



ارائه چارچوب مفهومی استانداردسازی چندلایه اقلیم‌محور برای پوشش‌های ضدخوردگی در ایران: رویکرد فراترکیب

بابک قربانیان^۱

سابقه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲

۱ گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تدوین چارچوب استانداردسازی چندلایه اقلیم‌محور برای پوشش‌های ضدخوردگی در ایران انجام شده است. این پژوهش از نظر هدف کاربردی-توسعه‌ای و از نظر ماهیت آمیخته (کمی-کیفی) از نوع اکتشافی متوالی است. در فاز کیفی، با استفاده از رویکرد فراترکیب و بررسی نظام‌مند ۲۶ منبع معتبر شامل مقالات علمی و استانداردهای بین‌المللی، ۳۰ کد اولیه استخراج شد. این کدها در پنج دسته اصلی شامل طبقه‌بندی اقلیم و خوردندگی محیط، استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش، آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت، آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی، و نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق سازماندهی شدند. در فاز کمی، پرسشنامه‌ای با ۳۰ گویه طراحی و در اختیار ۸۵ خبره قرار گرفت. داده‌های ۷۲ پرسشنامه با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری و نرم‌افزار SmartPLS نسخه ۴ تحلیل شد. یافته‌ها نشان داد که تمام شش فرضیه پژوهش در سطح اطمینان ۹۹ درصد تأیید شده و شاخص‌های برازش مدل ($RMSEA=0.051$, $NFI=0.93$, $SRMR=0.088$, $GFI=0.91$) در محدوده مطلوب قرار دارند. بالاترین ضریب مسیر مربوط به تأثیر شرایط اقلیمی بر استانداردهای طراحی (۰.۸۴۲) و پایین‌ترین مربوط به تأثیر آزمون‌های کنترل کیفیت بر نظام ارزیابی انطباق (۰.۲۷۴) بود. بر اساس یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود نقشه ملی خوردندگی ایران تدوین، بانک داده سیستم‌های پوشش تأیید شده برای هر اقلیم ایجاد، و نظام تأیید صلاحیت پیمانکاران بر اساس مؤلفه‌های شناسایی شده بازنگری شود.

کلیدواژه‌ها: استانداردسازی، پوشش‌های ضدخوردگی، اقلیم‌محور، فراترکیب، مدل‌سازی معادلات ساختاری.

¹ ghorbanian.babak@hut.ac.ir

۱ مقدمه

حفاظت از سازه‌های فلزی در برابر خوردگی یکی از چالش‌های اساسی صنایع مختلف از جمله نفت، گاز، پتروشیمی، حمل‌ونقل، زیرساخت و ساختمان به شمار می‌رود. خوردگی نه تنها منجر به تحمیل هزینه‌های هنگفت تعمیر و نگهداری می‌شود، بلکه می‌تواند ایمنی سازه‌ها و تجهیزات را به طور جدی به مخاطره اندازد. بر اساس گزارش انجمن ملی مهندسان خوردگی، هزینه‌های مستقیم ناشی از خوردگی در سطح جهان حدود ۲/۵ تریلیون دلار برآورد شده است که معادل ۳-۴ درصد تولید ناخالص داخلی کشورهای صنعتی است (کوچ^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). در این میان، استفاده از پوشش‌های ضدخوردگی به عنوان مؤثرترین و رایج‌ترین روش کنترل خوردگی شناخته می‌شود که حدود ۶۰ درصد از کل روش‌های حفاظت در برابر خوردگی را به خود اختصاص می‌دهد (سورسن^۲ و همکاران، ۲۰۰۹).

با این حال، اثربخشی پوشش‌های ضدخوردگی به شدت تابع شرایط محیطی، کیفیت اجرا و رعایت استانداردهای مرتبط است. پژوهش‌ها نشان داده است که بیش از ۷۵ درصد خرابی‌های زودهنگام پوشش‌ها به دلیل آماده‌سازی نامناسب سطح، رعایت نکردن شرایط محیطی حین اجرا و انتخاب نادرست سیستم پوشش متناسب با محیط رخ می‌دهد (مومبر^۳، ۲۰۱۸). این موضوع در کشوری مانند ایران با تنوع اقلیمی بسیار بالا از اهمیت مضاعفی برخوردار است. ایران دارای اقلیم‌های متنوعی از جمله مناطق ساحلی بسیار خورنده در جنوب (خلیج فارس و دریای عمان) با رطوبت بالا و غلظت زیاد نمک، مناطق مرطوب شمال (دریای خزر) با رطوبت نسبی بالا و تابش فراابنفش شدید، مناطق صنعتی با آلاینده‌های گوگردی و نیتروژنی، و مناطق سردسیر کوهستانی با چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن متعدد است (اشرافی^۴ و همکاران، ۲۰۱۵؛ کرباسی^۵ و همکاران، ۲۰۲۱).

¹ Koch

² Sørensen

³ Momber

⁴ Ashrafi

⁵ Karbasi

استانداردهای بین‌المللی متعددی در حوزه خوردگی و پوشش تدوین شده‌اند که مهم‌ترین آنها شامل خانواده استانداردهای ایزو-۱۲۹۴۴ برای حفاظت از سازه‌های فولادی با سیستم‌های پوشش، ایزو-۹۲۲۳ برای طبقه‌بندی خوردگی جو، و خانواده استانداردهای ایزو-۸۵۰۱ تا ایزو-۸۵۰۴ برای آماده‌سازی سطح پیش از اعمال پوشش می‌باشند (ایزو، ۲۰۰۷؛ ایزو، ۲۰۱۲؛ ایزو، ۲۰۱۷). با این حال، یکی از چالش‌های اساسی در کشورهای در حال توسعه، شکاف بین استانداردهای بین‌المللی و قابلیت اجرایی آنها در شرایط بومی است. مطالعات نشان داده است که تدوین صرف استاندارد بدون توجه به زیرساخت‌های فنی و انسانی و شرایط اقلیمی خاص هر منطقه، نمی‌تواند تضمین‌کننده کیفیت و دوام پوشش‌ها باشد (اسدی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹).

برای این منظور، مفهوم استانداردسازی چندلایه و اقلیم‌محور می‌تواند راهگشا باشد. استانداردسازی اقلیم‌محور به معنای تدوین الزامات و دستورالعمل‌هایی است که در آنها پارامترهای محیطی خاص هر منطقه (مانند میزان نمک، رطوبت، دما، تابش اشعه فرابنفش و آلاینده‌های صنعتی) به عنوان متغیرهای کلیدی در فرآیند انتخاب، اجرا و کنترل کیفیت پوشش‌ها لحاظ می‌شوند (موسوی^۲ و همکاران، ۲۰۱۹؛ موریسیلو^۳ و همکاران، ۲۰۱۹). به بیان دیگر، به جای تجویز یک سیستم پوشش واحد برای کل کشور، باید بر اساس پهنه‌بندی خوردگی، سیستم‌های پوشش متناسب با هر اقلیم تعریف شود.

علاوه بر جنبه‌های فنی، نظام استانداردسازی نیازمند زیرساخت‌های نهادی و انسانی نیز می‌باشد. تأیید صلاحیت پیمانکاران، آزمایشگاه‌ها و بازرسان بر اساس استانداردهایی مانند ایزو-۳۸۳۴ برای جوشکاری و ایزو-۹۰۰۱ برای سیستم‌های مدیریت کیفیت، از ارکان اصلی اطمینان از انطباق با استانداردها است (ایزو، ۲۰۲۱). متأسفانه در بسیاری از پروژه‌های داخلی، نظام ارزیابی انطباق به درستی عمل نمی‌کند و این مسئله منجر به اجرای پوشش‌های نامرغوب و تحمیل هزینه‌های مضاعف می‌شود.

با توجه به آنچه بیان شد، به نظر می‌رسد تدوین یک چارچوب استانداردسازی بومی و چندلایه که هم شرایط اقلیمی متنوع ایران را پوشش دهد و هم نظام ارزیابی انطباق و تأیید صلاحیت را

¹ Asadi

² Mousavi

³ Morcillo

در بر گیرد، ضرورتی انکارناپذیر دارد. این ضرورت زمانی دوچندان می‌شود که بدانیم ایران با پهنه‌بندی اقلیمی شامل مناطق ساحلی بسیار خورنده (خلیج فارس و دریای عمان)، مناطق مرطوب با تابش فرابنفش شدید (دریای خزر)، مناطق صنعتی با آلاینده‌های گوگردی و نیتروژنی، و مناطق سردسیر کوهستانی با چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن متعدد، یکی از متنوع‌ترین اقلیم‌های جهان را داراست و این تنوع، امکان استفاده از یک نسخه واحد برای تمام مناطق را به کلی منتفی می‌سازد. از سوی دیگر، شکاف عمیقی بین استانداردهای بین‌المللی موجود و قابلیت اجرایی آنها در شرایط بومی ایران وجود دارد؛ به گونه‌ای که بسیاری از استانداردهای ملی صرفاً ترجمه‌ای از منابع خارجی بوده و کمتر به زیرساخت‌های فنی و انسانی و الزامات خاص هر اقلیم توجه داشته‌اند. همچنین نظام ارزیابی انطباق در پروژه‌های داخلی عمدتاً بر تأیید صلاحیت‌های عمومی متمرکز است و شایستگی‌های تخصصی مرتبط با شرایط محیطی خاص هر منطقه در آن لحاظ نمی‌شود. از چنین چارچوبی می‌توان به عنوان مبنایی برای تدوین استانداردهای ملی، دستورالعمل‌های اجرایی و برنامه‌های آموزشی مود استفاده کرد.

بنابراین، پژوهش حاضر با هدف تدوین چارچوب استانداردسازی چندلایه اقلیم‌محور برای پوشش‌های ضدخوردگی در ایران انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، از رویکرد فراترکیب به منظور شناسایی و دسته‌بندی مؤلفه‌های مؤثر بر استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی استفاده شده و سپس مدل مفهومی حاصل با استفاده از روش مدل‌سازی معادلات ساختاری و نرم‌افزار SmartPLS اعتبارسنجی شده است. سوال اصلی پژوهش این است که مؤلفه‌های کلیدی استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی در اقلیم‌های مختلف ایران کدامند و این مؤلفه‌ها چه رابطه‌ای با یکدیگر دارند؟ نتایج این پژوهش می‌تولند به بهبود کیفیت، کاهش هزینه‌های خوردگی و افزایش ایمنی سازه‌ها در صنایع مختلف کشور کمک شایانی نماید.

۲ روش پژوهش

۲-۱- نوع پژوهش و رویکرد کلی

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی-توسعه‌ای و از نظر ماهیت و روش، آمیخته (کمی-کیفی) از نوع اکتشافی متوالی است. انتخاب رویکرد آمیخته به این دلیل است که پژوهش نیازمند استخراج مؤلفه‌ها از ادبیات موضوع و استانداردهای معتبر بین‌المللی در مرحله کیفی و سپس اعتبارسنجی و اولویت‌بندی آنها با استفاده از روش‌های کمی در مرحله بعد است (سرسول و

کلارک^۱، ۲۰۱۷). به عبارت دیگر، این پژوهش در دو فاز اصلی طراحی شده است: فاز کیفی شامل انجام فراترکیب^۲ برای شناسایی و دسته‌بندی مؤلفه‌های استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی و فاز کمی شامل طراحی و توزیع پرسشنامه و سپس تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری و نرم‌افزار SmartPLS می‌باشد.

۲-۲- فاز اول: فراترکیب (مرور نظام‌مند و ترکیب پژوهش‌های پیشین)

فراترکیب به عنوان یکی از روش‌های فراترکیب کیفی، امکان ترکیب یافته‌های پژوهش‌های کیفی و کمی متعدد را برای دستیابی به یک مدل یا چارچوب یکپارچه فراهم می‌کند (سندلوسکی و باروسو^۳، ۲۰۰۷). در این پژوهش، از رویکرد هفت مرحله‌ای سندلوسکی و باروسو استفاده شده است. در مرحله اول، سوال پژوهش به این صورت تنظیم شد که مؤلفه‌های کلیدی استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی در اقلیم‌های مختلف ایران کدامند و چه رابطه‌ای با یکدیگر دارند. در مرحله دوم، جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های معتبر ScienceDirect، Scopus، Web of Science، Google Scholar و SID انجام شد. کلیدواژه‌های مورد استفاده در جست‌وجو به دو زبان فارسی و انگلیسی شامل «Standardization، Corrosion protection coating»، «Quality control»، «Climate»، «Surface preparation»، «Conformity assessment» و معادل‌های فارسی آنها بود. در مرحله سوم، کیفیت مقالات یافت شده با استفاده از بازبینی برنامه مهارت‌های ارزیابی بحرانی^۴ ارزیابی شد. معیارهای ورود به مطالعه شامل مقالات منتشر شده در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۶ (با اولویت مقالات ۲۰۱۵ به بعد)، مقالات مرتبط با خوردگی، پوشش‌های ضدخوردگی، استانداردسازی و کنترل کیفیت، مقالات منتشر شده در مجلات معتبر با سیستم داوری هم‌تراز و همچنین استانداردهای بین‌المللی معتبر (NACE، ASTM، ISO) بود. در ابتدای فرآیند جست‌وجو محقق مشخص می‌کند آیا متون با اهداف پژوهش متناسب است یا خیر و به این منظور، مجموعه مطالعات منتخب چندین بار بازبینی می‌شوند و در هر مرحله مقالات و

