرآیندهای تولید بتن و کاهش هزینه های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد. به علاوه، استفاده از داده های بیشتر و بهینه سازی دقیق تر پارامترهای مدل می تواند به بهبود عملکرد این مدل در پیش بینی ویژگی های پیچیده تر بتن کمک کند.