





دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده علوم ریاضی
گروه آمار

رساله

برای دریافت درجه دکتری در رشته
آمار، گرایش استنباط

عنوان

مدل سازی رگرسیونی در محیط فازی بازه‌ای-مقدار

استاد راهنما

دکتر ناصر رضا ارقامی، استاد گروه آمار دانشگاه فردوسی مشهد و
دکتر سید محمود طاهری، دانشیار دانشکده علوم ریاضی دانشگاه
صنعتی اصفهان و دانشکده فنی دانشگاه تهران

استاد مشاور

دکتر بهرام صادقپور گیلده، دانشیار گروه آمار دانشگاه فردوسی
مشهد

نگارنده

محمد رضا ربیعی

زمستان ۱۳۹۲



بسمه تعالی
مشخصات رساله تحصیلی دانشجویان
دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان: مدل سازی رگرسیونی در محیط فازی بازه‌ای-مقدار

نام نویسنده: محمد رضا ربیعی
استاد راهنما: دکتر ناصر رضا ارقامی، استاد گروه آمار دانشگاه فردوسی مشهد و دکتر سید محمود طاهری، دانشیار دانشکده علوم ریاضی دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشکده فنی دانشگاه تهران
استاد مشاور: دکتر بهرام صادقپور گیلده، دانشیار گروه آمار دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده: علوم ریاضی گروه: آمار رشته تحصیلی: آمار

تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۶/۱ تاریخ دفاع: ۱۳۹۲/۱۱/۱۰

مقطع تحصیلی: دکتری تعداد صفحات: ۱۵۳

چکیده رساله: در این رساله، چندین شیوه جدید مدل سازی رگرسیونی را، زمانی که هر یک از متغیر(های) وابسته، مستقل، ضرایب مدل و یا ترکیبی از آنها به صورت اعداد فازی بازه‌ای-مقدار باشند، مورد بحث قرار می دهیم. با استفاده از فاصله‌ی جدید روی اعداد فازی بازه‌ای-مقدار، یکی از روش‌های کمترین توان‌های دوم و یا روش امکانی را برای برآورد ضرایب فازی بازه‌ای-مقدار این مدل‌ها توسعه می دهیم. برای سنجش قابلیت اجرای مدل‌های پیشنهادی، آن‌ها را به وسیله سه مجموعه داده واقعی در علوم خاک و آب شناسی مورد بررسی قرار می دهیم. همچنین قابلیت پیش بینی مدل‌های به دست آمده توسط روش اعتبارسنجی متقابل مورد سنجش قرار می گیرد. به علاوه برای بررسی بیشتر چنین مدل‌های رگرسیون فازی بازه‌ای-مقدار، دو شاخص نیکویی برازش را معرفی و به کار می گیریم.

واژه‌های کلیدی: مجموعه فازی بازه‌ای-مقدار، عدد فازی بازه‌ای-مقدار، رگرسیون، نیکویی برازش، اعتبارسنجی متقابل

امضای استاد راهنما: تاریخ:

اظهارنامه

عنوان رساله : مدل‌سازی رگرسیونی در محیط فازی بازه‌ای-مقدار

اینجانب محمد رضا ربیعی دانشجوی دوره دکتری دانشکده علوم ریاضی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده رساله تحت راهنمایی دکتر ناصر رضا ارقامی، استاد گروه آمار دانشگاه فردوسی مشهد و دکتر سید محمود طاهری، دانشیار دانشکده علوم ریاضی دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشکده فنی دانشگاه تهران متعهد می‌شوم:

- آ. تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- ب. در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- ج. مطالب مندرج در این رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی به جایی ارائه نشده است.
- د. کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد است و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه فردوسی مشهد" و یا "Ferdowsi University of Mashhad" به چاپ خواهد رسید.
- ه. حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از آن رعایت شده است.
- و. در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- ز. در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد است. این مطلب بایستی به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج این رساله بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

تقدیم بہ

آن ہاکہ بی دریغ کوشیدند

تا امروز سربر اوج ساییدن را تجربہ کنم.

هو العلمیم

زیباترین نام را بر زبان جاری می‌کنم ... که هر کس زبان به حمد تو گشود بی‌تردید نگاه تو بر او افتاده. پس بر قلبم آن را جاری کن که خود می‌پسندی در ثنایت لب گشایم.

در وادی معرفت ننگنجد، سرچشمه هدایت نجوشد، سر بر قامت بندگی فرو نیافتد ...، گر گنجینه‌ای که مقدسش خواندی و به آن قسم یاد کردی^۱، کوچک شمرده شود و تنها خاطره جوهر خشک شده‌ای از آن بر برگ برگ صفحات زندگی باقی ماند.

