

ارائه چارچوبی داده محور برای طبقه بندی و مشابهت سنجی فرش های ایرانی با الگوریتم K-Means

مهران دادگر

دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران

M_dadgar@neyshabur.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۴/۱۲ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

چکیده

این پژوهش با هدف طراحی یک سامانه عینی طبقه بندی برای فرش های اصیل ایرانی انجام شد. یافته های تحقیق مبنایی برای توسعه سامانه جهانی طبقه بندی فرش فراهم می کند که می تواند به ایجاد شاخص کمی ارزش گذاری و سامانه گواهی نامه دهی یکپارچه منجر شود. در این راستا، پایگاه داده ای جامع از ۹۹ نمونه فرش موزه ای گردآوری شد که شامل ۱۲ پارامتر مرتبط با ساختار، طرح و مواد اولیه بود. برای دستیابی به این اهداف، الگوریتم خوشه بندی ک. مین با فاصله اقلیدسی و $k=3$ بر اساس روش کمائی به کار گرفته شد و نمونه ها بر اساس تراکم گره، ترکیب مواد و جنس پرز به سه خوشه همگن تقسیم شدند. نوآوری اصلی این تحقیق در آن است که با تبدیل معیارهای سنتی و ذهنی به شاخص های عینی، امکان مقایسه مستقیم فرش های نو با نمونه های تاریخی فراهم می شود. این نظام نه تنها دقت در ارزش گذاری را افزایش می دهد، بلکه می تواند به شفافیت قیمت گذاری، توسعه بازارهای جهانی، اعتماد بیشتر خریداران، فراهم نمودن امکان خرید خریدار بر طبق ذائقه و علاقه خود به فرش یک منطقه خاص و فراهم کردن بستر اعتماد به نظر فروشندگان منجر گردد.

کلیدواژه ها: فرش، خوشه بندی، شاخص گذاری، پایگاه داده، ارزش گذاری

A Data-Driven Framework for Classification and Similarity Assessment of Persian Carpets Using K-Means Algorithm

Mehran Dadgar

Department of Textile Engineering, University of Neyshabur, Neyshabur, Iran

M_dadgar@neyshabur.ac.ir

ABSTRACT

This study was conducted with the aim of designing an objective classification system for authentic Iranian carpets. The research findings provide a basis for developing a global carpet classification system, which could lead to the establishment of a quantitative valuation index and an integrated certification system. In this regard, a comprehensive database of 99 museum carpet samples was collected, containing 12 parameters related to structure, design, and raw materials. To achieve these objectives, K-means clustering algorithm with Euclidean distance and $k=3$ was employed based on the elbow method, and the samples were divided into three homogeneous clusters based on knot density, material composition, and pile material. The main innovation of this research lies in converting traditional and subjective criteria into objective indices, enabling direct comparison of new carpets with historical samples. This system not only increases valuation accuracy but can also lead to pricing transparency, development of global markets, greater buyer confidence, the possibility for buyers to purchase according to their taste and interest in carpets from a specific region, and providing a basis for trust in sellers' opinions.

Keywords: Carpet, Clustering, Indexing, Database, Valuation.

۱- مقدمه

هنگام تولید فرش باید عوامل مختلفی از جمله مواد مورد نظر، رنگ نخ، طرح بافت و تکنیک های بافت را در نظر گرفت. تحقیقات پیشین، تعاریف فرش دستباف را ارائه کرده اند [۱]. این حوزه تحقیقاتی دارای سه مفهوم اصلی «رج شمار»، «تعداد نخ» و «گره» است: گره پرز قالی یا به طور ساده گره، عامل اصلی تمایز قالی دستباف با دیگر انواع زیراندازها مانند جاجیم و گلیم است. گره ترکی با چرخاندن نخ پرز به دور هر جفت تار به دست می آید تا دو سر نخ پرز از بافت زمینه خارج شده و سطح فرش را تشکیل میدهد. رج شمار به تراکم گره یا تعداد گره ها در واحد خاصی در عرض فرش اشاره دارد. از نظر ظرافت نشان دهنده کیفیت فرش است و بین رج شمار، نوع مواد اولیه مصرفی، نوع بافت، کیفیت و حتی طرح رابطه مستقیمی وجود دارد. تراکم قالی بر خواص مختلف از جمله ظرافت، وزن، بافت، موقعیت جغرافیایی بافت و قیمت تأثیر بسزایی دارد [۱]. رج شمار در قالی های کاشان و اصفهان، تعداد گره های یک قالی در ۶.۵ سانتی متر است و در قالیچه های تبریز و ترکی، رج شمار تعداد گره ها در ۷ سانتی متر عرض قالی است. اگر فرش با دقت بافته شود، تعداد گره ها در واحد طول و عرض معمولاً یکسان است. اما گاهی اوقات تعداد گره ها در مقیاس مشخصی از طول فرش (طول کار) بیشتر از تعداد گره ها در همان مقیاس عرض فرش (راستای بود) است. دلیل این امر نیروی کوبنده بود و گره است که در هنگام بافت به تارها وارد می شود [۲]. رج شمار معمولاً از

۱۸ شروع می شود و گروه فرش های دستباف استثنایی که همچنان می توان از آنها به عنوان فرش استفاده کرد می تواند کیفیت مطلوبی بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ داشته باشد. به دلیل ظرافت بالایی که دارند، آنها را بیشتر شبیه پارچه یا پتو نمایان می کند [۳]. نخ ها به طور کلی با استفاده از دو سیستم اندازه گیری مستقیم و غیر مستقیم اندازه گیری می شوند. تکس نمونه ای از گروه شمارش مستقیم است که وزن هزار متر نخ بر حسب گرم نخ را تعیین می کند. در مقابل، نمره انگلیسی و متریک نمونه هایی از شمارش غیرمستقیم هستند. نمره متریک تعداد متر نخ موجود در یک گرم است، در حالی که نمره انگلیسی تعداد یارد در یک پوند نخ است. در نمره انگلیسی و متریک، با افزایش نمره نخ، نخ ریزتر میشود. تعداد لای نخ در روش مستقیم، مجموع تعداد لای های نخ است، در حالی که در نمره های انگلیسی و متریک، نمره اعلام شده، نمره یک لایه است. برای نخ های چند رشته ای، این مقادیر متناسب هستند، مانند ۳۰/۱ یا ۴۰/۱ که عدد ۱ یا ۲ تعداد لای نخ ها را نشان می دهد. با این حال، ۴۰/۱ انگلیسی نازکتر از ۴۰/۲ انگلیسی است، زیرا در ۴۰/۲، دو نخ با نمره مساوی برای رسیدن به ضخامت ۲۰/۱ انگلیسی به هم تابیده شده اند. به عبارتی با تقسیم نمره نخ بر تعداد لای، نمره نخ نهایی به دست می آید. طباطبایی و همکاران [۴] از روش پاسخ سطحی برای مدل سازی کاهش ضخامت ۱۸ نمونه فرش بافته شده استفاده کردند. آنها عملکرد هر فرش را از نظر کاهش ضخامت، تغییر رنگ و یکنواختی بافت (به عنوان

پارامترهای ظاهری فرش)، با استفاده از دستگاه تستر هگزپاد در معرض ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ دور درام (ضریب سایش) قرار دادند. این مطالعه نشان داد که تراکم گره و ارتفاع پرز دو عنصر اساسی در فرش هستند و روش پاسخ سطحی قابلیت پیش‌بینی خوبی دارد. در یک کار تحقیقاتی میان رشته‌ای دیگر، سرانو و همکاران [۵] از پردازش تصویر برای درک ساختار فرش های تاریخی برای اهداف تعمیر و بازسازی استفاده کرد. کاشی زاده [۶] به بررسی پارامترهای موثر برای پرداخت به قالی بافان پرداخت. آنها به این نتیجه رسیدند که مهمترین پارامتر در پرداخت دستمزد برای بافت جدید یا مرمت، طرح و زمان بافت است. بارانوال [۷] طبقه بندی قالی ها را مورد بحث قرار داده است. احمد الخطیب و همکارانش [۸] به بررسی خاصیت عایق صدا قالیچه های مسجد پرداختند. ازدیل و همکارانش [۹] مطالعه ای را برای بررسی خواص ساختاری، تراکم پذیری و خواص برگشت پایل هفت فرش ساخته شده از پشم، اکریلیک و پلی پروپیلن انجام دادند. این مطالعه اثرات مواد خام، نمره نخ و گره در واحد سطح را بررسی کرده و نتایج نشان داد که افزایش نمره نخ و تراکم گره تأثیر مثبتی بر ضخامت، دانسیته پرز و ویژگی‌های بازیابی فرش دارد. فرش های پشمی جرم پرز بیشتری نسبت به پلی استر-اکریلیک داشتند. قالیچه های (پلی استر-اکریلیک) به دلیل تراکم الیاف بیشتر، تراکم پذیری و بازیابی بیشتری پس از بارگیری و تخلیه دینامیکی داشتند. پس از بارگذاری استاتیک طولانی مدت، ضخامت فرش های پشمی معمولاً به

