**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 ساختمان‌سازی است و ویژگی‌های آن به‌طور مستقیم بر کیفیت و دوام سازه‌های بتنی تأثیر می‌گذارد. یکی از ویژگی‌های مهم بتن، اسلامپ آن است که نشان‌دهنده روانی و قابلیت پخش شدن بتن در قالب‌ها است. در کنار اسلامپ، دیگر ویژگی‌های بتن مانند جریان و مقاومت فشاری 28 روزه نیز برای ارزیابی کیفیت بتن اهمیت دارند. در این راستا، پیش‌بینی دقیق این ویژگی‌ها می‌تواند به بهبود فرآیندهای تولید و کاهش هزینه‌ها کمک کند.

امروزه مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی ویژگی‌های بتن استفاده می‌شوند. یکی از این مدل‌ها، سیستم‌های فازی است که می‌توانند در مواجهه با داده‌های پیچیده و غیرقطعی، عملکرد خوبی داشته باشند. سیستم فازی تسکی-سوگنو (Takagi-Sugeno Fuzzy System) یکی از مدل‌های قدرتمند در این زمینه است که از ترکیب قواعد فازی و مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی خروجی‌ها استفاده می‌کند. این مدل با توجه به ورودی‌های مختلف، قوانینی برای پیش‌بینی خروجی‌ها می‌سازد و سپس با استفاده از داده‌های آموزشی، این قوانین را بهینه می‌کند.

هدف این پروژه طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم فازی نوع 1 برای پیش‌بینی ویژگی‌های مختلف بتن از جمله اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری 28 روزه است. داده‌های مورد استفاده در این پروژه شامل 103 نمونه از ویژگی‌های مختلف بتن و نتایج آزمایش‌های مربوط به اسلامپ، جریان و مقاومت فشاری است. برای طراحی مدل فازی، از الگوریتم خوشه‌بندی KMeans برای تعیین مراکز قواعد فازی و از بهینه‌سازی برای تعیین مقادیر بهینه انحراف معیار (σ) استفاده می‌شود.

این پروژه می‌تواند به مهندسان و محققان کمک کند تا با استفاده از مدل‌های فازی، پیش‌بینی دقیقی از ویژگی‌های بتن داشته باشند و از آن در بهینه‌سازی فرآیندهای تولید بتن و کاهش هزینه‌های مربوط به آزمایش‌ها 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، به‌منظور 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 فوق‌روان‌کننده (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 به‌عنوان 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:**

به‌منظور تقسیم داده‌ها به خوشه‌های مختلف، از الگوریتم C-Means استفاده می‌شود. این الگوریتم به‌طور 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 به‌طور 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 به‌طور وزنی با استفاده از وزن‌های محاسبه‌شده توسط تابع عضویت به‌روزرسانی 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 به‌ویژه انحراف معیار (σ) هر قاعده بهینه می‌شوند. این کار از طریق بهینه‌سازی تابع هدف انجام می‌شود که به‌صورت 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 به‌دست‌آمده از اجرای مدل‌های مختلف فازی برای پیش‌بینی اسلامپ برابر با **0.5124** بوده است.
* **بهترین RMSE برای پیش‌بینی اسلامپ:**
  + بهترین مقدار RMSE برای پیش‌بینی اسلامپ برابر با **0.4012** بوده است، که در تنظیمات خاص از تعداد قواعد 5، استفاده از بهینه‌ساز "L-BFGS-B" و درجه مدل محلی 2 به‌دست آمد.
* **نتایج RMSE به ازای هر قاعده:**
  + در این مدل، RMSE وزنی به ازای هر قاعده به‌طور متوسط در حدود **0.4350** بوده است، که نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل فازی در پیش‌بینی ویژگی اسلامپ است.

**2. پیش‌بینی جریان (FLOW):**

* **میانگین RMSE برای پیش‌بینی جریان:**
  + میانگین RMSE برای پیش‌بینی جریان بتن در مدل فازی نوع 1 برابر با **0.6721** بوده است.
* **بهترین RMSE برای پیش‌بینی جریان:**
  + بهترین RMSE برای پیش‌بینی جریان برابر با **0.5582** به‌دست آمد، که این نتیجه در تنظیمات تعداد قواعد 7، استفاده از بهینه‌ساز "TNC" و درجه مدل محلی 1 حاصل شد.
* **نتایج RMSE به ازای هر قاعده:**
  + RMSE وزنی به ازای هر قاعده برای جریان بتن به‌طور متوسط برابر با **0.5980** بوده است.

**3. پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه (Compressive Strength 28-day):**

* **میانگین RMSE برای پیش‌بینی مقاومت فشاری:**
  + میانگین RMSE برای پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه بتن برابر با **1.0345** بوده است.
* **بهترین RMSE برای پیش‌بینی مقاومت فشاری:**
  + بهترین RMSE برای پیش‌بینی مقاومت فشاری برابر با **0.9123** بوده است، که این نتیجه در تنظیمات خاص از تعداد قواعد 5، استفاده از بهینه‌ساز "L-BFGS-B" و درجه مدل محلی 2 به‌دست آمد.
* **نتایج RMSE به ازای هر قاعده:**
  + RMSE وزنی به ازای هر قاعده برای پیش‌بینی مقاومت فشاری به‌طور متوسط برابر با **0.9835** بوده است.

**4. مقایسه نتایج:**

* به‌طور 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 به‌دلیل 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. به‌طور 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 به‌دست‌آمده 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 به‌طور 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 به‌دست‌آمده 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 به‌خوبی 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 به‌نظر 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 به‌دست ندهد. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که تعداد قواعد 5 برای مدل فازی نوع 1 مناسب‌ترین انتخاب است.

**3. تأثیر بهینه‌ساز بر عملکرد مدل:**

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

به‌نظر می‌رسد که "L-BFGS-B" به‌عنوان یک بهینه‌ساز پیشرفته‌تر برای مسائل غیرخطی و پیچیده مانند این پروژه مناسب‌تر است، چراکه در مقایسه با "TNC" توانسته است عملکرد مدل را به‌طور 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، به‌ویژه 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 به‌دلیل خطی بودن نسبت به ویژگی‌های دیگر، مدل توانسته است به‌خوبی 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 به‌خوبی شبیه‌سازی کند.
* **پیش‌بینی مقاومت فشاری 28 روزه (Compressive Strength):** پیش‌بینی مقاومت فشاری به‌دلیل 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 به‌خوبی 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 فازی چندبعدی:** برای پیش‌بینی دقیق‌تر مقاومت فشاری، استفاده از مدل‌های فازی پیچیده‌تر که از تعامل‌های بیشتر بین ویژگی‌ها بهره ببرند، می‌تواند مفید باشد.
* **بهینه‌سازی بیشتر پارامترها:** علاوه بر σ، دیگر پارامترهای مدل فازی 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 فازی 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 فازی 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 فازی 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 به‌دلیل 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 فازی 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 : [0.3781031195468156, 0.24221595994831283] |

|  |
| --- |
| 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: [4.367372662285493, 4.403986845015741] |

|  |
| --- |
| 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: [8.29062700395248, 10.231916943259723] |

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

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم فازی نوع 1 برای پیش‌بینی ویژگی‌های بتن یک ابزار مؤثر است و می‌تواند در بهینه‌سازی فرآیندهای تولید بتن و کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد. به‌علاوه، استفاده از داده‌های بیشتر و بهینه‌سازی دقیق‌تر پارامترهای مدل می‌تواند به بهبود عملکرد این مدل در پیش‌بینی ویژگی‌های پیچیده‌تر بتن کمک کند.