تو علم را روشنی قرار دادی و فانوسی در بیغوله راه که مسیر را، راه نماید و تزکیه را مقدم بر آن دانستی تا نگاهبانش باشد که تزکیه و تعلیم در معیت هم گوهر وجودی انسان را به نور تو منور کند، پرده از واقعیات کنار زند. آن جاست که حقیقت رخ نمایاند، نظر فراتر افتد، خوان گنجینه‌های دانش رنگین شود و ... آری آنجاست که آدمی معنا یابد.

من اگر وعده‌هایم با تو زیر خروارها تل فراموشی و غفلت مدفون گردیده، اگر زشتی طغیان در نظرم زیبا جلوه می‌کند و چشمانم خشک‌تر از آن است که در مقام توبه اشکی بر آن جاری شود، بدان از سر جهل است و نسیان... اما بار الها چشم طمع بر رحمت دوخته‌ام و در تمنای رهایی از ظلمت ضلالت، ترنم باران معرفت را می‌طلبم، امید آنکه جوانه‌های حقیقت را در وجودم برویاند و انعکاس آن چشمانم را روشن کند.

اکنون چهره بر چهره خاک می‌سایم و تو را به حبیبیت قسم می‌دهم که... «هر آن خصلت ناپسند که در من می‌بینی به لطف واسع خویش اصلاحش فرمایی تا پسندیده شود و هر آن عیب که نفسم را به فساد بیالاید از من بازگیری و هر آن نقص که جانم را از کمال باز دارد برطرفش فرمایی!»!

و در آن روز که نوبت زندگانی به سر رسد و پیک مرگ حلقه بر در خانه تن بکوبد و دعوت واجب الاجابه تو از آسمان‌ها به گوش آید... پروردگارا! بر محمد (ص) و آل پاکش درود فرست و به حق ایشان عمر ما را با رستگاری به پایان آور و عاقبتمان را ختم به خیر فرمای...!

زبان قاصراست و مجال کوتاه...

تو خود قصیده‌ی مهر را از لوح نانوشتی قلمم بخوان...!

^۱ ان و القلم و ما یسطرون

سپاس گزارى...

سپاس خداوندگار حكيم را كه با لطف بى‌كران خود، آدمى را به زيور عقل آراست. در آغاز وظيفه‌ي خود مى‌دانم از زحمات بى‌دريغ اساتيد راهنماي خود، جناب آقاىان دكتور ناصر رضا ارقامى و دكتور سيد محمود طاهرى صميمانه تشكر و قدردانى كنم كه از راهنمايى‌هاى ارزنده ايشان در راستاى پيشبرد پژوهش، حاصل فراوان بردم و همواره شاگرد مكتب علم و انسانيت و منش والاي ايشان هستم.

از جناب آقاى دكتور بهرام صادقپور گيلده كه زحمت مطالعه و مشاوره اين پايان‌نامه را تقبل فرمودند و در آماده‌سازى اين پايان‌نامه به نحو احسن اينجانب را مورد راهنمايى قرار دادند، كمال امتنان را دارم. همچنين لازم مى‌دانم از اساتيد فرهيخته جناب آقاىان دكتور ماشاا... ماشينچى، دكتور ميرمحسن پدرام، دكتور عبدالحميد رضايى ركن‌آبادى و دكتور محمد رضا اكبرزاده توتونچى كه داورى اين پايان‌نامه را به عهده گرفتند با تمام وجود تشكر و قدردانى نمايم.

به‌علاوه، بوسه مى‌زنم بر دستان خداوندگاران مهر و مهربانى، پدر و مادر عزيزم و بعد از خدا، ستايش مى‌كنم وجود مقدس‌شان را و تشكر مى‌كنم از همسر عزيزم به پاس عاطفه سرشار و گرمای اميدبخش وجودش، كه در اين سردترين روزگاران، بهترين پشتيبان من بود. همچنين از فرزندان بسيار خوب صالح و مصطفى كه با تحمل مشقت‌ها، بهترين اوقات كودكى خود را با سختي‌هاى دوران مطالعه دكتوراى من قسمت كردند.

در پايان، بر خود لازم مى‌دانم از تمامى معلمين و اساتيد عزيزم، از دوران ابتدايى تا دانشگاه، كه دانش خويش را با اين حقير تقسيم کرده و درس اخلاق و انسانيت را به من آموزش دادند، كمال سپاسگزارى را داشته و براى آن‌هاى كه دار فانى را وداع كردند، على‌الخصوص استاد بزرگوارم دكتور شاهكار، علو درجات را از خداوند متعال خواستارم. همچنين ياد و خاطره شيرين دوران تحصيل دكتورى با دوستان بسيار خوب جناب آقاىان دكتور مهدى اسماعيليان، دكتور مسيب احمدى، دكتور سيد محسن ميرحسينى ابرندآبادى، دكتور مسعود عجمى بختياروند، دكتور سيد مهدى اميرجهانشاهى، دكتور امير كسائيان و دكتور جواد قاسميان همواره در ذهنم باقى مانده و براى ايشان آرزوى موفقيت دارم.