حد ثابتی می رسد. فرش هایی با تعداد گره بیشتر در واحد سطح، مقاومت بیشتری در برابر فشردگی دارند. دینامیکی دارند و در نتیجه خواص برگشت پذیری بهتری دارند. دادگر و همکاران [۱۰-۲۰] تحقیقات عمیقی در مورد «راحتی در فرش ماشینی» و «تأثیر عملیات حرارتی بر روی نخ های پرز فرش ماشینی» انجام دادند. تحقیقات آنها به این نتیجه رسید که عملیات حرارتی تا حدی زیبایی فرش را افزایش می‌دهد و شرایط بهینه را برای کار با نخ برای دستیابی به بیشترین راحتی در فرش مشخص نمود. عابدی و همکاران [۲۱-۲۳] هندسه فرش های دستباف را بررسی کرده و کاهش وزن و ضخامت آنها را پیش بینی نمودند. این مطالعه نشان داد که هندسه فرش های دستباف تا حدی با نظریه پیرس متفاوت است و از بین رفتن سایش در درجه اول به قطر نخ و تعداد الیاف موجود در نخ بستگی دارد. گوپتا و همکاران [۲۴] جنبه های مختلف مربوط به ویژگی های دوام فرش دستباف را مورد بحث قرار دادند. آنها استفاده از مواد و گره های مختلف در فرش های دستباف را بررسی نموده و خواص آنها را توضیح دادند. عواملی که در درجه اول بر دوام و هزینه فرش دستباف تأثیر می‌گذارند عبارتند از خواص الیاف، پارامترهای نخ، تراکم گره‌ها و ارتفاع پرزها. با ظهور فناوری های نوری و پردازش تصویر، ارزیابی عینی تغییر ظاهر فرش ها نیز امکان پذیر شده است. کاکاوی و همکاران [۲۵] از انتشار پرتو ایکس ناشی از پروتون (PIXE) برای مطالعه نخ‌های قالی جمع‌آوری شده از قالی‌های قدیمی ایرانی با قدمت دوره صفویه (۱۴۹۹-۱۷۲۲

مواد مصنوعی تحقیق کرد. در این مطالعه خواص لازم یک رزین مصنوعی برای تقویت منسوجات قدیمی را شناسایی کرد و پارامترهای رزین و اثرات آن بر احیای کالاهای نساجی را مورد بحث قرار داد. احمد [۳۱] مطالعه‌ای بر روی نمونه‌های فرش تاریخی با آسیبهایی مختلف، از جمله "گرد و غبار و خاک که حذف آن چالش برانگیز بود"، "بازسازی قطعات ضعیف یا از بین رفته" و "درجه‌بندی رنگ‌های تغییر یافته" انجام داد. این مطالعه با بررسی دقیق برای شناسایی نوع فیبر، گرد و غبار و سایر اشکال آسیب آغاز شد. احمد از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۷، طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه^۸ و اشعه ایکس برای تجزیه و تحلیل نمونه‌ها استفاده کرد. این مطالعه همچنین شامل تقویت قطعات ضعیف و تکمیل قطعات گم شده بود که با افزودن یک پارچه کتان جدید به پشت فرش تقویت شد. توسیان شاندریز [۳۲] تاکید کرد که مردم اغلب به دلیل ناآشنایی و عدم مهارت تعمیر، به فرش آسیب می‌رسانند. این مطالعه به دسته بندی و شناسایی عوامل مضر و علل آنها از جمله تشخیص نادرست مواد اولیه به دلیل کمبود دانش و مهارت پرداخت. پتیلو [۳۳] تفاوت‌ها و شباهت‌های بین رویکردهای مرمت‌کنندگان حرفه‌ای فرش را بررسی می‌کند، که زیرشاخه جدید و در حال توسعه در حوزه مرمت پارچه است. مروری بر تحقیقات پتیلو و سایر مطالعات

میلادی) استفاده کرد. نتایج، انواع رنگ‌ها، مواد رنگ‌زا و ناخالصی‌های معدنی موجود در نخ‌های فرش را نشان داد. این یافته‌ها می‌تواند مرمت‌کنندگان موزه را در اتخاذ تکنیک‌های رنگرزی مناسب برای بازسازی با کیفیت بالا این فرش‌های منحصربه‌فرد راهنمایی کند. بارباچه [۲۶] از روش‌های طیف‌سنجی شامل پرتاب پراکنده فرابنفش-مرئی^۱، فلورسانس سه‌بعدی^۲ و طیف‌سنجی رامان^۳ برای شناسایی مواد رنگرزی اصلی دو قالیچه پشمی عتیقه مراکشی، معروف به زاربیا^۴ و ثبت شده در موزه اودایا^۵ در رباط استفاده نمود. النور ال. حسنوف [۲۷] تأثیر تولید فرش در شهر گنجا را بر میراث فرهنگی مورد مطالعه قرار داد و از نمونه‌های میدانی قوم‌نگاری برای کشف تاریخ و قوم‌شناسی آذربایجان استفاده کرد. آنا منهیتا و همکاران [۲۸] نمونه‌های پشم سبزه فرش را که قدمت آن‌ها به قرن‌های ۱۷ تا ۱۹ بازمی‌گردد، (و متعلق به مجموعه موزه ملی هنرهای باستانی^۶ در لیسبون پرتغال است)، تجزیه و تحلیل کردند. این مطالعه با هدف شناسایی رنگ‌ها و مواد رنگ‌زای طبیعی مورد استفاده در فرآیند رنگرزی سنتی انجام شد. کاپو [۲۹] روشی را برای تعیین سن فرش‌ها و منسوجات پشمی با تجزیه و تحلیل تغییرات وابسته به سن در ترکیب اسید آمینه پروتئین‌ها طراحی کرد. لودویک [۳۰] برای حفظ و بازسازی منسوجات باستانی با استفاده از

⁶ National Museum of Ancient Art (NMAA), Lisbon, Portugal

⁷ Scanning Electron Microscope (S.E.M.)

⁸ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

¹ UV-Vis diffuse reflectance

² 3D-fluorescence

³ Raman spectroscopy

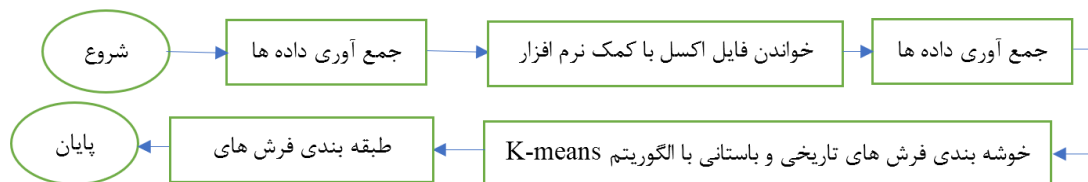
⁴ Zarbia(s)

⁵ Oudaya Museum

اولیه و طرح‌شناسی، معیاری واحد و شفاف برای اعتبارسنجی و ارزش‌گذاری کمی فرش‌ها ارائه دهد و نخستین گام در استقرار پارادایم داده‌محور در این حوزه محسوب می‌شود. در همین راستا، هدف کلی این پژوهش طراحی یک چارچوب داده‌محور برای طبقه‌بندی عینی فرش‌های اصیل ایرانی است. اهداف فرعی شامل ارائه شاخص کمی برای مقایسه ارزش و کیفیت فرش‌های جدید با نمونه‌های تاریخی و نیز ایجاد مبنایی برای توسعه سامانه داده جهانی خوشه‌بندی فرش‌ها^۱ می‌باشد. بدین ترتیب، پژوهش حاضر برای نخستین بار با بهره‌گیری از الگوریتم خوشه‌بندی "ک.مینز"^۲ [۴۳، ۴۴] و تحلیل داده‌های ساختاری ۹۹ نمونه فرش موزه‌ای، چارچوبی نوآورانه ارائه می‌دهد که می‌تواند ضمن افزایش شفافیت قیمت‌گذاری و اعتماد در معاملات، راه را برای استانداردسازی جهانی ارزش‌گذاری فرش هموار سازد.

۲- مواد و روش‌ها

به طور خلاصه مراحل اصلی و مهم این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۱ فرآیند اصلی مقاله را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمودار جریان فرآیند

[۳۴-۴۲] نشان می‌دهد که بسیاری از مطالعات بر تعمیر و مرمت فرش متمرکز شده‌اند. بخشی از مطالعات بر روی ثبات رنگ و یافتن رنگ‌های سنتی با فناوری‌های جدید تمرکز دارند. بررسی‌های بیشتر نیاز به تحقیقات در حوزه ترمیم فرش را روشن می‌کند.

با وجود جایگاه ویژه فرش دستباف ایرانی در عرصه فرهنگی و اقتصادی، فرآیند ارزیابی و ارزش‌گذاری و دسته‌بندی آن همچنان عمدتاً ذهنی و مبتنی بر تجربه فردی است. این امر منجر به نوسان قیمت‌ها، نبود شفافیت در معاملات و دشواری مقایسه فرش‌های نو با نمونه‌های تاریخی می‌شود. مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی‌های آزمایشگاهی خواص فیزیکی یا تحقیقات تاریخی-هنری با رویکردهای کیفی محدود شده‌اند و فاقد نظام کمی یکپارچه برای تبدیل معیارهای ذهنی به شاخص‌های عینی می‌باشند. بنابراین، نبود یک چارچوب عینی و داده‌محور برای طبقه‌بندی و سنجش ارزش، به‌عنوان یک شکاف اساسی در ادبیات علمی و نیاز عملی بازار قابل شناسایی است. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، درصدد است با طراحی یک نظام طبقه‌بندی علمی مبتنی بر ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری همچون تراکم گره، جنس مواد

^۲ K-Means

^۱ Global Carpet Classification System (GCCS)

۲-۱- نمونه های فرش (طرح ها، تراکم گره ها،

مواد) و دسته بندی فرشها

شکل ۲ یکی از طرح های فرش های این بانک داده را به عنوان نمونه نشان می دهد.