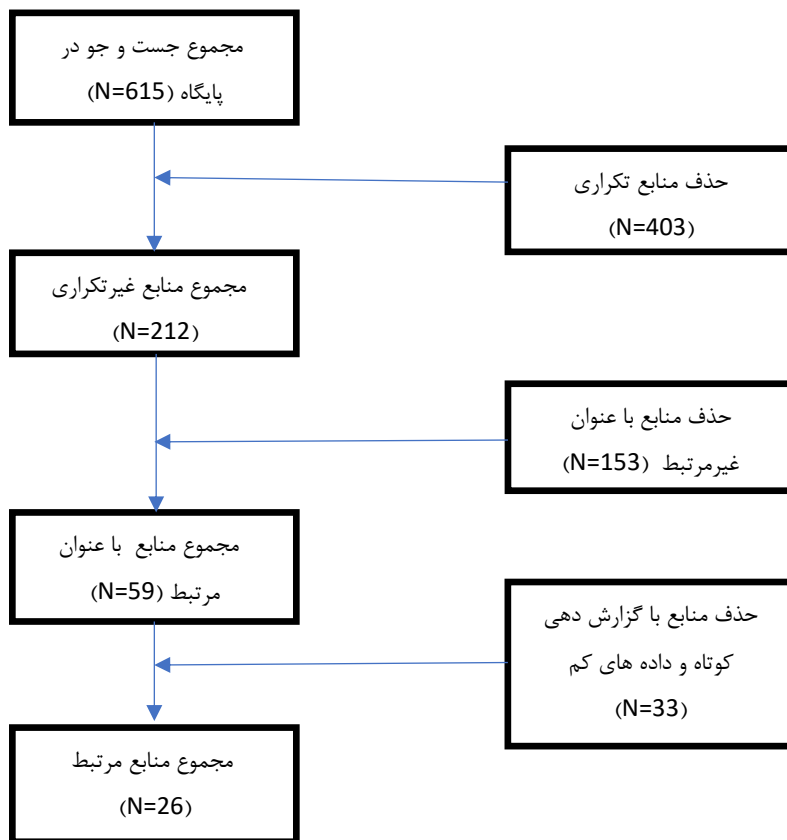
¹ Creswell & Clark

² Meta-Synthesis

³ Sandelowski & Barros

⁴ Critical Appraisal Skills Programme (CASP)

متونی که با موضوع همخوانی ندارند حذف می‌شوند. شکل ۱ مربوط به مراحل و نحوه حذف مقالات است.



شکل ۱. فرآیند بازبینی برای انتخاب منابع نهایی

در نهایت ۲۶ منبع مرتبط، بعد از مراحل طی شده در شکل ۱ به دست آمده است. این ۲۶ منبع شامل ۱۴ مقاله و ۱۲ استاندارد است.

در مرحله چهارم، استخراج داده‌ها به صورت استخراج کدهای اولیه از مقالات و استانداردهای منتخب انجام شد. در مرحله پنجم، تحلیل و ترکیب یافته‌ها با استفاده از روش کدگذاری باز، محوری و انتخابی انجام شد. در مرحله ششم، کنترل کیفیت با بررسی همسانی درونی کدها

توسط دو کدگذار مستقل انجام و میزان توافق بین کدگذاران ۸۷ درصد محاسبه شد. در نهایت در مرحله هفتم، یافته‌ها در قالب مدل مفهومی و دسته‌بندی مؤلفه‌ها ارائه شد.

در فرآیند کدگذاری باز، از مقالات و استانداردهای معتبر، ۳۰ کد اولیه استخراج شد که شامل مفاهیمی مانند طبقه‌بندی خوردگی جو بر اساس نرخ خوردگی سالیانه، تعیین زمان ترشدگی به عنوان پارامتر اصلی خوردگی جوی، آلاینده‌های کلیدی (دی‌اکسید گوگرد و شوری هوا)، طبقه‌بندی محیط‌های دریایی، محیط فراساحلی با بالاترین سطح خوردگی، محیط صنعتی و تأثیر آن بر تخریب پوشش، اقلیم گرم و مرطوب و اثر همزمان اشعه فرابنفش و رطوبت بالا بر پوشش‌های پلی‌اورتان، فرآیند گام‌به‌گام انتخاب سیستم پوشش، سطوح دوام سیستم پوشش، الزامات سیستم پوشش برای محیط‌های Q4 و Q5، پوشش‌های زیر عایق، پوشش‌های هیبریدی برای مناطق گرم و مرطوب ساحلی، تأثیر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن در اقلیم سردسیر، آزمون‌های چسبندگی به روش Pull-off و Cross-cut، آزمون افشانه کردن نمک، آزمون چرخه‌ای برای محیط فراساحلی، آزمون میعان رطوبت، آزمون غوطه‌وری در آب، آزمون مقاومت به نفوذ یون کلرید، اندازه‌گیری ضخامت فیلم خشک و تر، درجات آماده‌سازی سطح Sa2.5 و Sa3، مشخصات پروفیل سطح پس از تمیزکاری با ماسه^۱، شرایط محیطی مجاز حین اعمال پوشش، الزامات مربوط به نمک‌های محلول سطح، وجود گواهی‌نامه تأیید صلاحیت پیمانکار، سیستم خبره برای انتخاب سیستم پوشش، و ارزیابی درجه خوردگی و تورم پوشش مطابق با استانداردهای بین‌المللی بود.

سپس در مرحله کدگذاری محوری، این ۳۰ کد اولیه در پنج دسته یا محور اصلی قرار گرفتند: دسته اول «طبقه‌بندی اقلیم و خوردگی محیط» شامل هفت کد (Q1 تا Q7)، دسته دوم «استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش» شامل هفت کد (Q8 تا Q14)، دسته سوم «آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت» شامل هشت کد (Q15 تا Q22)، دسته چهارم «آماده‌سازی سطح و اجرا» شامل پنج کد (Q23 تا Q27)، و دسته پنجم «نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق» شامل سه کد (Q28 تا Q30). در نهایت در مرحله کدگذاری انتخابی، مقوله هسته «چارچوب استانداردسازی چندلایه اقلیم‌محور برای پوشش‌های ضدخوردگی» به عنوان مقوله مرکزی تعیین شد.

¹ sandblast

۳-۲- فاز دوم: مدل‌سازی معادلات ساختاری با SmartPLS

پس از استخراج مؤلفه‌ها و طراحی مدل مفهومی در فاز کیفی، برای اعتبارسنجی مدل از روش مدل‌سازی معادلات ساختاری با رویکرد حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) استفاده شد. انتخاب روش PLS-SEM به دلیل ماهیت کاربردی و پیش‌بینی‌کننده پژوهش، بی‌نیازی از مفروضات نرمال بودن داده‌ها، توانایی کار با نمونه‌های به نسبت کوچک، و قابلیت مدل‌سازی همزمان روابط بین متغیرهای پنهان و آشکار انجام شد (هایر^۱ و همکاران، ۲۰۱۹).

جامعه آماری این پژوهش شامل متخصصین و خبرگان حوزه خوردگی و پوشش در ایران است. با توجه به ماهیت تخصصی پژوهش و نیاز به دانش و تجربه کافی در حوزه خوردگی، از روش نمونه‌گیری هدفمند (قضاوتی) استفاده شد. ملاک‌های ورود به جامعه نمونه شامل (۱) کمینه مدرک کارشناسی ارشد در رشته‌های مهندسی مواد، شیمی، نفت، مکانیک یا عمران، (۲) کمینه ۵ سال سابقه کار مرتبط با خوردگی و پوشش در صنعت یا دانشگاه، (۳) اشتغال در یکی از حوزه‌های تخصصی شامل اساتید دانشگاه (هیئت علمی با گرایش خوردگی)، مهندسان صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، فولاد و خودروسازی، یا بازرسان و ناظران فنی دارای گواهینامه‌های بین‌المللی (مانند NACE، ISO و FROSIO)، (۴) آشنایی کمینه با استانداردهای ایزو-۲۹۴۴، ایزو-۹۲۲۳، ایزو-۸۵۰۱ و ای.اس.تی.ام-بی-۱۱۷، و (۵) اعلام تمایل کتبی برای مشارکت در پژوهش بود.

برای تعیین حجم نمونه، از قاعده ده برابر بیشینه تعداد مسیرهای ورودی به یک سازه استفاده شد. با توجه به اینکه بیشترین تعداد مسیرهای ورودی به سازه TST برابر با ۳ مسیر (از ENV و DES) است، کمینه حجم نمونه مورد نیاز ۳۰ نفر برآورد شد. با این حال، برای افزایش پایایی و تعمیم‌پذیری، از ۱۲۰ تن از خبرگان شناسایی‌شده از طریق جست‌وجو در پایگاه‌های علمی (Google Scholar، SID، ResearchGate) و بررسی سوابق اجرایی در صنایع بزرگ کشور، دعوت بعمل آمد. از میان ۱۲۰ تن، ۸۸ تن تمایل خود را برای مشارکت اعلام کردند (نرخ پاسخ‌دهی حدود ۸۲ درصد) که پس از اعمال ملاک‌های ورود، ۷۲ تن به‌عنوان نمونه نهایی انتخاب شدند.

¹ Hair

پراکندگی جغرافیایی خبرگان به گونه‌ای بود که تمام مناطق اقلیمی اصلی ایران (شمال مرطوب، جنوب ساحلی با خورندگی بالا، مناطق صنعتی مرکزی، و مناطق سردسیر کوهستانی) را پوشش دهد. خبرگان از استان‌های خوزستان (۱۳ تن)، بوشهر (۸ تن)، هرمزگان (۶ تن)، مازندران (۷ تن)، گیلان (۴ تن)، تهران (۱۵ تن)، اصفهان (۸ تن)، فارس (۴ تن)، آذربایجان شرقی (۳ تن)، کردستان (۲ تن) و خراسان رضوی (۲ تن) بودند. همچنین ترکیب شغلی خبرگان شامل ۲۵ استاد دانشگاه (۳۴/۷ درصد)، ۳۰ مهندس صنعت (۴۱/۶ درصد) و ۱۷ بازرس و ناظر فنی دارای گواهینامه‌های بین‌المللی (۲۳/۷ درصد) بود.

برای اطمینان از کفایت حجم نمونه، افزون بر قاعده ده برابر پیشنهادی هایر و همکاران (۲۰۱۷)، تحلیل توان آماری پس‌وقوعی^۱ با استفاده از نرم‌افزار GPower نسخه ۳/۱ انجام شد. این تحلیل با پارامترهای آزمون F-test از نوع Linear multiple regression: Fixed model، R^2 deviation from zero، اندازه اثر متوسط ($f^2=0.15$) بر اساس معیار کوهن (۱۹۸۸)، سطح معنی‌داری ۰/۰۵، بیشینه تعداد پیش‌بینی‌کننده‌ها برابر با ۳ (برابر با بیشترین تعداد مسیرهای ورودی به سازه TST)، و حجم نمونه ۷۲ تن انجام شد. نتایج تحلیل نشان داد که توان آماری برابر با ۰/۹۸۹ (حدود ۹۹ درصد) محاسبه شده است که به‌طور قابل توجهی بیشتر از کمینه مطلوب ۰/۸ (۸۰ درصد) در پژوهش‌های علوم اجتماعی و رفتاری است. این یافته نشان‌دهنده کفایت بسیار خوب حجم نمونه برای شناسایی صحیح اثرات واقعی در مدل و کاهش احتمال خطای نوع دوم به حدود ۱ درصد است.

ابزار گردآوری داده‌ها در این پژوهش پرسشنامه‌ای بود که در چهار بخش طراحی شده است. بخش اول شامل اطلاعات جمعیت‌شناختی (جنسیت، سن، مدرک تحصیلی، سابقه کار، حوزه فعالیت، میزان آشنایی با استانداردها) بود. بخش دوم شامل پنج سوال عمومی در مورد وضعیت استانداردسازی در ایران با طیف لیکرت ۵ درجه‌ای (از کاملاً مخالف تا کاملاً موافق) بود. بخش سوم شامل ۳۰ گویه برگرفته از کدهای استخراج شده در فاز فراترکیب بود که هر گویه بر اساس اهمیت در فرآیند استانداردسازی با طیف لیکرت ۵ درجه‌ای (از بسیار کم‌اهمیت تا بسیار مهم) سنجیده شد. بخش چهارم نیز شامل چهار سوال باز برای دریافت نظرات تکمیلی خبرگان بود.

¹ Post-Hoc Power Analysis

برای سنجش روایی و پایایی ابزار، ابتدا روایی محتوایی پرسشنامه با ارائه آن به پنج تن از اساتید و خبرگان حوزه خوردگی و استاندارد تأیید شد. شاخص روایی محتوایی^۱ برای تمام گویه‌ها بالاتر از ۰.۷۹ محاسبه شد که نشان‌دهنده روایی محتوایی مطلوب است (لاوش، ۱۹۷۵). برای سنجش پایایی پرسشنامه از روش آلفای کرونباخ استفاده شد. مقدار آلفای کرونباخ برای کل پرسشنامه برابر با ۰.۹۲۳ و برای هر یک از سازه‌ها شامل شرایط اقلیمی (۰.۸۹۱)، طراحی سیستم پوشش (۰.۸۷۴)، آزمون‌های کنترل کیفیت (۰.۹۰۵)، آماده‌سازی سطح و اجرا (۰.۸۶۲)، نظام استانداردسازی (۰.۸۴۱) و چارچوب نهایی (۰.۸۷۷) محاسبه شد. مقادیر آلفای کرونباخ بزرگتر از ۰.۷ برای تمام سازه‌ها نشان‌دهنده پایایی مناسب ابزار است (نونالی و برنستین^۲، ۱۹۹۴).