مهدى رضا ربيعى
زمنان ۱۳۹۲

فهرست نمادها و علائم ریاضی

| نماد | نام |
|---------------------------|---|
| \mathbb{R} | مجموعه اعداد حقیقی |
| \oplus | جمع تعمیم یافته |
| \ominus | تفریق تعمیم یافته |
| \otimes | ضرب تعمیم یافته |
| \oslash | تقسیم تعمیم یافته |
| $IVFS$ | مجموعه فازی بازه‌ای-مقدار |
| $IVFN$ | عدد فازی بازه‌ای-مقدار |
| $IF^*(\mathbb{R})$ | مجموعه‌ی همه اعداد فازی بازه‌ای-مقدار |
| $TIVFN$ | عدد فازی بازه‌ای-مقدار مثلی |
| $STIVFN$ | عدد فازی بازه‌ای-مقدار مثلی متقارن |
| $IVFR$ | رگرسیون فازی بازه‌ای-مقدار |
| $\mathbf{A}(\cdot)$ | تابع عضویت فازی بازه‌ای-مقدار |
| $\mathbf{A}^L(\cdot)$ | تابع عضویت پایینی فازی بازه‌ای-مقدار |
| $\mathbf{A}^U(\cdot)$ | تابع عضویت بالایی فازی بازه‌ای-مقدار |
| $\Pi_{\mathbf{A}}(\cdot)$ | تابع عدم قطعیت مجموعه فازی بازه‌ای-مقدار \mathbf{A} |

فهرست مطالب

| | |
|----|---|
| ۹ | پیش‌گفتار |
| ۱۲ | ۱ مروری بر مجموعه‌های فازی بازه‌ای-مقدار و رگرسیون فازی |
| ۱۲ | ۱.۱ مجموعه‌های فازی بازه‌ای-مقدار |
| ۱۲ | ۱.۱.۱ تاریخچه |
| ۱۳ | ۲.۱.۱ مفاهیم مقدماتی |
| ۲۰ | ۳.۱.۱ فاصله‌های چن بین اعداد فازی بازه‌ای-مقدار |
| ۲۱ | ۲.۱ مروری بر چند رویکرد در رگرسیون فازی |
| ۲۱ | ۱.۲.۱ مقدمه |
| ۲۴ | ۲.۲.۱ پیش‌بینی فازی براساس رگرسیون آماری |
| ۲۴ | ۳.۲.۱ رگرسیون فازی برای مدل با متغیرهای غیرفازی و ضرایب فازی |
| ۲۶ | ۴.۲.۱ روش کمترین توان‌های دوم فازی |
| ۲۷ | ۵.۲.۱ روش کمترین توان‌های دوم برای ضرایب و خروجی فازی |
| | ۶.۲.۱ تلفیق رگرسیون امکانی و رگرسیون مبتنی بر روش کمترین توان‌های دوم |
| ۲۸ | فازی |
| ۲۹ | ۳.۱ نوآوری‌های رساله |
| ۳۰ | ۲ رگرسیون کمترین توان‌های دوم برای داده‌های خروجی فازی بازه‌ای-مقدار |
| ۳۱ | ۱.۲ فاصله‌ای جدید بین اعداد فازی بازه‌ای-مقدار |
| ۳۵ | ۲.۲ مدل رگرسیون پیشنهادی |
| ۳۵ | ۱.۲.۲ برآورد پارامترهای مدل |