شکل ۲. تصویر نمونه طرح قالیچه بافته شده (کد: ۱۵۱۳۸۶۱۴ در جدول ۲) از ایران [۴۵، ۴۶].

شکل ۲ نمونه‌ای از فرش شاه عباسی لچک ترنج (کد: ۱۵۱۳۸۶۱۴) را نشان می‌دهد که به عنوان یک نمونه شاخص از پایگاه داده این مطالعه انتخاب شده است. این فرش با تراکم ۷۴۰۰ گره در دسیمتر مربع، ترکیب مواد متعادل (۱۵٪ تار پنبه، ۱۵٪ پود پنبه، ۷۰٪ پرز پشمی) و طرح اصیل شاه عباسی است. انتخاب این نمونه به دلیل دارا بودن ویژگی‌های متعادل از نظر پارامترهای ساختاری و هنری صورت گرفته که آن را به نمونه‌ای ایده‌آل برای نمایش قابلیت‌های چارچوب پیشنهادی تبدیل می‌کند. جدول ارزشمند زیر (جدول ۱) تعدادی از طرح‌های قالی بافته‌ی معروف ایران را فهرست می‌کند که از زمان‌های قدیم به دلیل نقش و رنگ‌های متمایزشان شناخته شده‌اند. در این جدول داده‌های مختلف مربوط به فرشهای مختلف اصیل ایرانی تجمیع و ارایه شده اند.

جدول ۱- ویژگی های کلیدی قالی ایران باستان [۴۵، ۴۶]

کد فرش	نام / طرح فرش	اندازه	محل بافته شده	رنگ زمینه	رنگ حاشیه
15138611	شاه عباسی لچک ترنج	16.1m*2.5m	نابین	نیل	قرمز تیره
15115014	شاه عباسی افشان	4.3m*3.3m	تبریز	قرمز تیره	قهوه ای روشن
25275014	اقتباسی گوبلن	4.2m*3.15m	کرمان	نیل	خاکستری
25213921	اقتباسی قفقازی	2m*1.42m	مشگین شهر	کرم رنگ	رنگ بژ
91136713	تلفیقی ترنجدار	3.52*2.55	تبریز	متنوع	نیل
15179812	شاه عباسی حیوان دار	2.8*1.7	نابین	نیل	نیل
91155012	تلفیقی لچک ترنج	3m*1.98m	یزد	قرمز تیره	قرمز تیره-آبی-بژ
15114914	شاه عباسی افشان	3.98m*2.7m	کاشان	قرمز تیره	نیل
15135312	شاه عباسی لچک ترنج	7.72*1.74	شهرضا	نیل	نیل
15139931	شاه عباسی لچک ترنج	2.34*1.56	اصفهان	قرمز تیره	رنگ بژ
15139941	شاه عباسی لچک ترن	183*1.13	اصفهان	قرمز تیره	نیل
15139812	شاه عباسی لچک و ترنج	3.14m*2.03m	اصفهان	کرم رنگ	نیل

15139311	شاه عباسی لچک و ترنج	2.4m*1.5m	اصفهان	کرم رنگ	رنگ بژ
15139941	شاه عباسی لچک و ترنج	2.29*1.48m	اصفهان	قرمز تیره	کرم رنگ
17311981	اسلیمی لچک و ترنج	7.15m*1.1m	نابین	نیل	قرمز تیره
1513591	شاه عباسی لچک و ترنج	2.03m*1.29	اراک	قرمز تیره	قرمز روشن
91194012	تلفیقی قاب قابی	3m*2.1cm	یزد	متنوع	رنگ بژ
25214311	اقتباسی قفقاز	2.05m*1.35m	اردبیل	قرمز روشن	نیل
91159911	تلفیقی لچک ترنج	2.34m*1.57m	اصفهان	نیل	نیل
87734514	ایلیاتی لچک ترنج	4.05m*2.83m	تبریز	قرمز تیره	طلا
91135212	تلفیقی ترنجدار	2.75m*1.83m	کرمان	نیل	نیل
15137311	شاه عباسی لچک و ترنج	2.12m*1.34m	اراک	نیل	بژ کرم
131186613	طرح گنبد	3.28m*2.47m	تبریز	قهوه ای روشن	قرمز تیره
85334811	هندسی لچک ترنج	2.12m*1.44	زابل	کرم رنگ	کرم رنگ
15136022	شاه عباسی لچک و ترنج	3.07m*2.05m	اراک	نیل	قرمز تیره
87114512	ایلیاتی هیبت لو	3m*2m	آباده	سفید	آبی
15178413	شاه عباسی و حیواندار	3.52m*2.55m	تبریز	خاکستری	تاریک خوانده شود
15138811	شاه عباسی ترنجدار	2.33m*1.51m	اصفهان	رنگ بژ	نیل
15137011	شاه عباسی لچک ترنج	2.13m*1.38m	اراک	نیل	کرم رنگ
25213911	اقتباسی قفقاز	2m*1.37m	مشگین شهر	نیل	نیل
31419012	بندی بازوبندی	3.4m*2.13m	نابین	نیل	نیل
15135311	شاه عباسی لچک و ترنج	2.05m*1.35m	کاشان	قرمز تیره	نیل
91134812	تلفیقی لچک ترنج کف ساده	3.11m*2.18m	کرمان	قرمز تیره	قرمز تیره
87733712	ایلیاتی لچک ترنج	2.9m*1.94m	اردبیل	قرمز تیره	نیل
15134714	شاه عباسی لچک و ترنج	3.98m*2.98m	کاشمر	نیل	نیل
35158513	بوته جقه (پته کرمان)	3.55m*2.55m	رفسنجان	رنگ بژ	کرم رنگ
17315812	اسلیمی لچک ترنج	3.22m*2.14m	اردستان	نیل	قرمز تیره
83375512	محرمات بته ای	3.09m*2.18m	قم	متنوع	متنوع
91154312	تلفیقی لچک ترنج	3.3m*2.1m	بختیاری	قرمز تیره	رنگ بژ
85535311	هندسی جوشقانی	2.1m*1.38m	قم	سبز	قرمز تیره
21158111	افشان بندی	2.5m*1.66m	نابین	کرم رنگ	رنگ بژ
75175911	ماهی درهم ریز ماهی	2.03m*1.29	اراک	نیل	قرمز تیره
15138614	شاه عباسی لچک و ترنج	3.95m*2.95m	خراسان	نیل	قرمز تیره
91217511	تلفیقی دورنما	2.18m*1.39m	اراک	نیل	قرمز تیره
31382712	بندی خشتی	3.15m*2.1m	بختیاری	متنوع	آبی
15134822	شاه عباسی لچک و ترنج	3.02m*2.03m	یزد	نیل	قرمز تیره
75176212	ریزه ماهی لچک ترنج	3.03m*2.02m	بیرجند	کرم نیلی	قرمز تیره
87734511	ایلیاتی لچک ترنج	2.60m*1.59m	بختیاری	نیل	نیل
15115414	شاه عباسی لچک ترنج	3.99m*2.98m	بیرجند	نیل	قرمز تیره
15135912	شاه عباسی لچک ترنج مود	3.01m*2.04m	بیرجند	نیل	زیتون سبز
91356812	تلفیقی لچک ترنج دسته گل	2.99m*1.98m	همدان	نیل	قرمز تیره
15116011	شاه عباسی افشان	1.62m*1.06m	قم	نیل	رنگ بژ
15136711	شاه عباسی لچک و ترنج	2.29m*1.6m	اصفهان	نیل	نیل
75176511	ریزه ماهی لچک ترنج	2.7m*1.78m	تبریز	نیل	قرمز تیره