با توجه به استفاده از پرسشنامه‌های خودگزارشی برای جمع‌آوری داده‌ها، احتمال بروز سوگیری روش مشترک^۳ وجود دارد که می‌تولند به برآورد اغراق‌آمیز روابط بین سازه‌ها منجر شود (پودساکوف و همکاران^۴، ۲۰۰۳). به‌منظور تشخیص وجود یا نبود این سوگیری، از آزمون تک‌عاملی هارمن^۵ استفاده شد (پودساکوف و اورگان^۶، ۱۹۸۶). برای این منظور، کلیه ۳۰ گویه پرسشنامه وارد یک تحلیل عاملی اکتشافی با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی شدند و بدون تعیین تعداد عوامل ثابت، عوامل با مقدار ویژه بزرگتر از ۱ استخراج شدند. جدول ۱ نشان داد که اولین عامل استخراج‌شده، تنها ۳۴/۶۲ درصد از کل واریانس (۷۲/۱۸ درصد) را تبیین می‌کند. با توجه به اینکه این مقدار به‌طور قابل‌توجهی کمتر از آستانه بحرانی ۵۰ درصد است، می‌توان نتیجه گرفت که سوگیری روش مشترک تهدیدی جدی برای روایی پژوهش محسوب نمی‌شود و داده‌های جمع‌آوری‌شده از کیفیت مناسبی برای تحلیل مدل ساختاری برخوردار هستند.

¹ Content Validity Index (CVI)

² Nunnally & Bernstein

³ Common Method Bias

⁴ Podsakoff et al.

⁵ Harman's Single Factor Test

⁶ Podsakoff & Organ

جدول ۱. نتایج آزمون تک‌عاملی هارمن برای بررسی سوگیری روش مشترک

معیار پذیرش	مقدار	شاخص
-	۷ عامل	تعداد عوامل استخراج شده
کمتر از ۵۰٪	۳۴,۶۲٪	واریانس تبیین شده توسط اولین عامل
-	۷۲,۱۸٪	واریانس کل تبیین شده
کمتر از ۵۰٪	۴۷,۹۵٪	نسبت واریانس اولین عامل به کل واریانس
-	سوگیری روش مشترک وجود ندارد	نتیجه‌گیری

تحلیل داده‌های پژوهش در دو سطح انجام شد. در سطح اول، آمار توصیفی شامل محاسبه میانگین، انحراف معیار، فراوانی و درصد برای داده‌های جمعیت‌شناختی با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. در سطح دوم، آمار استنباطی با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری و نرم‌افزار SmartPLS نسخه ۴ انجام شد. در این مرحله، ابتدا مدل اندازه‌گیری^۱ شامل بررسی بارهای عاملی، پایایی ترکیبی^۲، میانگین واریانس استخراج شده^۳ و ماتریس HTMT برای تشخیص روایی و اگر ارزیابی شد. سپس مدل ساختاری^۴ شامل بررسی ضرایب مسیر (β)، مقادیر t -value، سطوح معناداری (p -value) و ضریب تعیین (R^2) تحلیل شدند. برای تأیید معناداری مسیرها، از روش بوت‌استرپ^۵ با ۵۰۰۰ زیرنمونه استفاده شد.

شایان ذکر است که اگرچه روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) معمولاً برای اولویت‌بندی گزینه‌ها در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره کاربرد دارد، اما در پژوهش حاضر به دلایل زیر از روش PLS-SEM استفاده شد: (۱) هدف اصلی پژوهش، بررسی روابط علی و شدت تأثیر مؤلفه‌ها بر یکدیگر است که PLS-SEM با ارائه ضرایب مسیر (β) این امکان را فراهم می‌کند؛ (۲) پژوهش شامل شش فرضیه علی است که نیازمند آزمون آماری معناداری هستند و AHP فاقد چنین قابلیت‌هایی است؛ (۳) روش PLS-SEM برای مدل‌های با پیچیدگی متوسط و حجم نمونه ۷۲ تن بسیار

¹ Outer Model² Combined Reliability (CR)³ Average Variance Extraction (AVE)⁴ Inner Model⁵ Bootstrap

مناسب بوده و با ماهیت اکتشافی-تأییدی پژوهش هماهنگی کامل دارد؛ (۴) در عین حال، ضرایب مسیر به‌دست‌آمده در این روش می‌تواند به‌عنوان نوعی اولویت‌بندی وزنی تلقی شود.

۳ یافته‌های پژوهش

۳-۱- کدگذاری باز

در مرحله نخست تحلیل داده‌های کیفی حاصل از مرور نظام‌مند منابع و استانداردهای معتبر بین‌المللی، فرآیند کدگذاری باز انجام شد. کدگذاری باز به معنای شناسایی مفاهیم اولیه و اولیه‌ترین مؤلفه‌های موجود در متون و استانداردهای حوزه خوردگی و پوشش بود که امکان داشت در تدوین چارچوب استانداردسازی چندلایه اقلیم-محور مؤثر واقع شوند. در این مرحله، پژوهشگر با مطالعه عمیق و دقیق مقالات منتخب و استانداردهای بین‌المللی نظیر سری ایزو-۹۲۲۳، ایزو-۱۲۹۴۴، ایزو-۸۵۰۱، ای.اس.تی.ام-بی-۱۱۷ و NACE SP0188، به استخراج جملات، عبارات و مفاهیم معنادار مرتبط با استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی اقدام نمود. هر مفهوم استخراج شده به عنوان یک کد اولیه در نظر گرفته شد و نام مناسبی که بیانگر محتوای آن مفهوم باشد، به آن اختصاص یافت. در مجموع، از میان ۲۶ منبع اولیه شامل مقالات علمی، استانداردها و گزارش‌های فنی معتبر، تعداد ۳۰ کد اولیه استخراج شد (جدول ۲). این کدها طیف گسترده‌ای از مفاهیم را پوشش می‌دادند که از آن جمله می‌توان به پارامترهای اقلیمی مؤثر بر خوردگی مانند طبقه‌بندی خوردندگی جو، زمان ترشدگی، آلاینده‌های گوگردی و کلریدها، شاخص‌های طراحی سیستم پوشش نظیر فرآیند گام‌به‌گام انتخاب پوشش و سطوح دوام، آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت از جمله آزمون‌های چسبندگی، افشانه کردن نمک و چرخه‌ای، الزامات آماده‌سازی سطح شامل درجات تمیزکاری با ماسه و پروفیل سطح، شرایط محیطی مجاز حین اجرا، و در نهایت مؤلفه‌های نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق مانند تأیید صلاحیت پیمانکاران و سیستم‌های خبره اشاره نمود.

لازم به ذکر است که به منظور تأکید بر به‌روزر بودن و نوآوری شاخص‌های استخراج‌شده در جدول ۲، فرآیند مرور نظام‌مند با اولویت‌بندی منابع منتشرشده از سال ۲۰۱۵ به بعد انجام شد که از مجموع ۲۶ منبع نهایی، بیشتر آنها متعلق به بازه زمانی بعد از سال ۲۰۱۲ هستند. از

شاخص‌های کلیدی و به‌نسبت جدید این پژوهش می‌توان به «تعیین زمان ترشدگی»^۱ به‌عنوان پارامتر اصلی خوردگی جوی» (بدینگتون^۲ و همکاران، ۲۰۲۴)، «پوشش‌های هیبریدی آلی-سرامیک برای مناطق گرم و مرطوب ساحلی» (ساجی^۳، ۲۰۲۰)، «آزمون مقاومت به نفوذ یون کلرید در پوشش‌های آلی» (لیو^۴ و همکاران، ۲۰۲۲)، و «سیستم خبره مبتنی بر منطق فازی و AHP برای انتخاب سیستم پوشش» (اسدی و همکاران، ۲۰۱۹) اشاره کرد که بیانگر تطابق کامل مؤلفه‌های مدل با آخرین دستاوردهای علمی و فنی روز دنیا در حوزه استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی است. به این ترتیب، کدهای استخراج‌شده نه‌تنها از تکرار صرف استانداردهای پیشین اجتناب نموده، بلکه با در نظر گرفتن نیازهای بومی اقلیم‌های متنوع ایران و فناوری‌های نوین پوشش، گامی به‌روز و کاربردی در جهت تدوین چارچوب ملی محسوب می‌شوند.

میزان توافق بین کدگذاران در پایان فرآیند معادل ۸۷ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده پایایی قابل قبول کدگذاری است. کدهای استخراج‌شده در این مرحله، مبنای ورود به مرحله بعد یعنی کدگذاری محوری قرار گرفتند تا بر اساس شباهت‌های مفهومی در دسته‌های معنادارتری سازماندهی شوند.

جدول ۲. کدگذاری باز

کد	کد اولیه (مفهوم استخراج شده)	منبع
۱	طبقه‌بندی خوردگی جو بر اساس نرخ خوردگی سالیانه (C1 تا CX)	ISO 9223:2012.
۲	تعیین زمان ترشدگی به عنوان پارامتر اصلی خوردگی جوی	Bodington et al., 2024.
۳	آلاینده‌های کلیدی: دی‌اکسید گوگرد (SO ₂) و شوری هوا (کلریدها)	Al-Borno et al., 2026.

¹ Time of Wetness (TOW)

² Bodington et al.

³ Saji

⁴ Liu et al.

۴	طبقه‌بندی محیط‌های دریایی ^۱ برای سازه‌های غوطه‌ور در آب دریا	ISO 12944-2:2017.
۵	محیط فراساحلی ^۲ با بالاترین سطح خوردگی (CX)	ISO 12944-9:2018.
۶	محیط صنعتی (حاوی SO ₂ و NO _x) و تأثیر آن بر تخریب پوشش	Morcillo et al., 2019.
۷	اقلیم گرم و مرطوب (شمال ایران) و اثر همزمان اشعه فرابنفش و رطوبت بالا بر پوشش‌های پلی‌اورتان	Mousavi et al., 2019.
۸	فرآیند گام‌به‌گام انتخاب سیستم پوشش: تعیین محیط ← تعیین دوام ← انتخاب سیستم ← محیط آزمایشگاهی	Kunce, 2023.
۹	سطوح دوام ^۳ سیستم پوشش: کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد	Han et al., 2026.
۱۰	الزامات سیستم پوشش برای محیط C5 (بسیار خورنده صنعتی و دریایی) بر اساس جدول C.5 استاندارد ایزو-۵-۱۲۹۴۴	ISO 12944-5:2019.
۱۱	سیستم پوشش مناسب برای محیط C4 (خورنده صنعتی و ساحلی)	ISO 12944-5:2019.
۱۲	پوشش‌های زیر عایق (CUI) و معیارهای پذیرش برای محدوده دمایی ۴۵- تا ۲۰۴+ درجه سانتی‌گراد	ISO/DIS 19277-1.
۱۳	پوشش‌های هیبریدی (آلی-سرامیک) برای مناطق گرم و مرطوب ساحلی (مانند خلیج فارس)	Saji, 2020.
۱۴	تأثیر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن ^۴ در اقلیم سردسیر (مناطق کوهستانی ایران)	Karbasi et al., 2021.
۱۵	آزمون چسبندگی به روش Pull-off (ASTM D4541 / ISO 4624)	ASTM D4541-22.

¹ Immersion category Im4

² Offshore

³ Durability

⁴ Freeze-Thaw

۱۶	آزمون چسبندگی به روش تیغه متقاطع ^۱ با معیارهای پذیرش ۰ تا ۵	ISO 16276-2:2025.
۱۷	آزمون سالت اسپری ^۲ بر اساس ای.اس.تی.ام-بی-۱۱۷ برای شبیه‌سازی محیط ساحلی	ASTM B117-19.
۱۸	آزمون چرخه‌ای بر اساس ایزو-۹-۱۲۹۴۴ برای محیط فراساحلی (تلفیق نمک + اشعه فرابنفش + یخ‌زدن)	ISO 12944-9:2018.
۱۹	آزمون میعان رطوبت ^۳ مطابق ایزو-۱-۶۲۷۰	ISO 6270-1:2017.
۲۰	آزمون غوطه‌وری در آب ^۴ بر اساس ایزو-۲-۲۸۱۲	ISO 2812-2:2018.
۲۱	آزمون مقاومت به نفوذ یون کلرید در پوشش‌های آلی	Liu Y, et al., 2022.
۲۲	اندازه‌گیری ضخامت فیلم خشک (DFT) و فیلم تر (WFT) مطابق ایزو-۱۹۸۴۰	ISO 19840:2012.
۲۳	درجه آماده‌سازی سطح Sa2.5 (تمیزکاری با ماسه، بسیار نزدیک به فلز سفید)	ISO 8501-1:2007.
۲۴	درجه آماده‌سازی سطح Sa3 (تمیزکاری با ماسه تا فلز سفید خالص) برای محیط‌های بسیار خورنده	ISO 8501-1:2007.
۲۵	مشخصات پروفیل سطح ^۵ پس از تمیزکاری با ماسه	ISO 8503-2:2012.
۲۶	شرایط محیطی مجاز حین اعمال پوشش: دما (کمینه ۳ درجه بالای نقطه شبنم)، رطوبت نسبی (>۸۵٪)	NACE SP0188-2018.

¹ Cross-cut² Salt spray³ Condensation test⁴ Immersion test⁵ Roughness

۲۷	الزامات مربوط به نمک‌های محلول سطح ^۱ پیش از اعمال پوشش	ISO 8502-9:2020.
۲۸	وجود گواهی‌نامه تأیید صلاحیت پیمانکار (ایزو-۹۰۰۱ و یازو-۳۸۳۴ برای جوشکاری و پوشش)	ISO 3834-1:2021.
۲۹	سیستم خبره ^۲ برای انتخاب سیستم پوشش مناسب با استفاده از منطق فازی و AHP	Asadi et al., 2019.
۳۰	ارزیابی درجه خوردگی و تورم پوشش ^۳ مطابق ایزو-۴۶۲۸ (سری ۱ تا ۸)	ISO 4628-1:2016.