| | | | |
|----|-------|---|----------|
| ۳۶ | ..... | ارزیابی مدل | ۲.۲.۲ |
| ۳۷ | ..... | کاربرد در علوم خاک | ۳.۲ |
| ۳۸ | ..... | پدومدل ESP-SAR | ۱.۳.۲ |
| ۴۰ | ..... | پدومدل CEC-OM-SAND | ۲.۳.۲ |
| ۴۴ | ..... | ارزیابی مدل براساس فاصله‌های چن | ۴.۲ |
| ۴۶ | ..... | اعتبارسنجی متقابل | ۵.۲ |
| ۵۰ | | رگرسیون کمترین توان‌های دوم برای داده‌های ورودی-خروجی فازی بازه‌ای-مقدار | ۳ |
| ۵۱ | ..... | مدل رگرسیون پیشنهادی | ۱.۳ |
| ۵۱ | ..... | برآورد پارامترهای مدل | ۱.۱.۳ |
| ۵۲ | ..... | ارزیابی مدل | ۲.۱.۳ |
| ۵۲ | ..... | بعضی کاربردها | ۲.۳ |
| ۵۲ | ..... | کاربرد در آب‌شناسی | ۱.۲.۳ |
| ۵۷ | ..... | کاربرد در علوم خاک | ۲.۲.۳ |
| ۶۱ | ..... | اعتبارسنجی متقابل | ۳.۳ |
| ۶۵ | ..... | ارزیابی مدل با دیگر فاصله‌ها | ۴.۳ |
| ۷۰ | | رگرسیون کمترین توان‌های دوم در محیط تماماً فازی بازه‌ای-مقدار | ۴ |
| ۷۰ | ..... | مدل رگرسیون پیشنهادی | ۱.۴ |
| ۷۱ | ..... | برآورد پارامترهای مدل | ۱.۱.۴ |
| ۷۵ | ..... | ارزیابی مدل | ۲.۱.۴ |
| ۷۶ | ..... | بعضی کاربردها | ۲.۴ |
| ۷۶ | ..... | کاربرد در آب‌شناسی | ۱.۲.۴ |
| ۷۸ | ..... | کاربرد در علوم خاک | ۲.۲.۴ |
| ۸۹ | ..... | اعتبارسنجی متقابل | ۳.۴ |
| ۹۴ | ..... | ارزیابی مدل براساس دیگر فاصله‌ها | ۴.۴ |
| ۹۴ | ..... | مزایا و معایب روش‌های رگرسیون کمترین توان‌های دوم فازی بازه‌ای-مقدار | ۵.۴ |
| ۹۶ | | رگرسیون امکانی در محیط فازی بازه‌ای-مقدار | ۵ |
| ۹۷ | ..... | مدل رگرسیون پیشنهادی | ۱.۵ |

| | | |
|-----|---|--|
| ۹۷ | برآورد پارامترهای مدل | ۱.۱.۵ |
| ۱۰۰ | الگوریتم پیشنهادی برای یافتن h^U و h^L | ۲.۱.۵ |
| ۱۰۱ | بعضی کاربردها | ۲.۵ |
| ۱۰۱ | کاربرد در آب‌شناسی | ۱.۲.۵ |
| ۱۰۶ | کاربرد در علوم خاک | ۲.۲.۵ |
| ۱۱۳ | نیکویی برازش | ۳.۵ |
| ۱۱۴ | ارزیابی پدومدل‌ها با استفاده از فاصله‌های بالا | ۱.۳.۵ |
| ۱۱۵ | اعتبارسنجی متقابل | ۴.۵ |
| ۱۱۸ | مقایسه چهار مدل رگرسیونی فازی بازه‌ای-مقدار در داده‌های خاک‌شناسی | ۵.۵ |
| ۱۱۸ | پدومدل ESP-SAR | ۱.۵.۵ |
| ۱۲۰ | پدومدل CEC-OM-SAND | ۲.۵.۵ |
| ۱۲۱ | مزایا و معایب مدل رگرسیون امکانی فازی بازه‌ای-مقدار پیشنهادی | ۶.۵ |
| ۱۲۵ | آ | مروری بر مجموعه‌های فازی و حساب اعداد فازی |
| ۱۲۵ | مجموعه‌های فازی | ۱.آ |
| ۱۲۶ | عملگرهای مجموعه‌ای | ۱.۱.آ |
| ۱۲۹ | اعداد فازی | ۲.آ |
| ۱۲۹ | حساب اعداد فازی | ۱.۲.آ |
| ۱۳۰ | اعداد فازی LR | ۲.۲.آ |
| ۱۳۱ | فاصله بین دو عدد فازی | ۳.۲.آ |
| ۱۳۴ | مقالات مستخرج از رساله | |
| ۱۳۶ | مراجع | |
| ۱۴۴ | واژه‌نامه فارسی به انگلیسی | |
| ۱۴۸ | واژه‌نامه انگلیسی به فارسی | |
| ۱۵۳ | نمایه | |