15115511	شاه عباسی افشان	1.59m*1.05m	قم	قرمز تیره	آبی
15135511	شاه عباسی لچک ترنج	2.32m*1.5m	چادگان	رنگ بژ	رنگ بژ
37119811	درختی حیواندار	1.63m*1.1m	اصفهان	کرم رنگ	زیتون سبز
17319931	اسلیمی لچک ترنج	2.22m*1.45m	اصفهان	آبی	قرمز تیره
17315211	اسلیمی لچک ترنج	2.4m*1.47m	کرمان	کرم رنگ	نیل
15137411	شاه عباسی لچک و ترنج	1.98m*1.08m	قم	نیل	نیل
3543011	بوته ای لچک ترنج	1.68m*1.10m	قم	قرمز تیره	آبی
79215011	محرابی درختی	2.45m*1.56m	کرمان	نیل	قرمز تیره
15135621	شاه عباسی ترنجدار	2.29m*1.49m	شهرضا	نیل	قرمز تیره
15139911	شاه عباسی ترنجدار	2.1m*1.39m	اصفهان	کرم رنگ	سبز تیره
15137221	شاه عباسی لچک و ترنج	2.19m*1.34m	ساروق	نیلی	
15196212	شاه عباسی شیخ صفی	2.75m*1.80m	تبریز	کرم رنگ	نیلی
1513512	شاه عباسی ترنجی	2.46m*1.62m	آباده	رنگ بژ	سبز
91295811	ترنجی کف ساده	2.15m*1.37m	قم	نیل	قرمز تیره
31277212	بتدی کتیبه ای	2.86m*1.86m	قم	رنگ بژ	کرم رنگ
15134511	شاه عباسی لچک ترنج	2m*1.37m	اراک	نیل	نیل
15136311	شاه عباسی لچک ترنج	1.65m*1.05m	آباده	تیره و آبی	قرمز تیره
37119511	درختی و حیواندار	1.56m*1.05m	اصفهان	کرم رنگ	نیلی
6123512	گل فرنگ مستوفی	3.07m*2.01m	بیجار	نیل	آبی
31515511	گلدان لچک ترنج	2.23m*1.36m	قم	قرمز تیره	کرم رنگ
15139221	شاه عباسی لچک ترنج	1.74m*1.11m	اصفهان	نیلی	رنگ بژ
15119211	شاه عباسی افشان	2.07*1.4m	تبریز	رنگ بژ	نیلی
85539911	جوشقانی	2.34m*1.54m	اصفهان	متنوع	نیلی
8553011	جوشقانی	2.03m*1.39m	آباده	قرمز تیره	قرمز تیره
75178712	ریزه ماهی لچک ترنج	2.75m*1.75m	تبریز	نیلی	آبی
25275511	اقتباسی گوبلن	2.05m*1.33m	ساروق	کرم رنگ	نیلی
17275611	اسلیمی دهن اژدری	2.13m*1.45m	قم	نیلی	نیلی
79355211	محرابی ستونی	1.59m*1.09m	قم	آبی	داتک قرمز
15136011	شاه عباسی لچک ترنج	2.17m*1.42m	قم	دراک قرمز	آبی و قهوه ای روشن
1513511	شاه عباسی ترنجی	2.05m*1.30m	سمنان	نیلی	قرمز تیره
15135511	شاه عباسی لچک ترنج	2.1m*1.45m	تهران	نیلی	رنگ بژ
21495611	افشان دسته گل	1.29m*1.96m	بیجار	نیلی	کرم رنگ
17319921	اسلیمی لچک ترنج	2.4m*1.59m	نابین	نیلی	نیلی
25215612	اقتباسی قفقازی سه ترنج	2.9m*2.16m	زابل	متنوع	قرمز تیره
91356211	لچک ترنج دسته گل	2.19m*1.39m	همدان	قرمز تیره	قرمز تیره
31386513	بندی قاب قابی	3.37m*2.6m	کرمان	رنگ بژ	نیلی
13458513	گنبد دان علی قاپو	3.61m*2.46m	تبریز	نیلی	نیلی
35438512	بوته لچک ترنج	3.45m*2.45m	رفسنجان	نیلی	طلا
15115812	شاه عباسی افشان	3.11m*2.12m	همدان	قرمز تیره	نیلی
31416813	بازوبندی شیر شگری	3.54m*2.49m	همدان	کرم رنگ	قرمز تیره
15134822	شاه عباسی لچک ترنج	3.07m*2m	شهرضا	قرمز تیره	قرمز تیره
15259912	شاه عباسی ترنجی طره دار	3.14m*2m	رفسنجان	نیلی	سفید

61375812	گل و بلبل	3.02m*2m	بیجار	نیل	متنوع
31344512	بندی لوزی	3.15m*2.15m	یلمه	متنوع	نیل
37126012	درختی سبزیکار	1.2m*2.3m	کرمان	متنوع	نیل
91155512	تلفیقی لچک ترنج	2.97m*2m	تبریز	قرمز تیره	قرمز تیره

[۷، ۴۵] گردآوری شده است. پارامترهای ثبت شده برای هر نمونه شامل: کد شناسایی، نام/طرح فرش، ابعاد، منطقه بافت، رنگ زمینه، رنگ حاشیه و مشخصات فنی مواد اولیه می‌باشد. داده‌های این جدول پایه اصلی تحلیل‌های خوشه‌بندی این پژوهش را تشکیل می‌دهند.

پایگاه داده شامل حدود ۱۰۰ مشاهده است که هر کدام دارای چندین متغیر است. برای انجام تجزیه و تحلیل خوشه‌بندی، تعدادی از ردیف‌های انتخاب شده از جدول ۱ و جدول ۲ در جدول ارائه شده است و تمام مشاهدات در تجزیه و تحلیل خوشه‌بندی استفاده شده است. جدول ۱ شامل ۹۹ نمونه فرش موزه‌ای است که بر اساس استانداردهای مستندسازی

جدول ۲- ادامه داده‌های پایگاه داده

code number	Number of knots per dcm ²	Silk warp	cotton warp	Cotton weft	Silk weft	Woollen pile	silk pile	Total
15138611	7400	0.0%	15.0%	10.0%	0.0%	65.0%	10.0%	100.0%
15115014	2500	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
25275014	2500	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
25213921	1400	0.0%	15.0%	10.0%		75.0%	0.0%	100.0%
91136713	4450	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15179812	9600	0.0%	15.0%	10.0%		65.0%	10.0%	100.0%
91155012	2500	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	10.0%	110.0%
15114914	2300	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15135312	2800	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15139931	9900	15.0%	0.0%	15.0%		65.0%	5.0%	100.0%
15139941	9900	15.0%	0.0%	15.0%		65.0%	5.0%	100.0%
15139812	9600	20.0%	0.0%	10.0%		65.0%	5.0%	100.0%
15139311	8400	15.0%	0.0%	10.0%		70.0%	5.0%	100.0%
15139941	9900	15.0%	0.0%	10.0%		65.0%	10.0%	100.0%
17311981	9600	0.0%	15.0%	15.0%		65.0%	5.0%	100.0%
15135911	3400	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
91194012	1500	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
25214311	1650	0.0%	15.0%	10.0%		75.0%	0.0%	100.0%
91159911	10000	15.0%	0.0%	15.0%		65.0%	5.0%	100.0%
87734514	2000	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
91135212	2700	15.0%	0.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15137311	5400	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
131186613	7000	20.0%	0.0%	10.0%		70.0%	0.0%	100.0%
85334811	2300	0.0%	20.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%

15136022	3400	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
87114512	1900	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%		100.0%
15178413	7000	20.0%	0.0%	10.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15138811	7700	25.0%	0.0%	10.0%		65.0%	0.0%	100.0%
15137011	4800	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
25213911	1400	0.0%	15.0%	10.0%		75.0%	0.0%	100.0%
31419012	7700	0.0%	15.0%	15.0%		60.0%	10.0%	100.0%
15135311	3100	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
91134812	2300	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
87733712	1300	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15134714	2200	0.0%	13.0%	17.0%		70.0%	0.0%	100.0%
35158513	4000	0.0%	15.0%	10.0%		75.0%	0.0%	100.0%
17315812	3600	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
83375512	2800	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
91154312	1800	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
85535311	2800	0.0%	15.0%	15.0%		65.0%	5.0%	100.0%
21158111	6500	0.0%	15.0%	10.0%		65.0%	10.0%	100.0%
75175911	3300	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15138614	7400	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
91217511	5400	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
31382712	730	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15134822	2300	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
75176212	3800	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
87734511	2000	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15115414	3000	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15135912	3400	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
91356812	4600	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15116011	3600	0.0%	15.0%	15.0%		65.0%	5.0%	100.0%
15136711	4500	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
75176511	4200	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15115511	3000	0.0%	15.0%	15.0%		66.5%	5.0%	100.0%
15135511	3000	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
37119811	9600	15.0%	0.0%	10.0%		75.0%	0.0%	100.0%
17319931	9800	15.0%	0.0%	15.0%		75.0%	0.0%	100.0%
17315211	2700	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15137411	5450	15.0%	0.0%	10.0%		0.0%	75.0%	100.0%
3543011	4900	15.0%	0.0%	10.0%		70.0%	5.0%	100.0%
79215011	2500	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15135621	3100	0.0%	15.0%	15.0%		70.0%	0.0%	100.0%
15139911	12300	15.0%		15.0%		70.0%		100.0%
15137221	5100		15.0%	15.0%		70.0%		100.0%
15196212	3800		15.0%	15.0%		70.0%		100.0%
1513512	4200		15.0%	15.0%		70.0%		100.0%

91295811	3300		15.0%	15.0%		70.0%		100.0%
31277212	5100	15.0%		15.0%		75.0%		100.0%
15134511	2000		15.0%	15.0%		70.0%		100.0%
15136311	3950		15.0%	15.0%		70.0%		100.0%
37119511	9000	15.0%		15.0%		70.0%	5.0%	100.0%
6123512	3000		15.0%	15.0%		70.0%		100.0%
31515511	3000		15.0%	15.0%		65.0%	5.0%	100.0%
15139221	8400	15.0%		10.0%		70.0%	5.0%	100.0%
15119211	8400		15.0%	15.0%		70.0%		100.0%
85539911	10000	15.0%		15.0%		65.0%	5.0%	100.0%
8553011	3600		15.0%	15.0%		70.0%		100.0%
75178712	7500	15		10		65	10	100.0%
25275511	3000		15	15		70		100.0%
17275611	3100		15	15		70		100.0%
79355211	2700		15	15		70		100.0%
15136011	3600		14	16		70		100.0%
1513511	3100		15	15		70		100.0%
15135511	3000		15	15		60	10	100.0%
21495611	3100		15	15		70		100.0%
17319921	9800	15	0	5	5	70	5	100.0%
25215612	3100		15	15		70		100.0%
91356211			15	15		70		100.0%
31386513	4200		14	16		70		100.0%
13458513	7200	15		15		70		100.0%
35438512	7200		15	10		75		100.0%
15115812	3300		15	15		70		100.0%
31416813	4600		15	15		70		100.0%
15134822	2300		15	15		70		100.0%
15259912	9800		15	15		70		100.0%
61375812	3300		15	15		70		100.0%
31344512	2000		15	10		75		100.0%
37126012	3600		15	10		75		100.0%
91155512	3000		15	15		70		100.0%