۳-۲- کدگذار محوری

پس از اتمام مرحله کدگذاری باز و استخراج ۳۰ کد اولیه، نوبت به مرحله کدگذاری محوری رسید. کدگذاری محوری فرآیندی است که در آن کدهای پراکنده و متعدد مرحله قبل، بر اساس شباهت‌های مفهومی، پیوندهای معنایی و ارتباطات موضوعی، در دسته‌ها یا مقوله‌های سطح بالاتر تجمیع و سازماندهی می‌شوند. هدف از این مرحله، کاهش تعداد کدها، ایجاد نظم مفهومی و شناسایی ابعاد اصلی پدیده مورد مطالعه بود. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، پژوهشگر پس از بررسی دقیق روابط بین ۳۰ کد اولیه، آنها را در پنج دسته یا محور اصلی جای داد که هر دسته بیانگر یک بُعد کلیدی از فرآیند استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی در شرایط اقلیمی مختلف ایران می‌باشد.

دسته اول با عنوان «طبقه‌بندی اقلیم و خوردگی محیط» شامل هفت کد اولیه (Q1 تا Q7) است. این کدها همگی به عواملی اشاره دارند که شدت خوردگی محیط را تعیین می‌کنند و مبنای اولیه برای هر گونه استانداردسازی به شمار می‌روند. مفاهیمی مانند طبقه‌بندی خوردگی جو بر اساس نرخ خوردگی سالیانه، زمان ترشدگی، آلاینده‌های دی‌اکسید گوگرد و کلریدها، طبقه‌بندی محیط‌های دریایی، محیط فراساحلی، محیط صنعتی و اقلیم گرم و مرطوب

¹ Soluble salts

² Expert system

³ Blistering

در این دسته قرار گرفتند. این دسته در واقع نقطه شروع هر فرآیند استانداردسازی محسوب می‌شود، زیرا تا زمانی که شرایط محیطی به درستی شناسایی و طبقه‌بندی نشود، امکان انتخاب سیستم پوشش مناسب وجود نخواهد داشت.

دسته دوم با عنوان «استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش» شامل هفت کد اولیه (Q8 تا Q14) است. این کدها فرآیند گام‌به‌گام انتخاب سیستم پوشش، تعیین سطوح دوام، الزامات سیستم پوشش برای محیط‌های Q5 و Q4، پوشش‌های زیر عایق، پوشش‌های هیبریدی برای مناطق گرم و مرطوب ساحلی و تأثیر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن در اقلیم سردسیر را پوشش می‌دهند. این دسته در واقع پل ارتباطی بین شناخت محیط و اقدام عملی برای حفاظت از سازه است و مستقیماً تحت تأثیر نتایج حاصل از دسته اول قرار می‌گیرد.

دسته سوم با عنوان «آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت» شامل هشت کد اولیه (Q15 تا Q22) است. این کدها شامل آزمون چسبندگی به روش Pull-off و Cross-cut، آزمون افشانه کردن نمک، آزمون چرخه‌ای برای محیط فراساحلی، آزمون میعان رطوبت، آزمون غوطه‌وری در آب، آزمون مقاومت به نفوذ یون کلرید و اندازه‌گیری ضخامت فیلم خشک و تر می‌باشند. این دسته از آزمون‌ها ابزارهای اصلی برای تأیید این موضوع هستند که آیا سیستم پوشش انتخاب شده و فرآیند اجرا، الزامات استاندارد را برآورده کرده است یا خیر.

دسته چهارم با عنوان «آماده‌سازی سطح و اجرا» شامل پنج کد اولیه (Q23 تا Q27) است. این کدها شامل درجات آماده‌سازی سطح Sa2.5 و Sa3، مشخصات پروفیل سطح پس از تمیزکاری با ماسه، شرایط محیطی مجاز حین اعمال پوشش و الزامات مربوط به نمک‌های محلول سطح می‌باشند. تجربه عملی نشان داده است که بیش از ۷۵ درصد خرابی‌های زود هنگام پوشش‌ها به ضعف در این دسته بازمی‌گردد، از این رو این دسته از حیث اجرایی از حساس‌ترین بخش‌های چارچوب استانداردسازی به شمار می‌رود.

دسته پنجم با عنوان «نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق» شامل سه کد اولیه (Q28 تا Q30) است. این کدها شامل وجود گواهی‌نامه تأیید صلاحیت پیمانکار، سیستم خبره برای انتخاب سیستم پوشش و ارزیابی درجه خوردگی و تورم پوشش می‌باشند. این دسته در واقع جنبه‌های نهادی و مدیریتی استانداردسازی را پوشش می‌دهد و تضمین می‌کند که استانداردها صرفاً بر روی کاغذ نمانده و در عمل نیز رعایت شوند.

در پایان مرحله کدگذاری محوری، روابط معناداری بین دسته‌های پنج‌گانه شناسایی شد که مبنای طراحی مدل مفهومی در مرحله کدگذاری انتخابی قرار گرفت. دسته اول (شرایط اقلیمی) به عنوان متغیر مستقل اولیه بر دسته دوم (انتخاب و طراحی) و دسته سوم (آزمون‌های کنترل کیفیت) تأثیرگذار است. دسته دوم نیز بر دسته سوم تأثیر می‌گذارد. در نهایت دسته سوم بر دسته چهارم (اجرا) و دسته پنجم (نظام استانداردسازی) تأثیر داشته و این دو دسته نیز در نهایت بر چارچوب نهایی استانداردسازی تأثیرگذار هستند. این الگوی روابط در قالب یک مدل شش فرضیه‌ای در بخش کدگذاری انتخابی ارائه شده است.

جدول ۳. کدگذاری مفهومی

محورها	گویه‌ها	کد اولیه (مفهوم استخراج شده)
طبقه‌بندی اقلیم و خوردگی محیط	Q1	طبقه‌بندی خوردگی جو بر اساس نرخ خوردگی سالیانه (C1 تا CX)
	Q2	تعیین زمان ترشده‌گی به عنوان پارامتر اصلی خوردگی جوی
	Q3	آلاینده‌های کلیدی: دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و شوری هوا (کلریدها)
	Q4	طبقه‌بندی محیط‌های دریایی برای سازه‌های غوطه‌ور در آب دریا
	Q5	محیط فراساحلی با بالاترین سطح خوردگی (CX)
	Q6	محیط صنعتی (حاوی SO_2 و NO_x) و تأثیر آن بر تخریب پوشش
	Q7	اقلیم گرم و مرطوب (شمال ایران) و اثر همزمان اشعه فرابنفش و رطوبت بالا بر پوشش‌های پلی‌اورتان
طراحی سیستم انتخاب و پوشش	Q8	فرآیند گام‌به‌گام انتخاب سیستم پوشش: تعیین محیط ← تعیین دوام ← انتخاب سیستم ← محیط آزمایشگاهی
	Q9	سطوح دوام سیستم پوشش: کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد

	Q10	الزامات سیستم پوشش برای محیط C5 (بسیار خورنده صنعتی و دریایی) بر اساس جدول C.5 استاندارد ایزو-۵-۱۲۹۴۴
	Q11	سیستم پوشش مناسب برای محیط C4 (خورنده صنعتی و ساحلی)
	Q12	پوشش‌های زیر عایق (CUI) و معیارهای پذیرش برای محدوده دمایی ۴۵- تا ۲۰۴+ درجه سانتی‌گراد
	Q13	پوشش‌های هیبریدی (آلی-سرامیک) برای مناطق گرم و مرطوب ساحلی (مانند خلیج فارس)
	Q14	تأثیر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن در اقلیم سردسیر (مناطق کوهستانی ایران)
آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت	Q15	آزمون چسبندگی به روش Pull-off (ASTM D4541 / ISO 4624)
	Q16	آزمون چسبندگی به روش تیغه متقاطع با معیارهای پذیرش ۰ تا ۵
	Q17	آزمون افشانه کردن نمک بر اساس ای.اس.تی.ام-بی-۱۱۷ برای شبیه‌سازی محیط ساحلی
	Q18	آزمون چرخه‌ای بر اساس ایزو-۹-۱۲۹۴۴ برای محیط فراساحلی (تلفیق نمک+ اشعه فرانفش+ یخ‌زدن)
	Q19	آزمون میعان رطوبت مطابق ایزو-۱-۶۲۷۱۰
	Q20	آزمون غوطه‌وری در آب بر اساس ایزو-۲-۲۸۱۲
	Q21	آزمون مقاومت به نفوذ یون کلرید در پوشش‌های آلی
	Q22	اندازه‌گیری ضخامت فیلم خشک (DFT) و فیلم تر (WFT) مطابق ایزو-۱۹۸۴۰
آماده‌ساز ی سطح	Q23	درجه آماده‌سازی سطح Sa2.5 (تمیزکاری با ماسه، بسیار نزدیک به فلز سفید)

	Q24	درجه آماده‌سازی سطح Sa3 (تمیزکاری با ماسه، تا فلز سفید خالص) برای محیط‌های بسیار خورنده
	Q25	مشخصات پروفیل سطح پس از تمیزکاری با ماسه
	Q26	شرایط محیطی مجاز حین اعمال پوشش: دما (کمینه ۳ درجه بالای نقطه شبنم)، رطوبت نسبی (>۸۵٪)
	Q27	الزامات مربوط به نمک‌های محلول سطح پیش از اعمال پوشش
نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق	Q28	وجود گواهینامه تأیید صلاحیت پیمانکار (ایزو-۹۰۰۱ و ایزو-۳۸۳۴ برای جوشکاری و پوشش)
	Q29	سیستم خبره برای انتخاب سیستم پوشش مناسب با استفاده از منطق فازی و AHP
	Q30	ارزیابی درجه خوردگی و تورم پوشش مطابق ایزو-۴۶۲۸ (سری ۱ تا ۸)

۳-۳- کدگذاری انتخابی

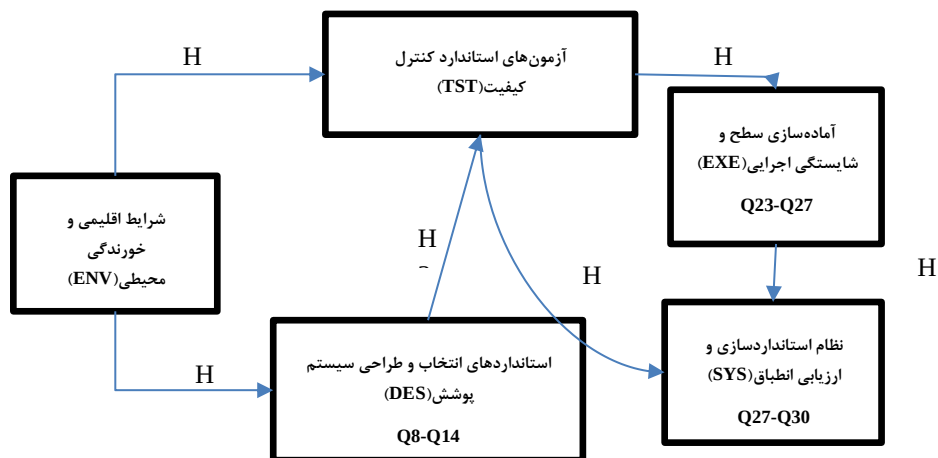
کدگذاری انتخابی آخرین و بالاترین سطح از فرآیند کدگذاری در پژوهش‌های کیفی است که در آن، پژوهشگر پس از انجام کدگذاری باز و محوری، به دنبال شناسایی یک مقوله هسته^۱ می‌گردد که بتواند تمام مقوله‌های دیگر را در بر گیرد و به سؤال اصلی پژوهش پاسخ دهد. در این مرحله، پژوهشگر با نگاه یکپارچه‌ساز به مقوله‌های پنج‌گانه حاصل از کدگذاری محوری (شرایط اقلیمی و خوردگی محیط، استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش، آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت، آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی، و نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق) توجه کرد و روابط میان آنها را در قالب یک مدل مفهومی منسجم سازماندهی نمود.

مقوله هسته‌ای که در این پژوهش به عنوان هسته مرکزی مدل شناسایی شد، «چارچوب استانداردسازی چندلایه اقلیم‌محور برای پوشش‌های ضدخوردگی در ایران» نام گرفت. انتخاب

¹ Core Category

این مقوله به عنوان مقوله هسته دلایل متعددی داشت. نخست اینکه تمام پنج مقوله محوری استخراج شده در مرحله قبل، به نحوی در راستای شکل‌دهی به این چارچوب قرار می‌گیرند و هیچ یک از آنها خارج از این چارچوب معنای کاملی پیدا نمی‌کند. دوم اینکه این مقوله به طور مستقیم به سؤال اصلی پژوهش که تدوین چارچوب استانداردسازی متناسب با اقلیم‌های مختلف ایران بود، پاسخ می‌دهد. سوم اینکه واژه «چندلایه» در عنوان این مقوله هسته، بیانگر آن است که استانداردسازی موفق پوشش‌های ضدخوردگی نمی‌تواند تک‌بعدی باشد، بلکه باید لایه‌های مختلف از شناخت محیط تا انتخاب سیستم، آزمون، اجرا و نهایتاً نظام ارزیابی انطباق را در بر گیرد. چهارم اینکه تأکید بر «اقلیم‌محور» نشان‌دهنده تنوع اقلیمی خاص ایران (ساحلی جنوب، مرطوب شمال، صنعتی، سردسیر کوهستانی و غیره) است که ضرورت بومی‌سازی استانداردهای بین‌المللی را ایجاب می‌کند.