فهرست جدول‌ها

| | | |
|----|--|-----|
| ۳۹ | مشخصات نمونه‌ها در مثال علوم خاک | ۱.۲ |
| | مقادیر فازی بازه‌ای-مقدار مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده SAR و ESP و | ۲.۲ |
| ۴۱ | فاصله‌های آن‌ها | |
| | مقادیر فازی بازه‌ای-مقدار مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده $SAND$ ، OM و CEC | ۳.۲ |
| ۴۳ | و فاصله‌های آن‌ها | |
| | مقادیر متغیر مستقل SAR ، وابسته فازی شده ESP و پیش‌بینی‌های متناظر با | ۴.۲ |
| | ESP با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده | |
| ۴۸ | و برآورد شده | |
| | مقادیر متغیرهای مستقل ($SAND$ و OM)، متغیر وابسته فازی شده (CEC) | ۵.۲ |
| | و پیش‌بینی‌های متناظر با CEC با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و | |
| ۴۹ | فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده | |
| ۵۴ | مقادیر فازی بازه‌ای-مقدار مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده DW و MSL و فاصله بین آن‌ها | ۱.۳ |
| | مقادیر فازی بازه‌ای-مقدار مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده SAR و ESP و | ۲.۳ |
| ۵۹ | فاصله‌های آن‌ها | |
| | مقادیر فازی بازه‌ای-مقدار مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده $SAND$ ، OM و CEC | ۳.۳ |
| ۶۲ | و فاصله‌های آن‌ها | |
| | مقادیر متغیر مستقل DW ، وابسته فازی شده MSL و پیش‌بینی‌های متناظر با MSL با | ۴.۳ |
| ۶۳ | استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده | |
| ۶۵ | مقایسه دو شاخص MDC و $MD_{f,q}^*$ در مدل‌های آب‌شناسی و و خاک‌شناسی | ۵.۳ |

| | | |
|-----|--|-----|
| ۶۰۳ | مقادیر متغیر مستقل SAR ، وابسته فازی شده ESP و پیش‌بینی‌های متناظر با ESP با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده | ۶۶ |
| ۷۰۳ | مقادیر متغیرهای مستقل ($SAND$ و OM)، متغیر وابسته فازی شده (CEC) و پیش‌بینی‌های متناظر با CEC با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده | ۶۷ |
| ۸۰۳ | مقایسه دو شاخص MD_q^* ، MD_∞^* با $MD_{f,q}^*$ در مدل‌های آب‌شناسی و خاک‌شناسی | ۶۸ |
| ۱۰۴ | مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده فازی بازه‌ای-مقدار DW و MSL و فاصله‌های آن‌ها (برای $q = 2$) | ۷۹ |
| ۲۰۴ | مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده IVF متغیرهای SAR و ESP و فاصله‌های آن‌ها (برای $q = 2$) | ۸۴ |
| ۳۰۴ | مقادیر فازی بازه‌ای-مقدار مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده $SAND$ ، OM و CEC و فاصله‌های آن‌ها (برای $q = 2$) | ۸۸ |
| ۴۰۴ | مقایسه دو شاخص MDC و $MD_{f,q}^*$ در مدل‌های آب‌شناسی و خاک‌شناسی | ۹۰ |
| ۵۰۴ | مقادیر متغیر مستقل DW ، وابسته فازی شده MSL و پیش‌بینی‌های متناظر با MSL با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده | ۹۰ |
| ۶۰۴ | مقادیر متغیر مستقل SAR ، وابسته فازی شده ESP و پیش‌بینی‌های متناظر با ESP با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده | ۹۲ |
| ۷۰۴ | مقادیر متغیرهای مستقل ($SAND$ و OM)، متغیر وابسته فازی شده (CEC) و پیش‌بینی‌های متناظر با CEC با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده | ۹۳ |
| ۸۰۴ | مقایسه دو شاخص MD_q^* ، MD_∞^* با $MD_{f,q}^*$ در مدل‌های آب‌شناسی و خاک‌شناسی | ۹۴ |
| ۱۰۵ | مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده فازی بازه‌ای-مقدار DW و MSL و فاصله‌های آن‌ها (برای $q = 2$) | ۱۰۲ |

| | |
|------|--|
| ۲۰۵ | مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده IVF متغیرهای SAR و ESP و فاصله‌های آن‌ها (برای $q = 2$) |
| ۱۰۹ | ۲۰۵ |
| ۳۰۵ | مقادیر فازی بازه‌ای-مقدار مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده $SAND$ ، OM و CEC و فاصله‌های آن‌ها (برای $q = 2$) |
| ۱۱۲ | ۳۰۵ |
| ۴۰۵ | محاسبه سه شاخص $MD_{f,q}^*$ و MD_q^* ، MD_{∞}^* در مدل‌های آب‌شناسی و خاک‌شناسی |
| ۱۱۵ | ۴۰۵ |
| ۵۰۵ | مقایسه دو شاخص MDC و $MD_{f,q}^*$ در مدل‌های آب‌شناسی و خاک‌شناسی |
| ۱۱۵ | ۵۰۵ |
| ۶۰۵ | مقادیر متغیر مستقل DW ، وابسته فازی شده MSL و پیش‌بینی‌های متناظر با MSL با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده |
| ۱۱۶ | ۶۰۵ |
| ۷۰۵ | مقادیر متغیر مستقل SAR ، وابسته فازی شده ESP و پیش‌بینی‌های متناظر با ESP با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده |
| ۱۱۸ | ۷۰۵ |
| ۸۰۵ | مقادیر متغیرهای مستقل (OM و $SAND$)، متغیر وابسته فازی شده (CEC) و پیش‌بینی‌های متناظر با CEC با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و فاصله‌های بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد شده |
| ۱۱۹ | ۸۰۵ |
| ۹۰۵ | مدل‌های رگرسیونی چهارگانه برای پدومدل $ESP - SAR$ |
| ۱۲۰ | ۹۰۵ |
| ۱۰۰۵ | ارزیابی مدل‌های رگرسیونی چهارگانه برای پدومدل $ESP - SAR$ |
| ۱۲۰ | ۱۰۰۵ |
| ۱۱۰۵ | مدل‌های رگرسیونی چهارگانه برای پدومدل $CEC - OM - SAND$ |
| ۱۲۰ | ۱۱۰۵ |
| ۱۲۰۵ | ارزیابی مدل‌های رگرسیونی چهارگانه برای پدومدل $CEC - OM - SAND$ |
| ۱۲۱ | ۱۲۰۵ |