پژوهش، اطلاعات ساختاری دقیق ۹۹ نمونه فرش را ارائه می‌نماید. داده‌های حاضر بر سه محور اصلی استوار است. الف: تراکم گره (ستون ۲) که نشان‌دهنده تعداد گره در هر دسیمتر مربع است که دامنه وسیعی از ۷۳۰ (فرش‌های کاربردی ساده) تا ۱۲۳۰۰ (فرش‌های موزه‌ای بسیار ظریف) را در بر

جدول ۲ به عنوان مکمل جدول ۱، داده‌های کمی مربوط به ساختار فرش‌ها را ارائه می‌نماید. درصد‌های ارائه شده برای هر جزء مواد اولیه (تار ابریشم، تار پنبه، پود پنبه، پود ابریشم، پرز پشمی، پرز ابریشمی) مجموعاً ۱۰۰٪ را تشکیل می‌دهند. این جدول به عنوان هسته مرکزی تحلیل‌های داده‌محور

پارامترهای ساختاری شامل تراکم گره (تعداد گره در دسیمتر مربع) که شاخص اصلی ظرافت بافت است؛ ترکیب مواد اولیه شامل درصد تار ابریشم، تار پنبه، پود ابریشم، پود پنبه در بخش زمینه و پرز پشمی و پرز ابریشمی در بخش رویه که مجموعاً ۱۰۰٪ را تشکیل می‌دهند، بررسی شده‌اند. همچنین پارامترهای هنری-تاریخی شامل طرح فرش (مانند شاه عباسی، اسلیمی، هندسی ابعاد (طول × عرض)، منطقه بافت (شهر تولیدکننده)، رنگ زمینه و رنگ حاشیه که ویژگی‌های زیبایی‌شناختی و هویت فرهنگی فرش را مشخص می‌کنند نیز بررسی شده‌اند. تمامی این پارامترها بر اساس استانداردهای مستندسازی فرش‌های موزه‌ای ایران [۷، ۴۵] انتخاب و کمی‌سازی شده‌اند.

می‌گیرد. ب: ترکیبات تار و پود (ستون‌های ۳-۶) که درصد مواد به کار رفته در ساختار زیرین فرش را نشان می‌دهد. مقادیر صفر درصد نشان‌دهنده عدم استفاده از آن ماده و مقادیر ۱۵-۲۵ درصد نشان‌دهنده استفاده استاندارد یا ویژه است. ج: ترکیبات پرز (ستون‌های ۷-۸) که جنس رویه فرش را مشخص می‌کند که عمدتاً از پشم (برای استحکام) و ابریشم (برای ظرافت و درخشندگی) تشکیل شده است. ستون ۹ کنترل کیفی داده‌ها را تضمین می‌نماید که مجموع تمام درصدها دقیقاً برابر ۱۰۰٪ باشد. این داده‌ها پایه‌ای برای خوشه‌بندی و ایجاد نظام طبقه‌بندی عینی فراهم کرده‌اند.

۲-۲- پارامترهای بررسی شده

جدول ۳- عوامل اولیه انتخاب شده از جدول ۱ و ۲، به عنوان مبنایی برای خوشه بندی هر مشاهده

Number of knots per dcm ²	Silk warp	cotton warp	cotton weft	Silk weft	woolen pile	silk pile
7400	0.0%	15.0%	10.0%	0.0%	65.0%	10.0%
2500	0.0%	15.0%	15.0%	0.0%	70.0%	0.0%
2500	0.0%	15.0%	15.0%	0.0%	70.0%	0.0%
1400	0.0%	15.0%	10.0%	0.0%	75.0%	0.0%
4450	0.0%	15.0%	15.0%	0.0%	70.0%	0.0%
9600	0.0%	15.0%	10.0%	0.0%	65.0%	10.0%
2500	0.0%	15.0%	15.0%	0.0%	70.0%	10.0%
2300	0.0%	15.0%	15.0%	0.0%	70.0%	0.0%
2800	0.0%	15.0%	15.0%	0.0%	70.0%	0.0%
9900	15.0%	0.0%	15.0%	0.0%	65.0%	5.0%
9900	15.0%	0.0%	15.0%	0.0%	65.0%	5.0%

(شاخص اصلی کیفیت)، ترکیبات تار و پود ابریشم و پنبه (شاخص‌های ارزش مادی و ساختاری) و جنس پرز

جدول ۳ زیرمجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی جدول‌های ۱ و ۲ را نمایش می‌دهد. هفت پارامتر انتخابی شامل تراکم گره

است. نسبت تعداد نمونه به تعداد متغیرها مناسب بوده و میانگین نمونه در هر خوشه امکان برآورد پایدار مراکز خوشه را فراهم می‌کند. همچنین کیفیت خوشه‌بندی با شاخص‌های معتبر سیلوئت، کالینسکی-هاراباش، و دیویس-بولدین^۱ مورد تأیید است، که نشان‌دهنده تفکیک مناسب خوشه‌ها و انتخاب تعداد خوشه بهینه است. بنابراین، اندازه نمونه و کیفیت داده‌ها برای اهداف پژوهش حاضر قابل قبول است (جدول ۴).

(پشیمی/بریشمی) می‌باشند که در مجموع ابعاد مختلف فنی و هنری فرش‌ها را پوشش داده و پایه تحلیل خوشه‌بندی را تشکیل می‌دهند.

۳-۲- بررسی آماری

۳-۲-۱- بررسی شاخص‌های آماری کیفیت خوشه بندی

تعداد نمونه‌های مورد بررسی (N=99) با توجه به اهداف تحلیل اکتشافی و چارچوب‌بندی اولیه خوشه‌بندی کافی

جدول ۴. خلاصه بررسی داده‌های آماری

تعداد نمونه‌ها (N)	99	داده کافی برای تحلیل اکتشافی → N=99
تعداد متغیرها (p)	7	پارامترهای اصلی بررسی شده → p=7
نسبت N/p	14.14285714	(≥10) بالاتر از آستانه توصیه‌شده → N/p=14.14
میانگین نمونه در هر خوشه	33	پایدار برای برآورد مراکز خوشه → ≈33.0
میانگین سیلوئت	0.742300307	کیفیت خوشه‌بندی متوسط/خوب → 0.74
شاخص کالینسکی-هاراباش	1289.874658	تعداد خوشه انتخاب‌شده بهینه است → 1289.87
شاخص دیویس-بولدین	0.545367041	هرچه کمتر، خوشه‌بندی بهتر → 0.55

۳-۲-۲- تحلیل پایداری با اعتبارسنجی متقابل

برای اطمینان از پایداری نتایج خوشه‌بندی، از روش اعتبارسنجی متقاطع-k بخشی^۲ استفاده شد. در این روش، داده‌ها به ۱۰ زیرمجموعه تقسیم شده و در هر مرحله مدل روی ۹ زیرمجموعه آموزش و روی یک زیرمجموعه آزمون شد. این فرآیند ۱۰ بار تکرار گردید. نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی متقابل

شاخص	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
شاخص سیلوئت	0.73	0.018	0.71	0.76
شاخص دیویس-بولدین	0.56	0.023	0.52	0.59

انحراف معیار پایین شاخص‌ها (۰.۰۱۸) برای سیلوئت و ۰.۰۲۳ برای دیویس-بولدین) نشان‌دهنده پایداری مناسب مدل در

² Fold Cross-validation

¹ Silhouette, Calinski-Harabasz و Davies-Bouldin

محاسبه شده‌اند. نمودارهای خمیده^۷، درختواره^۸، سیلوئت^۹ و ماتریس تحلیل مؤلفه‌های اصلی^{۱۰} ارائه شده و نشان‌دهنده قدرت و وضوح تحلیل خوشه‌بندی هستند.

شکل ۳- الف نمودار خمیده^۷ بر اساس معیار مجموع مربعات خطا^{۱۱} به منظور تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد خوشه‌ها (k)، مقدار مجموع مربعات خطا روندی نزولی دارد. نقطه آرنج^{۱۲} نمودار، که نشان‌دهنده تعداد خوشه‌های بهینه است، در محدوده $k=3$ تا $k=4$ واقع شده است. پس از این نقطه، کاهش مقدار مجموع مربعات خطا ناچیز بوده و افزایش تعداد خوشه‌ها توجیه چندانی ندارد. بر این اساس، مقدار $k=3$ به عنوان تعداد مناسب خوشه‌ها برای تحلیل‌های بعدی انتخاب گردید.

به منظور تعیین ساختار طبیعی داده‌ها و بررسی مناسب‌ترین تعداد خوشه‌ها، از خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی با روش پیوند وارد^{۱۳} استفاده شد. درختی حاصل (شکل ۳-ب) فاصله ادغام خوشه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به وجود بلندترین فاصله عمودی در نمودار، نقطه برش به گونه‌ای انتخاب گردید که داده‌ها در قالب سه خوشه متمایز دسته‌بندی شوند. این تعداد

بین زیرمجموعه‌های مختلف داده است. این نتایج تأیید می‌کند که عملکرد مدل به تقسیم‌بندی خاصی از داده‌ها وابسته نبوده و از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسبی برخوردار است.