پس از تعیین مقوله هسته، نوبت به طراحی مدل مفهومی پژوهش رسید. همانطور که در شکل ۲ مشخص است، مدل مفهومی حاصل از کدگذاری انتخابی، شامل پنج متغیر پنهان (سازه) و شش مسیر مستقیم (فرضیه) می‌باشد. در این مدل، سازه «شرایط اقلیمی و خوردندگی محیطی» (ENV) به عنوان متغیر مستقل سطح اول در نظر گرفته شده است که بر دو سازه دیگر یعنی «استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش» (DES) و «آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت» (TST) تأثیر مستقیم دارد. مسیر H1 بیانگر تأثیر ENV بر DES و مسیر H2 بیانگر تأثیر ENV بر TST است. سازه DES نیز به نوبه خود بر سازه TST تأثیر می‌گذارد که این تأثیر در قالب فرضیه H3 تعریف شده است. در ادامه، سازه TST به عنوان یک متغیر مرکزی و محوری در مدل، بر دو سازه «آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی» (EXE) و «نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق» (SYS) تأثیر دارد که به ترتیب فرضیه‌های H4 و H5 نامگذاری شده‌اند. در نهایت، هر سازه EXE به عنوان متغیر مستقل، بر سازه وابسته نهایی یعنی «نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق» (SYS) تأثیر مستقیم دارند که فرضیه‌های H6 را تشکیل می‌دهند. در مجموع، مدل مفهومی این پژوهش شامل شش فرضیه اصلی است که همگی دارای جهت مثبت و مستقیم هستند، به این معنا که افزایش یا بهبود در هر متغیر مستقل، منجر به افزایش یا بهبود در متغیر وابسته مرتبط با آن می‌شود.



شکل ۲. مدل مفهومی برای تدوین چارچوب استانداردسازی چندلایه اقلیم‌محور برای پوشش‌های ضدخوردگی در ایران

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، برای آزمون تجربی این مدل مفهومی و شش فرضیه مرتبط با آن، پرسشنامه‌ای طراحی شد که در آن برای هر یک از ۳۰ کد اولیه (گویه‌ها) سوالی متناسب با طیف لیکرت ۵ درجه‌ای تنظیم شد. این پرسشنامه در اختیار ۸۵ تن از خبرگان و متخصصان حوزه خوردگی و پوشش شامل اساتید دانشگاه، مهندسان صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، فولاد و خودروسازی و همچنین بازرسان فنی دارای گواهینامه‌های بین‌المللی قرار گرفت. پس از جمع‌آوری پرسشنامه‌ها و حذف موارد ناقص، داده‌های ۷۲ پرسشنامه با استفاده از نرم‌افزار SmartPLS نسخه ۴ تحلیل شد. نتایج این تحلیل در قالب ارزیابی مدل اندازه‌گیری و مدل ساختاری ارائه شده است که در ادامه به تفکیک گزارش می‌شود. آنچه در این مرحله حائز اهمیت است، این واقعیت است که مدل مفهومی حاصل از کدگذاری انتخابی، توانست برازش مناسبی با داده‌های میدانی داشته باشد و هفت فرضیه پژوهش نیز مورد تأیید آماری قرار گرفتند که جزئیات آن در بخش آتی ارائه خواهد شد.

جدول ۴. فرضیات تعریف شده برای مدل مفهومی

عبارت فرضیه	مسیر (Path)	شماره فرضیه
شرایط اقلیمی و خوردگی محیطی بر استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش تأثیر مثبت و معناداری دارد.	ENV → DES	H1
شرایط اقلیمی و خوردگی محیطی بر انتخاب آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت تأثیر مثبت و معناداری دارد.	ENV → TST	H2
استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش بر آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت تأثیر مثبت و معناداری دارد.	DES → TST	H3
آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت بر آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی تأثیر مثبت و معناداری دارد.	TST → EXE	H4
آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت بر نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق تأثیر مثبت و معناداری دارد.	TST → SYS	H5
آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی بر نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق تأثیر مثبت و معناداری دارد.	EXE → SYS	H6

۳-۴- معادلات ساختاری

قبل از ورود به معادلات ساختاری باید بار عاملی شاخص‌ها و همبستگی آن‌ها بررسی شود. جدول ۵ شامل بارهای عاملی برای تمام ۳۰ گویه (شاخص) مربوط به پنج سازه مدل پژوهشی است. بارهای عاملی نشان‌دهنده همبستگی هر گویه با سازه مرتبط بوده و مقادیر بالاتر از ۰/۷۰ نشان‌دهنده روایی همگرا^۱ مطلوب می‌باشند (هایر و همکاران، ۲۰۱۷).

¹ Convergent Validity

جدول ۵. بارهای عاملی و شاخص‌های روایی و پایایی سازه‌ها

سازه	گویه	بار عاملی
شرایط اقلیمی و خوردنگی محیطی (ENV)	Q1	۰/۸۷۱
	Q2	۰/۸۵۴
	Q3	۰/۸۹۲
	Q4	۰/۸۳۶
	Q5	۰/۸۴۳
	Q6	۰/۸۷۹
	Q7	۰/۸۶۵
استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش (DES)	Q8	۰/۸۴۵
	Q9	۰/۸۳۲
	Q10	۰/۸۶۳
	Q11	۰/۸۵۱
	Q12	۰/۸۷۶
	Q13	۰/۸۴۴
	Q14	۰/۸۳۸
آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت (TST)	Q15	۰/۸۴۲
	Q16	۰/۸۶۳
	Q17	۰/۸۵۱
	Q18	۰/۸۹۴
	Q19	۰/۸۳۷
	Q20	۰/۸۴۹

	Q21	۰/۸۶۶
	Q22	۰/۸۵۵
آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی (EXE)	Q23	۰/۸۳۵
	Q24	۰/۸۶۱
	Q25	۰/۸۴۳
	Q26	۰/۸۷۲
	Q27	۰/۸۴۹
نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق (SYS)	Q28	۰/۸۵۴
	Q29	۰/۸۲۱
	Q30	۰/۸۹۷

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، تمام بارهای عاملی بالاتر از ۰,۷۰ قرار دارند که نشان‌دهنده روایی همگرا مطلوب است.

جدول ۶ ماتریس همبستگی بین سازه‌های پنج‌گانه مدل را نشان می‌دهد. بر اساس معیار فورنل و لارکر^۱ (۱۹۸۱)، روایی و اگر زمانی تأیید می‌شود که جذر AVE هر سازه (اعداد روی قطر اصلی) از همبستگی آن سازه با سایر سازه‌ها (اعداد خارج از قطر) بزرگتر باشد.

جدول ۶. ماتریس همبستگی بین سازه‌ها و معیار فورنل-لارکر

سازه	ENV	DES	TST	EXE	SYS
ENV	۰/۸۵۲				
DES	۰/۷۹۱	۰/۸۳۹			
TST	۰/۷۶۳	۰/۷۴۵	۰/۸۴۷		
EXE	۰/۶۸۴	۰/۶۵۲	۰/۷۱۸	۰/۸۲۹	
SYS	۰/۵۸۷	۰/۵۴۳	۰/۵۹۱	۰/۶۲۴	۰/۸۵۶

^۱ Fornell & Larcker

اعداد روی قطر اصلی (پررنگ) نشان‌دهنده جذر AVE هر سازه هستند (مقادیر ریشه دوم AVE از جدول ۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود، جذر AVE هر سازه از همبستگی آن سازه با سایر سازه‌ها بزرگتر است که نشان‌دهنده روایی و اگرایی مطلوب مدل می‌باشد (فورنل و لارکر، ۱۹۸۱). به‌عنوان مثال، جذر AVE برای سازه ENV برابر با ۰/۸۵۲ است که از همبستگی آن با DES (۰/۷۹۱)، TST (۰/۷۶۳)، EXE (۰/۶۸۴) و SYS (۰/۵۸۷) بزرگتر می‌باشد.

پس از تأیید برازش مدل اندازه‌گیری و اطمینان از روایی و پایایی ابزار سنجش، نوبت به بررسی مدل ساختاری می‌رسد. در مدل ساختاری، چگونگی پیوند میان متغیرهای پنهان (سازه‌ها) و میزان تأثیر هر یک بر دیگری در قالب ضرایب مسیر^۱ و ضرایب تعیین (R^2) تبیین می‌شود. ضرایب مسیر که روی پیکان‌های بین سازه‌ها درج می‌شوند، بیانگر بتای استاندارد شده در رگرسیون یا همان ضریب همبستگی بین دو سازه هستند و شدت تأثیر مستقیم یک متغیر بر متغیر دیگر را نشان می‌دهند. این ضرایب همواره در دامنه صفر تا یک قرار دارند و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشند، تأثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته قوی‌تر است. همچنین اعداد درون دایره‌های مربوط به هر سازه، نشان‌دهنده ضریب تعیین (R^2) است که بیانگر میزان واریانس تبیین شده آن سازه توسط متغیرهای وارد شده به مدل می‌باشد. هرچه ضریب تعیین بزرگتر باشد، نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل توانسته‌اند تغییرات متغیر وابسته را بهتر پیش‌بینی و تبیین کنند. در ادامه، یافته‌های حاصل از برآورد مدل ساختاری به تفکیک هر مسیر تحلیل و تفسیر می‌شود. شکل ۳ مربوط به داده‌های ضریب مسیر در معادلات ساختاری است.

تأثیر شرایط اقلیمی بر استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش ($H1$): بر اساس نتایج، ضریب مسیر مربوط به تأثیر سازه ENV بر سازه DES برابر با ۰/۸۴۲ محاسبه شده است. این مقدار بسیار بالا نشان‌دهنده تأثیر قوی و مستقیم شرایط اقلیمی و خوردنگی محیطی بر نوع استانداردها و الزامات طراحی سیستم پوشش می‌باشد. به عبارت دیگر، هرچه شناخت دقیق‌تری از پارامترهای اقلیمی یک منطقه (مانند میزان رطوبت، غلظت نمک، آلاینده‌های صنعتی و شدت تابش اشعه فرابنفش) وجود داشته باشد، استانداردهای طراحی و انتخاب پوشش برای آن منطقه دقیق‌تر و اثربخش‌تر تدوین خواهند شد. این یافته با مطالعات مورسیلو و همکاران

¹ Path Coefficients

(۲۰۱۹) و موسوی و همکاران (۲۰۱۹) همسو است که نشان دادند پوشش‌های یکسان در اقلیم‌های مختلف عملکرد کاملاً متفاوتی از خود نشان می‌دهند. ضریب تعیین سازه DES برابر با ۰/۷۰۹ محاسبه شده است که نشان می‌دهد حدود ۷۱ درصد از تغییرات استانداردهای انتخاب و طراحی پوشش توسط شرایط اقلیمی تبیین می‌شود.

تأثیر شرایط اقلیمی بر آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت (H2): ضریب مسیر ENV بر TST برابر با ۰/۵۰۴ به دست آمده است. این مقدار نشان‌دهنده تأثیر متوسط تا قوی شرایط اقلیمی بر نوع و شدت آزمون‌های کنترل کیفیت می‌باشد. این یافته بدین معناست که در مناطق با خورندگی بالاتر (مانند سواحل خلیج فارس)، باید آزمون‌های سختگیرانه‌تر و با دوره‌های زمانی طولانی‌تری (مانند آزمون چرخه‌ای به جای افشانه کردن ساده نمک) برای تأیید کیفیت پوشش‌ها به کار گرفته شوند. ضریب تعیین سازه TST برابر با ۰/۵۹۲ است، یعنی حدود ۵۹ درصد از تغییرات آزمون‌های کنترل کیفیت توسط شرایط اقلیمی و استانداردهای طراحی (مسیر H3) تبیین می‌شود.

تأثیر استانداردهای طراحی بر آزمون‌های کنترل کیفیت (H3): ضریب مسیر DES بر TST برابر با ۰/۳۷۱ محاسبه شده است. این مقدار نشان‌دهنده تأثیر مثبت اما به نسبت ضعیف‌تر نسبت به دو مسیر قبلی است. این یافته حاکی از آن است که اگرچه استانداردهای طراحی سیستم پوشش به طور مستقیم بر نوع آزمون‌های کنترل کیفیت تأثیر می‌گذارند، اما این تأثیر در مقایسه با تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی (مسیر H2) کمتر است. به عبارت دیگر، شرایط محیطی بیشتر از خود استانداردهای طراحی، تعیین‌کننده نوع آزمون‌های کنترل کیفیت هستند. این یافته از نظر عملی حائز اهمیت است و نشان می‌دهد که در تدوین پروتکل‌های آزمون، باید اولویت اصلی را به شناسایی دقیق شرایط محیطی اختصاص داد.