فهرست شکل‌ها

| | | |
|----|--|-----|
| ۱۵ | نمودار توابع عضویت پایینی و بالایی یک مجموعه فازی بازه‌ای-مقدار | ۱۰۱ |
| ۱۶ | سطح مجموعه $A: [\lambda_1, \lambda_2] -$ $[x_1, x_2] \cup [x_3, x_4] \cup [x_5, x_6] \cup [x_7, x_8]$ | ۲۰۱ |
| ۱۸ | دو عدد فازی بازه‌ای-مقدار مثلثی: الف) نامتقارن ب) متقارن | ۳۰۱ |
| ۴۲ | پیش‌بینی ESP به وسیله مدل $IVFR$ به ازای $SAR = ۰/۵$ | ۱۰۲ |
| ۴۲ | پیش‌بینی CEC با استفاده از مدل $IVFR$ (۲۴.۲) به ازای $SAND = ۳۸$ و | ۲۰۲ |
| ۴۴ | $OM = ۱/۰۲$ | ۴۴ |
| ۵۶ | پیش‌بینی MSL با استفاده از مدل رگرسیونی فازی بازه‌ای-مقدار به ازای $DW = (۲/۷۰, ۰/۳۵, ۰/۶۰)$ | ۱۰۳ |
| ۶۰ | پیش‌بینی ESP به وسیله مدل رگرسیون فازی بازه‌ای-مقدار به ازای $SAR = (۱/۵۰, ۰/۰۶, ۰/۱۴)$ | ۲۰۳ |
| ۶۱ | پیش‌بینی CEC با استفاده از مدل رگرسیون فازی بازه‌ای-مقدار (۱۴.۳) به ازای $SAND = (۳۵, ۱/۴۸, ۳/۶۵)$ و $OM = (۱/۳۸, ۰/۵۴, ۰/۹۳)$ | ۳۰۳ |
| ۷۴ | تقریب Y به عنوان پیش‌بینی y به وسیله $Y(A', A'')$ | ۱۰۴ |
| ۷۸ | پیش‌بینی MSL به وسیله مدل رگرسیونی IVF به ازای $DW = [(۰/۴۸, ۸/۵۴), ۱۰/۲۵, (۱۳/۶۵, ۱۶/۲۳)]$ | ۲۰۴ |
| ۸۵ | پیش‌بینی ESP به وسیله مدل رگرسیون IVF به ازای $SAR = [(۰/۲۱, ۰/۷۶), ۱/۰۸, (۱/۴۶, ۱/۹۹)]$ | ۳۰۴ |

| | |
|-----|---|
| ۴۰۴ | پیش‌بینی CEC با استفاده از مدل رگرسیون فازی بازه‌ای- مقدار (۱۸.۴) به‌ازای $SAND = [(۱/۸۰, ۱۴/۱۲), ۳۸, (۴۵/۲۴, ۵۵/۲۹)]$ و |
| ۸۹ | $OM = [(۰/۶۰, ۰/۶۱), ۰/۸۴, (۱/۰۷, ۱/۱۹)]$ |
| ۱۰۵ | پیش‌بینی MSL به‌وسیله مدل رگرسیون IVF برای $DW = ۵/۵۳$: (الف) عدد $TIVF$ (ب) $STIVFN$ |
| ۱۰۵ | پیش‌بینی ESP به‌وسیله مدل رگرسیون IVF برای $SAR = ۰/۴۳$: (الف) $TIVF$ (ب) $STIVFN$ |
| ۱۰۸ | پیش‌بینی CEC به‌وسیله مدل رگرسیون IVF برای $SAND = ۱/۶۳$, $OM = ۱/۶۳$, $TIVF$ (الف) $STIVFN$ (ب) |
| ۱۱۱ | ۱۵: (الف) $TIVF$ (ب) $STIVFN$ |
| ۱۲۶ | چند نمونه از زیر مجموعه‌های فازی |
| ۱۲۷ | نمودار توابع عضویت اجتماع و اشتراک دو مجموعه فازی |