۲-۳-۲- تحلیل نتایج ANOVA

پس از بررسی پارامترهای آماری کیفیت خوشه بندی، معناداری هر پارامتر از هفت متغیر در معنی‌دار بین خوشه‌ها بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که سه فاکتور تراکم گره، ($P=0$ و $F=374.51$) بسیار معنی‌دار است، وجود نخ تار ابریشم ($P=0.016$ و $F=4.30$) تفاوت معنی‌دار بین خوشه‌ها را ایجاد نموده است. وجود نخ پود ابریشم (0.046 و $P=$ $F=3.17$) تفاوت معنی‌دار بین خوشه‌ها ایجاد نموده است. این سه متغیر نشان می‌دهند که ترکیب و تراکم ابریشم و تعداد گره‌ها شاخص‌های اصلی برای تفکیک خوشه‌ها هستند.

۲-۳-۴- مقایسه مقادیر آماری

علاوه بر خوشه‌بندی میانگین متحرک^۱ و میانه متحرک^۲، تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی^۳ و شناسایی خوشه مبتنی بر چگالی^۴ نیز انجام شده و شاخص‌های معتبر مانند کالینسکی-هاراباش^۵ و سیلوئت^۶ برای مقایسه روش‌ها

⁸ Dendrogram

⁹ Silhouette

¹⁰ PCA Matrix

¹¹ SSE

¹² Elbow Point

¹³ Ward

¹ K-Means

² K-Medoids

³ Hierarchical Clustering

⁴ DBSCAN

⁵ Calinski-Harabasz

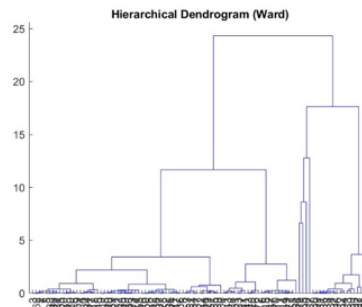
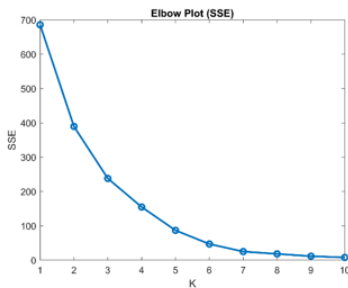
⁶ Silhouette

⁷ Elbow plot

سیلوئت برای اکثر نمونه‌ها مثبت بوده که حاکی از تعلق‌دهی صحیح آن‌ها به خوشه‌های مربوطه می‌باشد. وجود مقادیر منفی اندک در پایین هر تیغه، نشان‌دهنده نمونه‌های مرزی است که به طور قطعی به یک خوشه خاص تعلق ندارند.

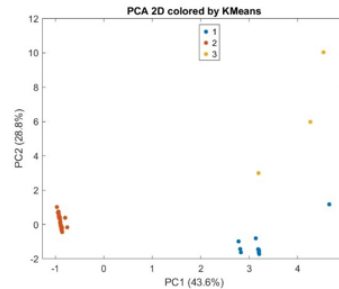
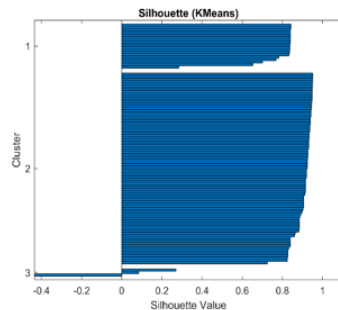
خوشه، علاوه بر ایجاد حداکثر تمایز درون‌گروهی، از نظر مفهومی نیز قابل تفسیر و توجیه‌پذیر بود.

برای ارزیابی کیفیت و صحت خوشه‌بندی انجام‌شده، از نمودار سیلوئت (شکل ۳-ج) استفاده گردید. بر اساس نمودار سیلوئت، میانگین ضریب سیلوئت برابر با ۰.۶۵ به دست آمد که نشان‌دهنده کیفیت مطلوب خوشه‌بندی است. مقادیر



الف

ب



ج

د

شکل ۳- نمودارهای مرتبط با تحلیل‌های آماری

نشان می‌دهد. این جدایی بصری، صحت و کیفیت خوشه‌بندی انجام شده را تأیید می‌نماید و مؤید آن است که خوشه‌های شناسایی شده از ساختار متمایز و ذاتی در داده‌ها نشأت گرفته‌اند.

به منظور تجسم و اعتبارسنجی خوشه‌های شناسایی شده توسط الگوریتم میانگین متحرک^۱، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش ابعاد داده‌ها استفاده شد. نمودار دویبعدی حاصل (شکل ۳-د) که در مجموع ۷۲.۴٪ از واریانس داده را حفظ می‌کند، جدایی واضح و قابل ملاحظه‌ای بین سه خوشه را

^۱ K-Means

همچنین به منظور اعتبارسنجی نتایج، خوشه‌بندی با چهار الگوریتم میانگین متحرک، میانه متحرک، و سلسله‌مراتبی و شناسایی خوشه مبتنی بر چگالی انجام شد. مقایسه نتایج نشان داد که سه الگوریتم نخست در تخصیص 80.16% از نمونه‌ها (۷۹ نمونه از ۹۸) کاملاً همخوانی داشتند که مؤید استحکام ساختار خوشه‌های شناسایی شده است. شناسایی خوشه مبتنی بر چگالی با منطق مبتنی بر تراکم، ۷ نمونه را به عنوان نویز علامت‌گذاری کرد. همچنین، ۱۲ نمونه به عنوان نقاط مرزی شناسایی شدند که در آن‌ها میان تمامی الگوریتم‌ها اختلاف نظر وجود داشت. این اجماع قوی، انتخاب نهایی روش "میانگین متحرک" را به عنوان الگوریتم اصلی توجیه می‌نماید.

۳- نتیجه و بحث

۳-۱- خوشه بندی داده ها با الگوریتم میانگین

متحرک

روش خوشه‌بندی میانگین متحرک یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین تکنیک‌ها در تحلیل خوشه‌بندی است. خوشه‌بندی داده‌ها عموماً برای تقسیم کل جمعیت به زیرجمعیت‌هایی با پیچیدگی کمتر و همگنی بیشتر استفاده می‌شود و اثر داده‌های پرت را کاهش می‌دهد [۴۷، ۱۶]. الگوریتم‌های خوشه‌بندی را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: الگوریتم‌های سلسله‌مراتبی تجمعی مانند روش مرکز و

الگوریتم‌های غیر سلسله‌مراتبی مانند میانگین متحرک [۴۸-۵۰، ۱۶]. از آنجایی که هر روش خوشه‌بندی مزایای خود را دارد، انتخاب روش بستگی به کاربرد دارد. روش میانگین متحرک یکی از روش‌های خوشه‌بندی با کاربردهای گسترده است. در این تکنیک مجموعه‌ای از اشیاء به دسته‌های K تقسیم می‌شوند به گونه‌ای که هر دسته بر اساس ویژگی‌های خاص همگن باشند [۵۱-۵۵، ۱۶]. با فرض n مشاهده (X_1 و X_2 X_n)، روش میانگین متحرک را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

۱- مرکز k خوشه اولیه را به طور تصادفی انتخاب کنید ($K < n$).

۲- هر شی را بر اساس نزدیکترین فاصله (فاصله اقلیدسی مربع) بین شی و مرکز خوشه به یک خوشه اختصاص دهید.

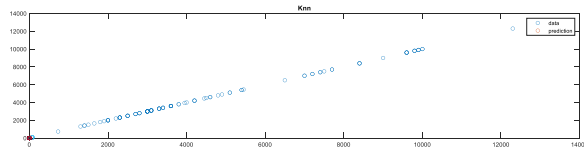
۳- میانگین تمام اشیاء را در همان خوشه به عنوان مرکز جدید آن خوشه محاسبه کنید.

۴- مراحل ۲ و ۳ را تکرار کنید تا نتایج مرحله ۲ نشان دهنده عدم تغییر باشد.

۳-۲- نتایج خوشه بندی

در ابتدا با کمک خوشه بندی میانگین متحرک^۱ داده‌های پایگاه داده تهیه شده (جدول ۱ و ۲) بر اساس تراکم گره به سه خوشه دسته بندی شده است. شکل‌های ۳ و ۴ نتایج دسته بندی را نشان می‌دهند.