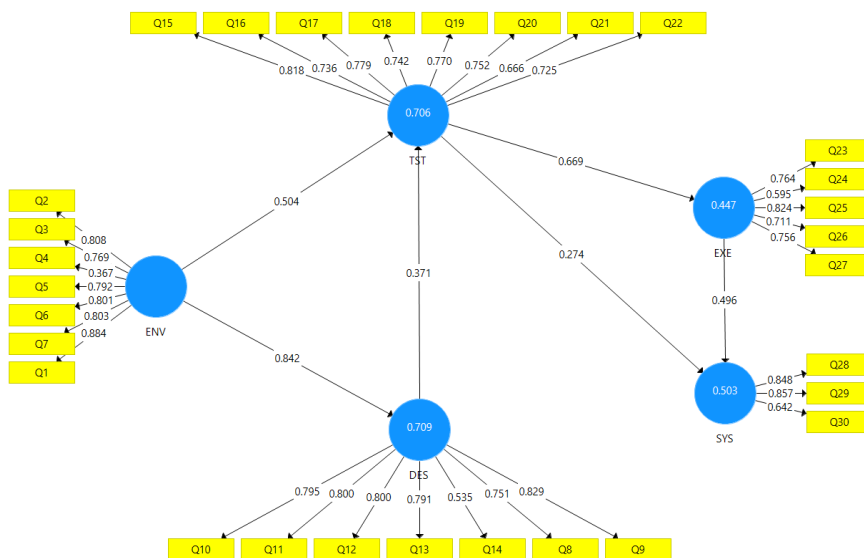
تأثیر آزمون‌های کنترل کیفیت بر آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی (H4): ضریب مسیر TST بر EXE برابر با ۰/۶۶۹ به دست آمده است. این مقدار به نسبت بالا نشان‌دهنده تأثیر قوی آزمون‌های کنترل کیفیت بر الزامات مربوط به آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی است. این یافته از این جهت اهمیت دارد که در عمل، نتایج آزمون‌های کنترل کیفیت (به ویژه آزمون‌های چسبندگی و ضخامت سنجی) اغلب منجر به بازخوردهایی می‌شود که به طور مستقیم بر نحوه آماده‌سازی سطح و کیفیت اجرا تأثیر می‌گذارد. ضریب تعیین سازه EXE برابر با ۰/۴۴۷ است،

یعنی حدود ۴۵ درصد از تغییرات آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی توسط آزمون‌های کنترل کیفیت تبیین می‌شود.

تأثیر آزمون‌های کنترل کیفیت بر نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق (H5): ضریب مسیر TST بر SYS برابر با ۰/۲۷۴ محاسبه شده است. این مقدار در مقایسه با سایر مسیرها به نسبت ضعیف‌تر است. این یافته بدین معناست که اگرچه آزمون‌های کنترل کیفیت بر نظام ارزیابی انطباق تأثیر مثبت دارند، اما این تأثیر به اندازه تأثیر آنها بر آماده‌سازی سطح (مسیر H4) قوی نیست. به عبارت دیگر، نظام ارزیابی انطباق تحت تأثیر عوامل دیگری (مانند الزامات قانونی، ساختارهای حاکمیتی و فرهنگ سازمانی) نیز قرار دارد که در این مدل لحاظ نشده‌اند.

تأثیر آماده‌سازی سطح بر نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق (H6): ضریب مسیر EXE بر SYS برابر با ۰/۴۶۹ به دست آمده است. این مقدار نشان‌دهنده تأثیر متوسط تا قوی کیفیت اجرا و آماده‌سازی سطح بر نظام ارزیابی انطباق می‌باشد. این یافته از نظر عملی بسیار حائز اهمیت است زیرا نشان می‌دهد که هرگونه ضعف در فرآیندهای اجرایی و آماده‌سازی سطح، به طور مستقیم نظام ارزیابی انطباق را با چالش مواجه می‌کند. به عبارت دیگر، تدوین استانداردهای سختگیرانه برای تأیید صلاحیت پیمانکاران، بدون توجه به کیفیت اجرا، نمی‌تواند به تنهایی اثربخش باشد. ضریب تعیین سازه SYS برابر با ۰/۵۶۱ است، یعنی حدود ۵۶ درصد از تغییرات نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق توسط آزمون‌های کنترل کیفیت و آماده‌سازی سطح تبیین می‌شود.

تحلیل ضرایب تعیین (R^2): بررسی ضرایب تعیین مدل نشان می‌دهد که سازه TST با ضریب تعیین ۰/۵۹۲ بیشترین میزان تبیین‌پذیری را دارد و پس از آن به ترتیب سازه‌های SYS (۰/۵۰۳)، EXE (۰/۴۴۷) و DES (۰/۷۰۹) قرار دارند. این مقادیر در مجموع نشان‌دهنده برازش خوب مدل ساختاری است، زیرا مطابق با معیارهای هایر و همکاران (۲۰۱۹)، مقادیر R^2 بالاتر از ۰/۳۳ متوسط و بالاتر از ۰/۶۷ قوی محسوب می‌شود. اگرچه ضریب تعیین DES با ۰/۷۰۹ در سطح قوی قرار دارد، سایر سازه‌ها در سطح متوسط رو به بالا ارزیابی می‌شوند که برای پژوهش‌های کاربردی در حوزه علوم رفتاری و مهندسی قابل قبول است.



شکل ۳. ضرایب مسیر و ضریب تعیین مدل کلی پژوهش

برای آزمون معنی‌داری فرضیه‌ها آزمون «بند پوتین»^۱ بکار گرفته شده و از شاخص جزئی مقدار آماره تی استفاده شده است. مقدار تی بیشتر از ۱/۹۶، نشان‌دهنده صحت رابطه بین سازه‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد و در نتیجه شرایط مطلوب بخش ساختاری مدل است. ضرایب تی مدل کلی پژوهش، در شکل ۴ نمایش داده شده است. با توجه به نمودار و میزان ضرایب معنی‌داری، از آنجاکه برای رد یا تأیید فرضیه‌ها مقدار تی باید بیشتر از ۱/۹۶ یا کمتر از ۱/۹۶- باشد، مقدار پارامتر بین دو دامنه در الگو مهم شمرده نمی‌شود، همچنین مقادیر بین این دو مقدار حاکی از نبود تفاوت معنی‌دار مقدار محاسبه شده برای وزن‌های رگرسیونی با مقدار صفر در سطح ۹۵ درصد است. برای تعیین مطلوب یا نامطلوب بودن وضعیت متغیر نیز به آماره تی توجه می‌شود. در این راستا جدول ۷ خلاصه نتایج، به شرح زیر است:

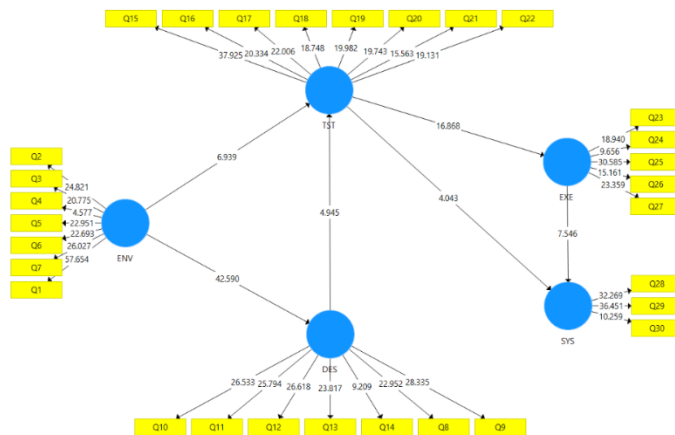
آزمون معناداری فرضیه‌ها (t-value و p-value): برای اطمینان از معناداری آماری ضرایب مسیر برآورد شده، از روش بند پوتین با ۵۰۰۰ زیرنمونه استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که تمام شش فرضیه پژوهش در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($p\text{-value} < 0.001$) تأیید شده‌اند. آماره تی

¹ Bootstrap

محاسبه شده برای هر یک از فرضیه‌ها به ترتیب عبارت است از: H1 (۴۲/۵۹۰)، H2 (۶/۹۳۹)، H3 (۴/۹۴۵)، H4 (۱۶/۸۶۸)، H5 (۴/۰۴۳) و H6 (۷/۵۴۶). تمام این مقادیر به طور قابل توجهی از مقدار بحرانی ۱/۹۶ در سطح اطمینان ۹۵ درصد بزرگتر هستند که حاکی از معناداری قوی روابط ساختاری در مدل می‌باشد. به ویژه ضریب تی برای فرضیه H1 (تأثیر شرایط اقلیمی بر استانداردهای طراحی) با مقدار ۴۲/۵۹ بسیار بالا است که نشان‌دهنده قوی‌ترین رابطه در میان تمام مسیرهای مدل می‌باشد. این یافته بر نقش محوری و اساسی شناخت دقیق از شرایط اقلیمی در هرگونه فرآیند استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی تأکید می‌کند.

نتایج اولویت‌بندی بر اساس ضرایب مسیر نشان می‌دهد که مؤلفه «شرایط اقلیمی» با ضریب ۰/۸۴۲ بالاترین اولویت و مؤلفه «آزمون‌های کنترل کیفیت» با ضریب ۰/۲۷۴ بر نظام ارزیابی انطباق، پایین‌ترین اولویت را دارد.

در مجموع، یافته‌های حاصل از مدل‌سازی معادلات ساختاری نشان می‌دهد که مدل مفهومی مستخرج از فراترکیب، از برازش مناسبی برخوردار است و تمام روابط مفروض بین سازه‌ها تأیید می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که چارچوب استانداردسازی چندلایه اقلیم‌محور برای پوشش‌های ضدخوردگی در ایران، یک مدل معتبر و قابل اتکا است که می‌تواند مبنای تدوین استانداردهای ملی، دستورالعمل‌های اجرایی و برنامه‌های آموزشی در صنایع مختلف کشور قرار گیرد.



شکل ۴. ضرایب t-value مدل کلی پژوهش

جدول ۷. خلاصه نتایج تحقیق

نوع تأثیر	ضریب مسیر	سطح معناداری	آماره تی	مسیر (Path)	شماره فرضیه
قوی‌ترین	۰.۸۴۲	$0.001 <$	۴۲.۵۹۰	ENV → DES	H1
قوی	۰.۵۰۴	$0.001 <$	۶.۹۳۹	ENV → TST	H2
متوسط-قوی	۰.۳۷۱	$0.001 <$	۴.۹۴۵	DES → TST	H3
متوسط-قوی	۰.۶۶۹	$0.001 <$	۱۶.۸۶۸	TST → EXE	H4
متوسط	۰.۲۷۴	$0.001 <$	۴.۰۴۳	TST → SYS	H5
ضعیف‌ترین	۰.۴۶۹	$0.001 <$	۷.۵۴۶	EXE → SYS	H6

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که برای ارزیابی برازش مدل از شاخص‌های GOF^1 و $SRMR^2$ استفاده شده است. مقادیر بدست آمده برای شاخص $SRMR$ برابر با ۰/۰۸۸، NFI برابر با ۰/۹۳،

¹ Goodness of Fit

² Standardized Root Mean Square Residual

Chi-square/df برابر با ۲/۸۸، RMSEA برابر با ۰/۰۵۱ و GFI برابر با ۰/۹۱ بود که همگی در محدوده مطلوب قرار داشتند (هو و بنتلر^۱، ۱۹۹۹).

جدول ۸. برازش مدل پژوهش

نام شاخص	مقدار بدست آمده	حد مجاز
X ² /df	۲/۸۸	کمتر از ۳
GFI	۰/۹۱	بالاتر از ۰/۹
AGFI	۰/۹۴	بالاتر از ۰/۹
CFI	۰/۹۴	بالاتر از ۰/۹
NFI	۰/۹۳	بالاتر از ۰/۹
NNFI	۰/۹۰	بالاتر از ۰/۹
RMSEA	۰/۰۵۱	کمتر از ۰/۱

۵-۳- مقایسه استانداردهای ملی ایران در حوزه پوشش‌های ضدخوردگی

به منظور درک بهتر شکاف میان وضعیت موجود نظام استانداردسازی در ایران و چارچوب پیشنهادی این پژوهش، یافته‌های مدل استخراج‌شده با استانداردهای ملی موجود حوزه پوشش‌های ضدخوردگی مورد مقایسه شدند. استاندارد ملی ایران به شماره ۶۵۹۴ با عنوان «پوشش‌ها و جلاها - حفاظت سازه‌های فولادی در برابر خوردگی با استفاده از سامانه‌های رنگ محافظ» که در سال ۱۳۹۷ تصویب شده است، مهم‌ترین سند استاندارد در این حوزه محسوب می‌شود و شامل ۹ بخش مجزا شامل طبقه‌بندی شرایط محیطی، ملاحظات طراحی، انواع سطوح و آماده‌سازی، سامانه‌های رنگ محافظ، روش‌های آزمون، اجرا و نظارت، تدوین ویژگی‌های رنگ‌آمیزی مجدد، و سامانه‌های پوشش برای سازه‌های فراساحلی می‌باشد.

¹ Hu & Bentler

مقایسه مؤلفه‌های پنج‌گانه مدل پژوهش با استاندارد ملی ۶۵۹۴ نشان‌دهنده وجود هم‌پوشانی‌هایی است، اما شکاف‌های قابل توجهی نیز به چشم می‌خورد. در حوزه «طبقه‌بندی اقلیم و خورندگی محیط»، استاندارد ملی ۶۵۹۴-۲ منطبق بر استاندارد ایزو-۲-۱۲۹۴۴ است که عمدتاً بر اساس طبقه‌بندی C1 تا CX و محیط‌های غوطه‌وری Im1 تا Im4 تدوین شده است. اما نتایج پژوهش حاضر (جدول ۱ و ۲) نشان می‌دهد که برای اقلیم خاص ایران، نیاز به مؤلفه‌های تکمیلی نظیر «زمان ترشدگی» (TOW) به‌عنوان پارامتر اصلی خوردگی جوی» (بدینگتون و همکاران، ۲۰۲۴)، «تأثیر همزمان تابش فرابنفش و رطوبت بالا بر پوشش‌های پلی‌اورتان در شمال ایران» (موسوی و همکاران، ۲۰۱۹)، و «تأثیر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن در اقلیم سردسیر کوهستانی» (کرباسی و همکاران، ۲۰۲۱) وجود دارد که در استاندارد ملی فعلی به‌صراحت لحاظ نشده‌اند.