پیش‌گفتار

تعمیم‌های متفاوتی از نظریه مجموعه‌های فازی^۱ که توسط پروفیسور زاده [۸۹] معرفی شد، پیشنهاد شده است. نظریه مجموعه‌های فازی شهودی^۲ (آتاناسف [۱۰]) و نظریه مجموعه‌های فازی بازه‌ای-مقدار^۳ (گزرافزانی و ترکسن [۷۲]) دو تعمیم نظریه مجموعه‌های فازی هستند. البته، نشان داده شده است که یک ارتباط قوی بین این دو تعمیم وجود دارد [۲۵؛ ۲۶؛ ۷۹]. در دهه‌های اخیر، نظریه مجموعه‌های فازی بازه‌ای-مقدار در جهات مختلف توسعه داده شده است که در فصل اول به بعضی از آن‌ها اشاره خواهیم کرد.

معمولاً در بسیاری از تحلیل‌های آماری که با مجموعه داده‌های واقعی مواجه هستیم، اندازه‌گیری دقیق امکانپذیر نیست و داده‌ها از ابهام برخوردارند. هرچه این ابهامات زیادتر می‌شوند ما را از نظریه مجموعه‌های فازی، بیشتر به سمت تعمیم‌های آن سوق می‌دهد. یکی از مفیدترین و پرکاربردترین تحلیل‌های آماری در یافتن رابطه‌ای بین دو یا چند متغیر بر مبنای نمونه مشاهداتی از جامعه، تحلیل رگرسیون خطی و یا غیر خطی است. حال اگر نمونه‌های مشاهده شده از متغیرها، نادقیق باشند و یا ابهام در روابط بین متغیرها وجود داشته باشد و یا هم مشاهدات و هم روابط بین آن‌ها (ضرایب مدل) نادقیق باشند آن‌گاه می‌توان رگرسیون فازی را به‌کار برد.

رگرسیون فازی، اولین بار توسط تاناکا و همکاران [۶۹] مطرح شد. آن‌ها مدل رگرسیون خطی با مشاهدات غیرفازی و پارامترهای فازی را مورد توجه قرار دادند. در رهیافت آن‌ها که به نام «رگرسیون امکانی» نیز شناخته شده است، برازش مدل رگرسیون خطی فازی به صورت کمینه‌سازی مجموع ابهام در مقدار برآورد شده مشاهدات انجام می‌شود، با توجه به این قید که میزان عضویت هر مقدار مشاهده شده خروجی (غیرفازی) در مقدار برآورد شده فازی متناظر آن، حداقل به میزان h باشد. این مساله عموماً معادل با یک مساله برنامه‌ریزی خطی (و گاهی غیر خطی) می‌شود که با حل آن، مدل بهینه رگرسیون فازی به دست می‌آید.

^۱Fuzzy Sets Theory ^۲Intuitionistic Fuzzy Sets Theory ^۳Interval-valued Fuzzy Sets Theory

رهیافت دیگر در زمینه رگرسیون فازی توسط دیاموند [۲۷] و کلمینس [۱۳] ارائه شد که با استفاده از روش کمترین توان‌های دوم به بررسی و برازش مدل رگرسیون فازی می‌پردازد و می‌توان آن را تعمیم یافته رگرسیون کمترین توان‌های دوم معمولی دانست. مبنای این روش، استفاده از یک فاصله روی مجموعه اعداد فازی است که براساس آن، مجموع توان‌های دوم فاصله‌های مقادیر خروجی فازی مشاهده‌شده و مقادیر برآورد فازی آن‌ها کمینه می‌شود.

تاکنون افراد زیادی به بررسی انواع روش‌های رگرسیون امکانی و رگرسیون کمترین توان‌های دوم، تحت شرایط و حالت‌های مختلف پرداخته‌اند که در بخش ۲.۱ به آن پرداخته می‌شود. اما در زمینه رگرسیون در محیط فازی بازه‌ای-مقدار یا فازی شهودی کار چندانی صورت نگرفته است. تا جایی که محقق بررسی کرده است تنها دو مطالعه که اخیراً انجام شده، یکی در زمینه رگرسیون فازی شهودی و دیگری در رگرسیون فازی بازه‌ای-مقدار صورت گرفته است (رجوع شود به پرواتی و همکاران [۵۴] و ترکیان و همکاران [۷۱]).