^۱ K-means

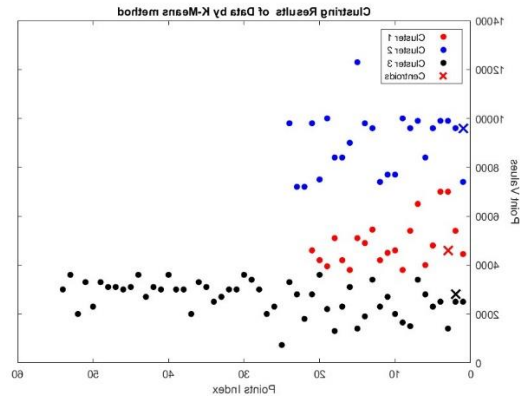


شکل ۵. نتیجه Knn برای نمونه جدید (گوشه سمت چپ-دایره قرمز)

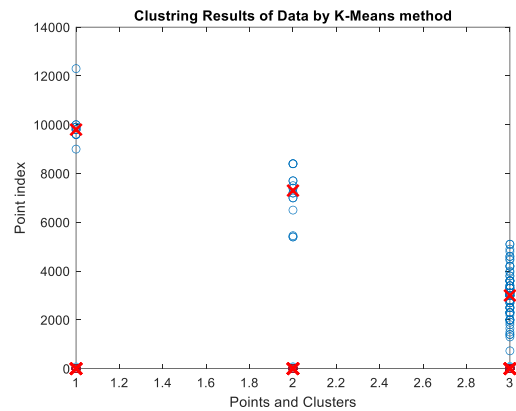
در واقع تحلیل این روش اینگونه است که اگر فرشهای موجود در جدول ۱ و جدول ۲ را بر اساس تراکم دسته بندی نماییم، الگوریتم کی-مینز فرشها را در سه دسته قرار میدهد. حال فرض کنیم فرشی جدید بافت داریم که میخواهیم بدانیم ارتباط باستانی و تاریخی این فرش با فرش های باستانی ایران چگونه است و میتوان آنرا به کدام دسته متعلق دانست. فرش جدید دارای مشخصات [۰.۱۶، ۰.۱۲، ۰.۱۳، ۰.۱، ۰.۳۳، ۰.۱۶] تراکم ۷۵۰۰، درصد تار ابریشم ۰.۱۲، درصد تار پنبه ۰.۱۶، درصد پود پنبه ۰.۱۳، درصد پود ابریشم ۰.۱، درصد پایل پشمی ۰.۳۳، درصد پایل ابریشم ۰.۱۶ بوده و الگوریتم کی-مینز این فرش را در دسته فرش نوع اول قرار میدهد. این داده میتواند روی برجسب فرش درج شده تا رابطه ارزش تاریخی فرش جدید تولید شده برای خریدارن مشخص شود.

۳-۳- محدودیت و راهکار آینده

با توجه به جدید بودن موضع در این مطالعه داده‌ای از طبقه بندی مستقیم توسط متخصصان فرش جمع‌آوری نشده است چرا که در تحقیقات پیشین با این روش دسته بندی انجام نشده است، لیکن با مشورت از اساتید



شکل ۳. نتایج خوشه بندی بانک داده



شکل ۴. نتایج خوشه بندی و مراکز هر خوشه

برای مثال، یک فرش جدید بافته شده با مشخصات [۰.۱۶، ۰.۱۲، ۰.۱۳، ۰.۱، ۰.۳۳، ۰.۱۶] در نظر گرفته شده است و تعلق آن به یک خوشه از سه خوشه با روش "همسایگی نزدیک‌ترین‌ها"^۱ پیش بینی و شناسایی می شود فاکتورهای اساسی خوشه بندی، همسایگی پنج، فاصله متریک و وزن دو تنظیم شده است. این نمونه بافته شده جدید متعلق به اولین خوشه است و در گوشه سمت چپ پایین شکل ۵ نشان داده شده است.

^۱ Knn

ج: تحلیل مقیاس‌پذیری: بررسی عملکرد مدل روی داده‌های با ابعاد بزرگتر و توسعه نسخه‌های بهینه‌شده الگوریتم برای سامانه‌داده‌های جهانی.

د: توسعه سامانه‌داده چندملیتی: گسترش مجموعه داده به شامل فرش‌های سایر کشورها و تحلیل تطبیقی الگوهای منطقه‌ای.

لذا به نظر میرسد یکی از راه‌های ادامه این تحقیق در آینده افزودن معیارهای بیشتر، کمی نمودن معیارهای کیفی و یا ایجاد سیستم وزن دهی پارامترهای ورودی باشد. این امر تحقیق وسیع ملی و تجمیع متخصصین را می‌طلبد تا در ابتدا در داخل کشور و سپس بین کشورها اینگونه تحقیق شکل بگیرد تا شناسنامه فرشها دارای خوشه بندی کاملی باشند و صرفاً این تحقیق گام اولیه این خوشه بندی را نشان میدهد. این پژوهش به بررسی سه فرضیه اصلی پرداخت. فرضیه اول که "امکان طبقه‌بندی عینی فرش‌های ایرانی بر اساس پارامترهای ساختاری و مواد اولیه وجود دارد." تأیید شد و خوشه‌بندی میانگین متحرک با شاخص سیلوئت ۰.۷۴ موفق به تفکیک سه خوشه متمایز گردید. فرضیه دوم این بود که "تراکم گره و ترکیبات ابریشم مهم‌ترین عوامل تمایز بین فرش‌ها هستند." نیز تأیید شد. تحلیل آنالیز واریانس نشان داد تراکم گره ($P < 0.001$ و $F=374.51$) و ترکیبات ابریشم ($P < 0.05$) معنادارترین پارامترها می‌باشند. فرضیه سوم اینکه

تجربی، خوشه‌های شناسایی شده با دانش متعارف حوزه همخوانی دارد:

خوشه ۱: فرش‌های با تراکم گره بالا (> 8000) و ابریشم بیشتر (کلکسیون)

خوشه ۲: تراکم متوسط ($8000-3000$) → کاربردی (لوکس)

خوشه ۳: تراکم پایین (< 3000) → کاربردی (معمولی)

۳-۴- جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده

بر اساس محدودیت‌های مطالعه حاضر، جهت‌گیری‌های زیر برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود:

الف: توسعه روش‌های خوشه‌بندی ترکیبی^۱: استفاده از تکنیک‌های ترکیبی مانند "تجمیع پایگاه اشتراک خوشه‌ها یا روش تجمیع ماتریس اشتراک خوشه‌ها"^۲ و "روش تجمیع سلسله‌مراتبی خوشه‌ها یا روش تجمیع خوشه‌ها به صورت سلسله‌مراتبی"^۳ برای بهبود پایداری و دقت خوشه‌بندی در نمونه‌های بزرگ‌مقیاس.

ب: تحلیل جامع اهمیت ویژگی‌ها: به کارگیری روش‌های پیشرفته‌تر مانند توضیحات افزایشی شاپلی^۴ و اهمیت با جایگشت^۵ برای شناسایی دقیق‌تر سهم هر پارامتر در طبقه‌بندی.

⁴ Shapley Additive Explanations (SHAP)

⁵ Permutation Importance

¹ Ensemble Clustering

² Cluster-based Similarity Partitioning Algorithm

³ HyperGraph Partitioning Algorithm

تراکم گره یا جنس نخ متمرکز بودند، در حالی که این تحقیق با ترکیب چند شاخص کلیدی و بهره‌گیری از خوشه‌بندی داده‌کاوانه توانست طبقه‌بندی دقیق‌تری ارائه دهد. همچنین برخلاف کارهای مرمتی یا آزمایشگاهی صرف، این پژوهش رویکردی کاربردی برای بازار و تجارت فرش در سطح ملی و جهانی پیشنهاد می‌کند.

یافته‌های این تحقیق می‌تواند در عمل مورد استفاده قرار گیرد. از جمله پیشنهاد می‌شود کد خوشه در شناسنامه فرش‌ها درج شود تا خریداران و فروشندگان بتوانند بر اساس معیارهای علمی به ارزش‌گذاری بپردازند. همچنین توسعه یک سامانه داده جهانی فرش‌ها می‌تواند به افزایش شفافیت در بازار جهانی و تسهیل مبادلات کمک کند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با افزایش حجم نمونه، استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین، و ادغام داده‌های چندملیتی انجام گیرند تا چارچوبی جامع‌تر و جهان‌شمول‌تر فراهم شود.

۵- مراجع

1. Bassam, J., Bilingual culture of handwoven carpet. 2012, Tehran: Encyclopedia Foundation.
2. Tajadod, H., Encyclopaedia of Iranian handwoven carpets. 2011, Tehran: Encyclopaedia of Iranology.
3. Yavari, H., The basics of Iranian carpet recognition. 200, ۵ Tehran: Raja Publications.
4. Tabatabaei, S.M., et al., Modeling the Performance Properties on Woolen Handknotted Carpets using Response Surface Methodology.

"چارچوب پیشنهادی قابلیت توسعه به یک سامانه جهانی را داراست." تأیید شد و از طرفی پایداری نتایج در اعتبارسنجی متقابل و ساختار منسجم داده‌ها امکان توسعه به بانک جهانی داده‌های فرش‌ها را تأیید می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف طراحی یک نظام طبقه‌بندی عینی برای فرش‌های اصیل ایرانی انجام شد. با استفاده از داده‌های مربوط به ۹۹ فرش موزه‌ای و تحلیل ۱۲ پارامتر ساختاری، طرح‌شناسی و مواد اولیه، الگوریتم خوشه‌بندی میانگین متحرک به کار گرفته شد و فرش‌ها در سه خوشه همگن دسته‌بندی گردیدند. یافته‌ها نشان داد که این چارچوب می‌تواند مبنایی علمی و داده‌محور برای مقایسه فرش‌های جدید با نمونه‌های تاریخی فراهم سازد و فرآیند ارزش‌گذاری را عینی‌تر و شفاف‌تر نماید.

در مقایسه با مطالعات پیشین، پژوهش حاضر نوآوری‌هایی دارد. برخی تحقیقات گذشته بیشتر بر پارامترهای منفرد مانند

Journal of Fashion Technology & Textile Engineering, 2016. 2014.

5. Serrano, A., et al., A non-invasive imaging approach for improved assessments on the construction and the condition of historical knotted-pile carpets. Journal of Cultural Heritage, 2021. 47: p. 79-88.