در حوزه «استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش»، استاندارد ملی ۶۵۹۴-۵ منطبق بر استاندارد ایزو-۵-۱۲۹۴۴، سیستم‌های پوشش را برای محیط‌های C2 تا C5 و Im1 تا Im4 ارائه می‌دهد. این در حالی است که پژوهش حاضر مؤلفه‌های جدیدتری مانند «پوشش‌های زیر عایق (CUI) با معیارهای پذیرش برای محدوده دمایی ۴۵- تا ۲۰۴+ درجه سانتی‌گراد» منطبق بر آخرین ویرایش استاندارد ایزو-۱-۱۹۲۷۷ و «پوشش‌های هیبریدی آلی-سرامیک برای مناطق گرم و مرطوب ساحلی» (ساجی، ۲۰۲۰) را شناسایی کرده است که در استاندارد ملی ۶۵۹۴ وجود ندارد. از سوی دیگر، استانداردهای صنعت نفت ایران (IPS) که توسط ژوهشکده استاندارد تدوین کرده است، با وجود این که پوشش‌های متنوعی را ارائه می‌دهند (مانند IPS-M-TP-205 برای پوشش اپوکسی سرشار از روی، IPS-M-TP-235 برای پوشش پلی‌اورتان دو جزئی، و IPS-M-TP-168 برای پوشش آکریلیک سیلیکونی کاربرد در دمای بالا)، اما عمدتاً بر ویژگی‌های محصولات پوششی متمرکز هستند و کمتر به رویکرد اقلیم‌محور در انتخاب پوشش پرداخته‌اند.

در حوزه «آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت»، استاندارد ملی ۶۵۹۴-۹ منطبق بر استاندارد ایزو-۹-۱۲۹۴۴، آزمون چرخه‌ای را برای سازه‌های فراساحلی تجویز می‌کند. همچنین برخی از آزمون‌های مورد اشاره در پژوهش حاضر مانند آزمون چسبندگی به روش Pull-off (ASTM D4541-22) و آزمون افشانه کردن نمک (ASTM B117-19) در استانداردهای ملی و همچنین در ضوابط انجمن طبقه‌بندی ایران برای تأیید نوع پوشش‌های دریایی استفاده می‌شوند. با این

حال، یافته‌های پژوهش (کدهای Q15 تا Q22) نشان می‌دهد که آزمون‌های جدیدتری نظیر «آزمون مقاومت به نفوذ یون کلرید در پوشش‌های آلی» (لیو و همکاران، ۲۰۲۲) که در محیط‌های دریایی بسیار حائز اهمیت است، و «آزمون میعان رطوبت» منطبق بر استاندارد ISO 6270-1:2017 که برای مناطق مرطوب شمال ایران ضروری است، در پروتکل‌های آزمون استاندارد ملی کمتر مورد تأکید قرار گرفته‌اند.

در حوزه «آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی»، هرچند استاندارد ملی ۴-۶۵۹۴ منطبق بر استاندارد ISO 8501-1:2007 الزامات آماده‌سازی سطح (درجات Sa2.5 و Sa3) را پوشش می‌دهد، اما پژوهش حاضر (کدهای Q23 تا Q27) بر مؤلفه‌های تکمیلی مانند «الزامات مربوط به نمک‌های محلول سطح پیش از اعمال پوشش» منطبق بر استاندارد ایزو-۹-۸۵۰۲ و «شرایط محیطی مجاز حین اعمال پوشش» منطبق بر استاندارد NACE SP0188-2018 تأکید دارد که کمتر در دستورالعمل‌های اجرایی داخلی به‌عنوان الزامات اجباری لحاظ می‌شوند.

مهم‌ترین شکاف در حوزه «نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق» مشاهده می‌شود. در حالی که استاندارد ملی ۷-۶۵۹۴ به‌طور کلی به «اجرا و نظارت بر رنگ‌آمیزی» پرداخته و استاندارد ملی ۱-۶۵۹۴ نیز به‌عنوان مقدمه کلی به موضوعات نظام‌مند اشاره دارد، مؤلفه‌های جدیدی نظیر «سیستم خبره برای انتخاب سیستم پوشش با استفاده از منطق فازی و تحلیل سلسله‌مراتبی» (اسدی و همکاران، ۲۰۱۹) و «ارزیابی درجه خوردگی و تورم پوشش مطابق استاندارد ایزو-۱-۴۶۲۸» که در پژوهش حاضر به‌عنوان کدهای Q29 و Q30 استخراج شده‌اند، در نظام ارزیابی انطباق فعلی کشور جایی ندارند. همچنین در حالی که پژوهش حاضر بر ضرورت تأیید صلاحیت پیمانکاران بر اساس شایستگی‌های تخصصی اقلیم‌محور تأکید دارد (کد Q28)، نظام فعلی عمدتاً بر گواهینامه‌های عمومی نظیر ایزو-۹۰۰۱ متمرکز است.

به‌طور خلاصه، مقایسه نتایج پژوهش با استانداردهای ملی نشان می‌دهد که اگرچه استاندارد ۶۵۹۴ به‌عنوان یک سند جامع، بخش قابل توجهی از مؤلفه‌های بین‌المللی را پوشش می‌دهد، اما شکاف‌های قابل توجهی در حوزه‌های زیر وجود دارد: (۱) توجه ناکافی به تنوع اقلیمی خاص ایران و مؤلفه‌های محیطی بومی مانند تابش فرابنفش شدید شمال، نمک زیاد جنوب، و چرخه‌های یخ‌زدن در مناطق کوهستانی؛ (۲) پوشش ندادن فناوری‌های نوین پوشش مانند پوشش‌های هیبریدی و پوشش‌های زیر عایق با آخرین ویرایش‌های استاندارد؛ (۳) کمبود آزمون‌های تکمیلی

و اقلیم‌محور در پروتکل‌های کنترل کیفیت؛ (۴) غفلت از نظام ارزیابی انطباق و تأیید صلاحیت تخصصی بر اساس شایستگی‌های اجرایی در اقلیم‌های مختلف. این شکاف‌ها، ضرورت تدوین چارچوب چندلایه اقلیم‌محور پیشنهادی این پژوهش را به‌عنوان مکملی برای استانداردهای ملی موجود، بیش از پیش نمایان می‌سازد.

۴ نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تدوین چارچوب استانداردسازی چندلایه اقلیم‌محور برای پوشش‌های ضدخوردگی در ایران انجام شد. ایران با تنوع اقلیمی چشمگیر شامل مناطق ساحلی بسیار خورنده در جنوب، مناطق مرطوب با تابش فرابنفش شدید در شمال، مناطق صنعتی با آلاینده‌های گوگردی و نیتروژنی و مناطق سردسیر کوهستانی با چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن متعدد، نیازمند رویکردی بومی و اقلیم‌محور در استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی است. استفاده از یک سیستم پوشش واحد برای تمام این اقلیم‌های متنوع، نه تنها مقرون به صرفه نیست، بلکه در بسیاری موارد منجر به خرابی‌های زود هنگام و تحمیل هزینه‌های مضاعف می‌شود.

در این پژوهش با استفاده از رویکرد فراترکیب و بررسی نظام‌مند ۲۶ منبع معتبر شامل مقالات علمی و استانداردهای بین‌المللی (سری ایزو-۹۲۲۳، ایزو-۱۲۹۴۴، ایزو-۸۵۰۱، ای.اس.تی.ام-بی-۱۷ و NACE SP0188)، ۳۰ کد اولیه استخراج شد. این کدها در مرحله کدگذاری محوری در پنج دسته اصلی شامل «طبقه‌بندی اقلیم و خوردگی محیط»، «استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش»، «آزمون‌های استاندارد کنترل کیفیت»، «آماده‌سازی سطح و شایستگی اجرایی» و «نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق» سازماندهی شدند. در مرحله کدگذاری انتخابی، مقوله هسته «چارچوب استانداردسازی چندلایه اقلیم‌محور» به عنوان هسته مرکزی مدل تعیین شد.

مدل مفهومی استخراج شده شامل شش فرضیه اصلی بود که روابط بین سازه‌ها را تبیین می‌کرد. برای اعتبارسنجی مدل، پرسشنامه‌ای با ۳۰ گویه طراحی و در اختیار ۸۵ تن از خبرگان و متخصصان حوزه خوردگی و پوشش قرار گرفت. داده‌های ۷۲ پرسشنامه با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری و نرم‌افزار SmartPLS نسخه ۴ تحلیل شد. نتایج نشان داد که تمام فرضیه‌های پژوهش در سطح اطمینان ۹۹ درصد مورد تأیید قرار گرفته‌اند. بالاترین ضریب

مسیر مربوط به تأثیر شرایط اقلیمی بر استانداردهای انتخاب و طراحی سیستم پوشش ($\beta=0/842$) و پایین‌ترین ضریب مسیر مربوط به تأثیر آزمون‌های کنترل کیفیت بر نظام استانداردسازی و ارزیابی انطباق ($\beta=0/274$) بود. همچنین شاخص‌های برازش مدل شامل SRMR (088/0)، NFI (93/0)، RMSEA (051/0) و GFI (91/0) همگی در محدوده مطلوب قرار داشتند که حاکی از برازش خوب مدل با داده‌های میدانی است.

نتایج این پژوهش دارای دلالت‌های عملی مهمی برای صنایع مختلف کشور است. نخست، ضرورت پهنه‌بندی خوردگی ایران بر اساس استاندارد ایزو-۹۲۲۳ و تدوین نقشه خوردگی ملی به عنوان مبنای تمام استانداردهای مرتبط با پوشش‌های ضدخوردگی. دوم، تدوین بانک داده از سیستم‌های پوشش تأیید شده برای هر اقلیم بر اساس استاندارد ایزو-۱۲۹۴۴. سوم، طراحی بازبینی‌های آزمون‌های کنترل کیفیت متناسب با سطح خوردگی هر منطقه. چهارم، تدوین دستورالعمل الزامات اجرایی و آماده‌سازی سطح با تأکید بر شرایط محیطی خاص هر اقلیم. پنجم، بازنگری در نظام تأیید صلاحیت پیمانکاران و آزمایشگاه‌ها بر اساس مؤلفه‌های شناسایی شده در این پژوهش.

از جمله محدودیت‌های پژوهش می‌توان به تمرکز بر استانداردهای بین‌المللی و غفلت نسبی از استانداردهای ملی و بومی، و همچنین محدود بودن جامعه آماری به خبرگان داخل کشور اشاره کرد. برای پژوهش‌های آتی، توصیه می‌شود که اعتبار مدل پیشنهادی در پروژه‌های صنعتی واقعی و در اقلیم‌های مختلف ایران به صورت میدانی آزمون شود. همچنین طراحی و ساخت سامانه خبره یا نرم‌افزار کمک تصمیم‌گیرنده بر اساس مدل ارائه شده می‌تواند گام مؤثری در جهت نهادینه‌سازی استانداردسازی اقلیم‌محور در صنایع کشور باشد. در پایان، امید است که نتایج این پژوهش گامی کوچک اما مؤثر در جهت کاهش هزینه‌های خوردگی، افزایش ایمنی سازه‌ها و ارتقای کیفیت محصولات و خدمات در صنایع کشور بردارد.

۵ پیشنهادات

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای کاربردی زیر برای بهبود فرآیند استانداردسازی پوشش‌های ضدخوردگی در صنایع مختلف ایران ارائه می‌شود:

۱- تدوین نقشه ملی خورندگی ایران: سازمان ملی استاندارد ایران با همکاری سازمان هواشناسی و پژوهشگاه صنعت نفت، نسبت به تدوین نقشه خورندگی کشور بر اساس استاندارد ایزو-۹۲۲۳ اقدام کند. این نقشه باید پهنه‌بندی مناطق مختلف ایران را از نظر شدت خورندگی (C1 تا CX) مشخص کند و مبنای تمام تصمیم‌گیری‌های مرتبط با انتخاب پوشش قرار گیرد.

۲- ایجاد بانک داده سیستم‌های پوشش تأیید شده برای هر اقلیم: با استفاده از نتایج این پژوهش، بانک داده‌ای شامل سیستم‌های پوشش تأیید شده برای هر منطقه اقلیمی ایران تدوین شود. این بانک داده باید شامل اطلاعاتی از قبیل نوع پوشش (اپوکسی، پلی‌اورتان، هیبریدی و غیره)، ضخامت توصیه شده، روش اجرا و سوابق عملکردی در شرایط مشابه باشد.

۳- بازنگری در استانداردهای ملی مرتبط با پوشش: استانداردهای ملی ایران در حوزه پوشش‌های ضد خوردگی بر اساس مؤلفه‌های پنج‌گانه شناسایی شده در این پژوهش (اقلیم، طراحی، آزمون، اجرا و ارزیابی انطباق) بازنگری شوند. به ویژه اضافه کردن الزامات اقلیم‌محور به استانداردهای موجود در اولویت قرار دارد.

۴- طراحی بازبینه اجرایی برای پروژه‌های صنعتی: بر اساس ۳۰ کد استخراج شده در این پژوهش، یک بازبینه جامع و اقلیم‌محور برای استفاده در پروژه‌های صنعتی طراحی شود. این بازبینه باید به بازرسان و ناظران فنی کمک کند تا تمامی مراحل از آماده‌سازی سطح تا اعمال پوشش و آزمون‌های نهایی را به درستی کنترل نمایند.

۵- توسعه سامانه خبره انتخاب پوشش: با استفاده از مدل مفهومی ارائه شده در این پژوهش، یک سامانه خبره مبتنی بر منطق فازی طراحی شود که با دریافت اطلاعات مربوط به موقعیت جغرافیایی پروژه، نوع سازه و دوام مورد انتظار، بهینه‌ترین سیستم پوشش را پیشنهاد دهد.