همانند روش‌های رگرسیون فازی، در محیط فازی بازه‌ای-مقدار نیز می‌توان با توجه به انواع روش‌های کمینه‌سازی، تحت شرایط و حالت‌های مختلف، مدل‌های رگرسیونی متفاوتی را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. در این رساله به دو شیوه کمینه‌سازی یعنی روش کمترین توان‌های دوم و روش امکانی در محیط فازی بازه‌ای-مقدار می‌پردازیم. همچنین با توجه به تنوع در انتخاب مدل، سه مدل را به ترتیب با ضرایب فازی بازه‌ای-مقدار، با ضرایب و خروجی فازی بازه‌ای-مقدار، با ورودی-خروجی فازی بازه‌ای-مقدار و نهایتاً با ضرایب و ورودی-خروجی فازی بازه‌ای-مقدار مورد بررسی قرار می‌دهیم. مناسب بودن مدل‌های فوق به وسیله شاخص‌های تعریف شده نیکویی برازش و همچنین به روش اعتبارسنجی متقابل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

محتوای فصل‌های این رساله به صورت زیر است:

فصل اول شامل دو بخش است. بخش اول مرور مختصری بر مجموعه‌ها و اعداد فازی بازه‌ای-مقدار است. در حد نیاز رساله، حساب اعداد فازی بازه‌ای-مقدار را مطرح می‌کنیم و در پایان این بخش به چند فاصله بین اعداد فازی بازه‌ای-مقدار خواهیم پرداخت. در بخش دوم نگاه اجمالی به تعاریف، مفاهیم و روش‌های مختلف رگرسیون فازی داریم و به طور خلاصه به چند شیوه رگرسیونی اشاره خواهیم کرد.

فصل دوم به معرفی فاصله‌ای جدید بین اعداد فازی بازه‌ای-مقدار و به اثبات متر بودن آن می‌پردازیم. در ادامه رگرسیون کمترین توان‌های دوم برای داده‌های خروجی فازی بازه‌ای-مقدار مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای دستیابی به برآورد پارامترهای مدل از تعاریف و قضایای مربوط به حساب

اعداد فازی بازه‌ای-مقدار و فاصله بین این اعداد از فصل اول، استفاده می‌کنیم. همچنین برای ارزیابی مدل، شاخص‌های نیکویی برازش را بر اساس فاصله‌های چن در نظر می‌گیریم. برای ارزیابی بیشتر مدل از شیوه اعتبارسنجی متقابل استفاده می‌شود.

فصل سوم به شیوه رگرسیون کمترین توان‌های دوم برای داده‌های ورودی-خروجی بازه‌ای-مقدار می‌پردازد. همانند فصل دوم، پس از توضیح نحوه دستیابی پارامترهای مدل، برای ارزیابی مدل از شاخص‌های نیکویی برازش و اعتبارسنجی متقابل استفاده می‌کنیم.

فصل چهارم به رگرسیون کمترین توان‌های دوم در محیط تماماً فازی بازه‌ای-مقدار، یعنی زمانی که داده‌های ورودی-خروجی و ضرایب مدل فازی بازه‌ای-مقدارند، اختصاص دارد. ارزیابی مدل همانند دو فصل قبل با شاخص‌های مشابه است.

فصل پنجم به معرفی رگرسیون امکانی در محیط فازی بازه‌ای-مقدار می‌پردازد. الگوریتمی برای یافتن سطح اعتبار در رگرسیون فازی بازه‌ای-مقدار امکانی پیشنهاد می‌شود. همانند فصل‌های قبل مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

ضمیمه آ شامل مرور مختصری بر مجموعه‌ها و اعداد فازی و حساب اعداد فازی است و همچنین به فاصله بین اعداد فازی می‌پردازد. اعداد فازی LR به خصوص اعداد مثلثی و خواص بین آن‌ها از دیگر مباحث این ضمیمه است.

فصل ۱

مروری بر مجموعه‌های فازی بازه‌ای-مقدار و رگرسیون فازی

مقدمه

این فصل که مروری دارد بر مجموعه‌های فازی بازه‌ای-مقدار و رگرسیون فازی، به صورت زیر تنظیم شده است: مباحث مربوط به مجموعه‌های فازی بازه‌ای-مقدار را در بخش ۱.۱ مورد بحث قرار می‌دهیم که شامل زیربخش‌های تاریخچه، مفاهیم مقدماتی، فاصله‌های چن بین اعداد فازی بازه‌ای-مقدار است. در بخش ۲.۱ به طور مختصر به شیوه‌های رایج در رگرسیون فازی، مزایا و معایب هر یک از آن‌ها اشاره داریم.

۱.۱ مجموعه‌های فازی بازه‌ای-مقدار

۱.۱.۱ تاریخچه

از زمانی که نظریه مجموعه‌های فازی توسط پروفیسور زاده [۸۹] معرفی شد، تعمیم‌های مختلفی از این نظریه پیشنهاد شده است. از جمله، نظریه مجموعه فازی شهودی ارائه شده توسط آتاناسف [۱۰]