6. Kashyzadeh, K.R. and A.H. Darounkola, Application of Taguchi approach to forecast the wages of persian silk carpet weavers. International Journal of Engineering and Management Research, 2021. 11.

7. Baranwal, B., Classification of carpets, in *Advances in Carpet Manufacture (Second Edition)*, K.K. Goswami, Editor. 2018, Woodhead Publishing. p. 467-483.
8. Elkhateeb, A., et al., Absorption characteristics of masjid carpets. *Applied Acoustics*, 2016. 105: p. 143-155.
9. ÖZDİL, N., et al., COMPRESSIBILITY AND THICKNESS RECOVERY CHARACTERISTICS OF CARPETS. *Journal of Textile & Apparel/Tekstil ve Konfeksiyon*, 2012. 22.(۳)
10. Dadgar, M., et al., Stability of Polypropylene Frieze Yarn after Different Heat Setting Condition and Prediction Residual Frieze Effect By Mamdani's Fuzzy Inference System, in *AUTEX*. 2013: Germany.
11. Dadgar, M., Prediction of Polypropylene Yarn Shrinkage in Heat Setting Process Using Fuzzy Inference System. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* 2020.
12. Dadgar, M., S.M. Hosseini Varkiyani, and A.A. Merati, Pin-Point Effect Determination Using A Rigorous Approach. *Indian Journal of Textile*, 2014.
13. Dadgar, M., S.M. Hosseini Varkiyani, and A.A. Merati, A New method of Evaluating Heat Setting Effect of Carpet Yarns, in *ATC*. 2011: Korea.
14. Dadgar, M., A.A. Merati, and S.M. Hosseini Varkiyani, Evaluation of the pinpoint effect on carpet appearance. *The Journal of The Textile Institute*, 2015: p. 1-9.
15. Dadgar, M., S.M. Hosseini Varkiyani, and A.A. Merati, Evaluation of heat setting parameters in Carpet Comfort. *Fiber and polymer*, 2015.
16. Dadgar, M., Developing new measuring and ANN prediction method for the longitudinal diameter of intermingled untwisted heat set bulk continues filament yarns. *Measurement*, 2021. 171: p. 108727.
17. Dadgar, M., et al., Comparison of Mamdani and Sugeno fuzzy inference system in prediction of residual frieze effect of frieze carpet yarns. *Tekstilna industrija*, 2013. 61(2): p. 16-25.
18. Dadgar, M. and S.M. Hosseini Varkiyani, Comparison heat setting results of SUPERBA and POWER HEAT SET. *Tekstilna industrija*, 2014.
19. Dadgar, M., S.M. Hosseini Varkiyani, and A.A. Merati, Comparison between artificial neural network and response surface methodology in the prediction of the parameters of heat set polypropylene yarns. *The Journal of The Textile Institute*, 2014. 106(4): p. 417-430.
20. Dadgar, M. and K. Noshad, Machine Learning Modeling of Melt-Spinning for Yarn Property Prediction. *Results in Materials*, 2025: p. 100776.
21. Abidi, F., et al., A General System of Handmade Carpet Geometry. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2015. 5(11): p. 72-76.
22. Fatma, A., et al., PREDICTION OF THE HANDMADE CARPET WEIGHT. 2014.
23. Abidi, F., et al., Modelling of Tunisian hand-made carpet resilience under long static loading using fuzzy expert system. *Fibers and Polymers*, 2017. 1 : (۹) p. 1810-1815.
24. Gupta, S.K., K.K. Goswami, and A. Majumdar, Durability of Handmade Wool Carpets: A Review. *Journal of Natural Fibers*, 2015. 12(5): p. 399-418.
25. Kakuee, O., et al., Investigation of mordants for dyeing of yarns in ancient Persian carpets (15th–17th century) by IBA methods. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2019. 450: p. 294-298.

26. Barbache, S., et al., Optical analyses of wool dyeing materials in ancient Moroccan carpets "Zarbia (s)": Combination of UV-vis diffuse reflectance, 3D-fluorescence and Raman spectroscopies. *Dyes and Pigments*, 2018. 153: p. 256-265.
27. Hasanov, E.L., Innovative basis of research of technologic features of some craftsmanship traditions of Ganja (On the sample of carpets of XIX century). *International Journal of Environmental and Science Education*, 2016. 11(14): p. 6704-6714.
28. Manhita, A., et al., Unveiling the colour palette of Arraiolos carpets: Material study of carpets from the 17th to 19th century period by HPLC-DAD-MS and ICP-MS. *Journal of cultural heritage*, 2014. 15(3): p. 292-299.
29. Csapó, J., et al., Age estimation of old carpets based on cystine and cysteic acid content. *Analytica chimica acta*, 1995. 300(1-3): p. 313-320.
30. Lodewijks, J., The use of synthetic material for the conservation and restoration of ancient textiles. *Studies in Conservation*, 1964. 9(sup1): p. 79-85.
31. Ahmed, H., Conservation Strategies of a Rare Historical Carpet in Cairo University, A case study. *Int J Fashion Technol Textile Eng*, 2018. 1(1): p. 1-6.
32. Tousian Shandiz, G., et al., Pathology and Classification of Iranian Carpet Damages. *Journal Scientific Goljaam*, 2014. 9(24): p. 55-70.
33. Petillo, E. Comparison of treatments for damage in Oriental carpets. in *Textile Specialty Group postprints: Vol. Two. Papers delivered at the Textile Subgroup Session, AIC 20th annual meeting, Buffalo, New York, June 1992*. 1992.
34. Wilkinson, T.J., The definition of ancient manured zones by means of extensive sherd-sampling techniques. *Journal of Field Archaeology*, 1982. 9(3): p. 323-333.
35. Duan, Q. and L. Zheng, About qushu: Carpets or Rugs with Long Hair, in *Studies on the History and Culture Along the Continental Silk Road*. 2020, Springer. p. 21-30.
36. Huseynov, M., ANCIENT BELIEFS AS THE SOURCE OF DESIGN CHARACTERISTICS IN AZERBAIJANI CARPETS. *Paradigmata poznani*, 2020(4): p. 43-45.
37. Birdwood, G., THE ANTIQUITY OF ORIENTAL CARPETS. *Journal of the Royal Society of Arts*, 1908. 56(2920): p. 1041-1059.
38. Stead, R., *The Ardabil Carpets*. 1974: Getty Publications.
39. Eiland, M.L., The past re-made: the case of oriental carpets. *Antiquity*, 1993. 67(257): p. 859-863.
40. Singer, C., *Hand-woven Carpets: Oriental and European*. *Nature*, 1923. 111(2): (۷۷) p. 71-72.
41. Manitta, S.E., The care of rugs and carpets: the case for conservation, in *Restoration: is it acceptable?* p. 95-101.
42. Quataert, D., MACHINE BREAKING AND THE CHANGING CARPET INDUSTRY OF WESTERN ANATOLIA 1860-1908, in *Workers, Peasants and Economic Change in the Ottoman Empire, 1730-1914*. 2010, Gorgias Press. p. 117-136.
43. Zeinalpour Yazdi, M. and P. Pevandi, A review of camouflage pattern generation, evaluation, and detection methods. *Textile and Clothing Science and Technology*, 20 (۳)۶ . ۱۷ p. 9-21.
44. Zare Nejad, Z. and P. Pevandi, Clothing Image Clustering Using Image Processing and K-Means Algorithm. *Textile and Clothing Science and Technology*, 2013. 3(1): p. 3-10.

45. Company, I.C.J.S., Recognizing examples of Iranian carpets .Vol. 1. 1982, Tehran,IRAN: Iran Carpet Company. 220.
46. Company, F.I.J.S., Knowing examples of Iranian carpets. 1361, Tehran: Pishgar.
47. Soltani, P., et al., A study on siro, solo, compact, and conventional ring-spun yarns. Part III: modeling fiber migration using modular adaptive neuro-fuzzy inference system. Journal of The Textile Institute, 2013(ahead-of-print): p. 1-11.
48. Anderberg, M., Cluster analysis for applications. 1973, New York: Academic Press, Inc.
49. Zhang, S., et al., Phenomapping of subgroups in high-Lp (a) patients: a data-driven cluster analysis in RED-CARPET study. Clinical Research in Cardiology, 2025: p. 1-11.
50. Sambade, I.M., et al., Signatures of Selection for Resistance/Tolerance to *Perkinsus olseni* in Grooved Carpet Shell Clam (*Ruditapes decussatus*) Using a Population Genomics Approach. Evolutionary Applications, 2025. 18(5): p. e70106.
51. Cutri, R., O. Mattasoglio, and N. Stem. Data Mining Application in an Introductory Engineering Physics Lab. in 2025 ASEE Annual Conference & Exposition. 2025.
52. Cutri, R., N. Stem, and O.M. Neto, Data mining application in an introductory engineering physics lab: a diagnostic activity. Brazilian Journal of Development, 2025. 11(3): p. e78196-e78196.
53. Mirjalili, R., et al. VLM-Vac :Enhancing Smart Vacuums Through VLM Knowledge Distillation and Language-Guided Experience Replay. in 2025 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2025. IEEE.
54. Sabillon Orellana, C.A., et al., Pavement Patterns: An Unsupervised Learning Approach to Texture Analysis in Rigid Pavements. Transportation Research Record, 2025: p. 03611981251355527.
55. Amirian Varnousefaderani, B., et al., Enforced clustering for zero-to-one-shot texture anomaly detection. Machine Vision and Applications, 2025. 36(3): p. 53.