۶- برنامه‌ریزی آموزشی برای ارتقای شایستگی نیروی انسانی: دوره‌های آموزشی تخصصی برای پیمانکاران، بازرسان و مهندسان صنایع مختلف با محوریت استانداردسازی اقلیم‌محور طراحی و برگزار شود. این دوره‌ها باید بر اساس مؤلفه‌های پنج‌گانه مدل پژوهش و با تأکید بر شرایط خاص هر اقلیم تدوین شوند.

۶ مراجع

۱. مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. (۱۳۹۷). پوشش‌نگ‌ها و جلاها – حفاظت سازه‌های فولادی در برابر خوردگی با استفاده از سامانه‌های رنگ محافظ (استاندارد ملی ایران شماره ۶۵۹۴-۱ تا ۶۵۹۴-۹). تهران: مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران.
2. Al-Borno, A., Islam, M., Pedraza, H., & Ahmed, E. (2026). Corrosion under Insulation in Marine Pipelines: A Literature Review on Coating Performance and Qualification Standards. In *CONFERENCE 2026* (pp. 1-8). Association for Materials Protection and Performance.
3. Asadi, N., Azimi, M., & Ramezanzadeh, B. (2019). Development of an expert system for selection of appropriate coating system for atmospheric corrosion protection using fuzzy logic. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19(5), 1326-1338.
4. Ashrafi, A., Shariati, M., & Farid, A. (2015). Corrosion mapping of Iran using ISO 9223 standard. *Journal of Corrosion Science and Engineering*, 18(3), 1-12.
5. ASTM B117-19. (2019). *Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus*. West Conshohocken: ASTM International.
6. ASTM D4541-22. (2022). *Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers*. West Conshohocken: ASTM International.
7. Bodington, A., Ruiz-Aparicio, A., Murdoch, C., & Chang, B. T. (2024). Critical Review of ISO 12944-9 and AMPP TM21612 Coating Qualification Standards Using Field Data to Compare. In *CONFERENCE 2024* (pp. 1-9). Association for Materials Protection and Performance.
8. Creswell, J. W., & Clark, V. L. P. (2017). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). Thousand Oaks: Sage Publications.
9. Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39–50.
10. Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2017). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)* (2nd ed.). Sage Publications.
11. Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., & Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of PLS-SEM. *European Business Review*, 31(1), 2-24.

12. Hu, L. T., & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling*, 6(1), 1-55.
13. ISO 12944-1:2017. (2017). Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 1: General introduction. Geneva: International Organization for Standardization.
14. ISO 12944-2:2017. (2017). Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 2: Classification of environments. Geneva: International Organization for Standardization.
15. ISO 12944-5:2019. (2019). Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 5: Protective paint systems. Geneva: International Organization for Standardization.
16. ISO 12944-9:2018. (2018). Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 9: Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures. Geneva: International Organization for Standardization.
17. ISO 16276-2:2025. (2025). Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Assessment of, and acceptance criteria for, the adhesion/cohesion (fracture strength) of a coating - Part 2: Cross-cut testing and X-cut testing. Geneva: International Organization for Standardization.
18. ISO 19840:2012. (2012). *Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Measurement of dry film thickness and acceptance criteria*. Geneva: International Organization for Standardization.
19. ISO 2812-2:2018. (2018). Paints and varnishes - Determination of resistance to liquids - Part 2: Water immersion method. Geneva: International Organization for Standardization.
20. ISO 3834-1:2021. (2021). Quality requirements for fusion welding of metallic materials - Part 1: Criteria for the selection of the appropriate quality requirements. Geneva: International Organization for Standardization.
21. ISO 4628-1:2016. (2016). Paints and varnishes - Assessment of degradation of coatings - Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance - Part 1: General introduction and designation system. Geneva: International Organization for Standardization.
22. ISO 6270-1:2017. (2017). Paints and varnishes - Determination of resistance to humidity - Part 1: Continuous condensation. Geneva: International Organization for Standardization.
23. ISO 8501-1:2007. (2007). Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Part 1: Visual assessment of surface cleanliness. Geneva: International Organization for Standardization.
24. ISO 8502-9:2020. (2020). Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Tests for the assessment of surface

- cleanliness - Part 9: Field method for the conductometric determination of water-soluble salts. Geneva: International Organization for Standardization.
25. ISO 8503-2:2012. (2012). Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates - Part 2: Method for the grading of surface profile of abrasive blast-cleaned steel. Geneva: International Organization for Standardization.
26. ISO 9223:2012. (2012). *Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation*. Geneva: International Organization for Standardization.
27. ISO/DIS 19277-1. (2026). Oil and gas industries including lower carbon energy - Qualification testing and acceptance criteria for protective coating systems under insulation - Part 1: Liquid applied coatings. Geneva: International Organization for Standardization.
28. Karbasi, M., Jafari, H., & Yeganeh, M. (2021). Corrosion behavior of epoxy coating in freeze-thaw cycles. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 56(4), 345-354.
29. Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). *International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study*. Houston: NACE International.
30. Kunce, I. (2023). Powder coatings in anti-corrosion applications of steel structures—an attempt to adapt the requirements to the scheme of the PN-EN ISO 12944 standard. *Ochrona przed Korozją*, (3), 71-86.
31. Lawshe, C. H. (1975). A quantitative approach to content validity. *Personnel Psychology*, 28(4), 563-575.
32. Liu, Y., Wang, H., & Zhang, X. (2022). Chloride diffusion coefficient of organic coatings in marine environment. *Journal of Coatings Technology and Research*, 19(2), 451-462.
33. Momber, A. W. (2018). *Hydroblasting and coating of steel structures*. Oxford: Elsevier.
34. Morcillo, M., Chico, B., Alcántara, J., Díaz, I., & Simancas, J. (2019). Atmospheric corrosion of mild steel in chloride-rich environments: The role of the pollution. *Materials*, 12(8), 1315.
35. Mousavi, M., Moradian, S., & Tahmasebi, N. (2019). Investigating the synergistic effect of simultaneous UV irradiation and high humidity on degradation of polyurethane coating. *Progress in Organic Coatings*, 136, 105-112.
36. NACE SP0188-2018. (2018). *Discontinuity (holiday) testing of new protective coatings on conductive substrates*. Houston: NACE International.
37. Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric theory* (3rd ed.). McGraw-Hill.

38. Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric theory* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
39. Podsakoff, P. M., & Organ, D. W. (1986). Self-reports in organizational research: Problems and prospects. *Journal of Management*, 12(4), 531–544.
40. Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Lee, J.-Y., & Podsakoff, N. P. (2003). Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies. *Journal of Applied Psychology*, 88(5), 879–903.
41. Saji, V. S. (2020). Recent progress in superhydrophobic and superamphiphobic coatings for corrosion protection of aluminum alloys. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 6(3), 87.
42. Sandelowski, M., & Barroso, J. (2007). *Handbook for synthesizing qualitative research*. New York: Springer.
43. Sørensen, P. A., Kiil, S., Dam-Johansen, K., & Weinell, C. E. (2009). Anticorrosive coatings: A review. *Journal of Coatings Technology and Research*, 6(2), 135-176.

پیوست الف: فهرست منابع مورد استفاده در فراترکیب (۲۶ سند)

این پیوست شامل فهرست کامل ۲۶ منبع علمی و استاندارد بین‌المللی است که در فرآیند فراترکیب (مرور نظام‌مند) مورد بررسی و کدگذاری قرار گرفته‌اند. منابع بر اساس نوع (مقاله علمی / استاندارد / گزارش فنی) و سال انتشار دسته‌بندی شده‌اند.

جدول الف-۱. فهرست مقالات علمی بررسی شده (۱۴ مقاله)

ردیف	نویسنده/نویسندگان	سال انتشار	عنوان	نام مجله/منبع
۱	Ashrafi, A., Shariati, M., & Farid, A.	۲۰۱۵	Corrosion mapping of Iran using ISO 9223 standard	Journal of Corrosion Science and Engineering
۲	Asadi, N., Azimi, M., & Ramezanzadeh, B.	۲۰۱۹	Development of an expert system for selection of appropriate coating system	Journal of Failure Analysis and Prevention
۳	Karbasi, M., Jafari, H., & Yeganeh, M.	۲۰۲۱	Corrosion behavior of epoxy coating in freeze-thaw cycles	Corrosion Engineering Science and Technology
۴	Liu Y., Wang H., & Zhang X.	۲۰۲۲	Chloride diffusion coefficient of organic coatings in marine environment	Journal of Coatings Technology and Research
۵	Morcillo, M., Chico, B., Alcántara, J., et al.	۲۰۱۹	Atmospheric corrosion of mild steel in chloride-rich environments	Materials
۶	Mousavi, M., Moradian, S., & Tahmasebi, N.	۲۰۱۹	Investigating the synergistic effect of simultaneous UV irradiation and high humidity	Progress in Organic Coatings
۷	Saji, V. S.	۲۰۲۰	Recent progress in superhydrophobic coatings for corrosion protection	Journal of Bio- and Tribo-Corrosion

۸	Sørensen, P. A., Kiil, S., Dam-Johansen, K., & Weinell, C. E.	۲۰۰۹	Anticorrosive coatings: A review	Journal of Coatings Technology and Research
۹	Momber, A. W.	۲۰۱۸	Hydroblasting and coating of steel structures	Elsevier
۱۰	Koch, G., Varney, J., Thompson, N., et al.	۲۰۱۶	International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study	NACE International
۱۱	Bodington, A., Ruiz-Aparicio, A., Murdoch, C., & Chang, B. T. A.	۲۰۲۴	Critical Review of ISO 12944-9 and AMPP TM21612 Coating Qualification Standards Using Field Data to Compare	AMPP Annual Conference
۱۲	Al-Borno, A., Islam, M., Pedraza, H., & Ahmed, E.	۲۰۲۶	Corrosion under Insulation in Marine Pipelines: A Literature Review on Coating Performance and Qualification Standards	AMPP Annual Conference
۱۳	Kunce, I.	۲۰۲۳	Powder coatings in anti-corrosion applications of steel structures – an attempt to adapt the requirements to the scheme of the PN-EN ISO 12944 standard	Ochrona przed Korozją
۱۴	Han, B., Liu, J., & Li, A.	۲۰۱۸	Comparative Analysis on Technical Standards in Fusion Bonded Epoxy Anticorrosion Coating of Steel Pipe	Corrosion & Protection (FSYFH)

جدول الف-۲. فهرست استانداردهای بین‌المللی بررسی شده (۱۲ استاندارد)

ردیف	مرجع استاندارد	سال انتشار	عنوان استاندارد	سازمان تدوین‌کننده
۱	ISO 9223:2012	۲۰۱۲	Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation	ISO
۲	ISO 12944-1:2017	۲۰۱۷	Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures – Part 1: General introduction	ISO

۳	ISO 12944-2:2017	۲۰۱۷	Part 2: Classification of environments	ISO
۴	ISO 12944-5:2019	۲۰۱۹	Part 5: Protective paint systems	ISO
۵	ISO 12944-9:2018	۲۰۱۸	Part 9: Protective paint systems for offshore and related structures	ISO
۶	ISO 8501-1:2007	۲۰۰۷	Preparation of steel substrates – Visual assessment of surface cleanliness	ISO
۷	ISO 8502-9:2020	۲۰۲۰	Field method for conductometric determination of water-soluble salts	ISO
۸	ISO 8503-2:2012	۲۰۱۲	Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel	ISO
۹	ISO 19840:2012	۲۰۱۲	Measurement of dry film thickness and acceptance criteria	ISO
۱۰	ISO 4628-1:2016	۲۰۱۶	Assessment of degradation of coatings – Designation of defects	ISO
۱۱	ASTM B117-19	۲۰۱۹	Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus	ASTM
۱۲	NACE SP0188-2018	۲۰۱۸	Discontinuity (holiday) testing of new protective coatings	NACE

Research paper

Presenting a Conceptual Framework for Climate-Based Multi-Layer Standardization of Anti-Corrosion Coatings in Iran: A Meta-Synthesis Approach

Babak Ghorbani¹

1. Material Engineering Group, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

Received:14/06/2026

Accepted:27/07/2026

Abstract

The present study aims to develop a climate-based multi-layer standardization framework for anti-corrosion coatings in Iran. This research is applied-developmental in terms of objective and sequential exploratory mixed-method (quantitative-qualitative) in nature. In the qualitative phase, using a meta-synthesis approach and a systematic review of 26 reliable sources, including scientific articles and international standards, 30 initial codes were extracted. These codes were organized into five main categories: climate and environmental corrosivity classification; coating system selection and design standards; standard quality control tests; surface preparation and applicator competency; and standardization system and conformity assessment. In the quantitative phase, a questionnaire with 30 items was designed and distributed to 85 experts. Data from 72 questionnaires were analyzed using structural equation modeling (SEM) with SmartPLS version 4 software. The findings showed that all six research hypotheses were confirmed at a 99% confidence level, and the model fit indices (SRMR = 0.088, NFI = 0.93, RMSEA = 0.051, GFI = 0.91) were within acceptable ranges. The highest path coefficient belonged to the effect of climatic conditions on design standards (0.842), and the lowest to the effect of quality control tests on the conformity assessment system (0.274). Based on the findings, it is recommended that Iran's National Corrosivity Map be developed, a database of approved coating systems for each climate be established, and the contractor qualification system be revised based on the identified components.

Keywords: Standardization, Anti-corrosion coatings, Climate-based, Meta-synthesis, Structural equation modeling

¹ ghorbanian.babak@hut.ac.ir