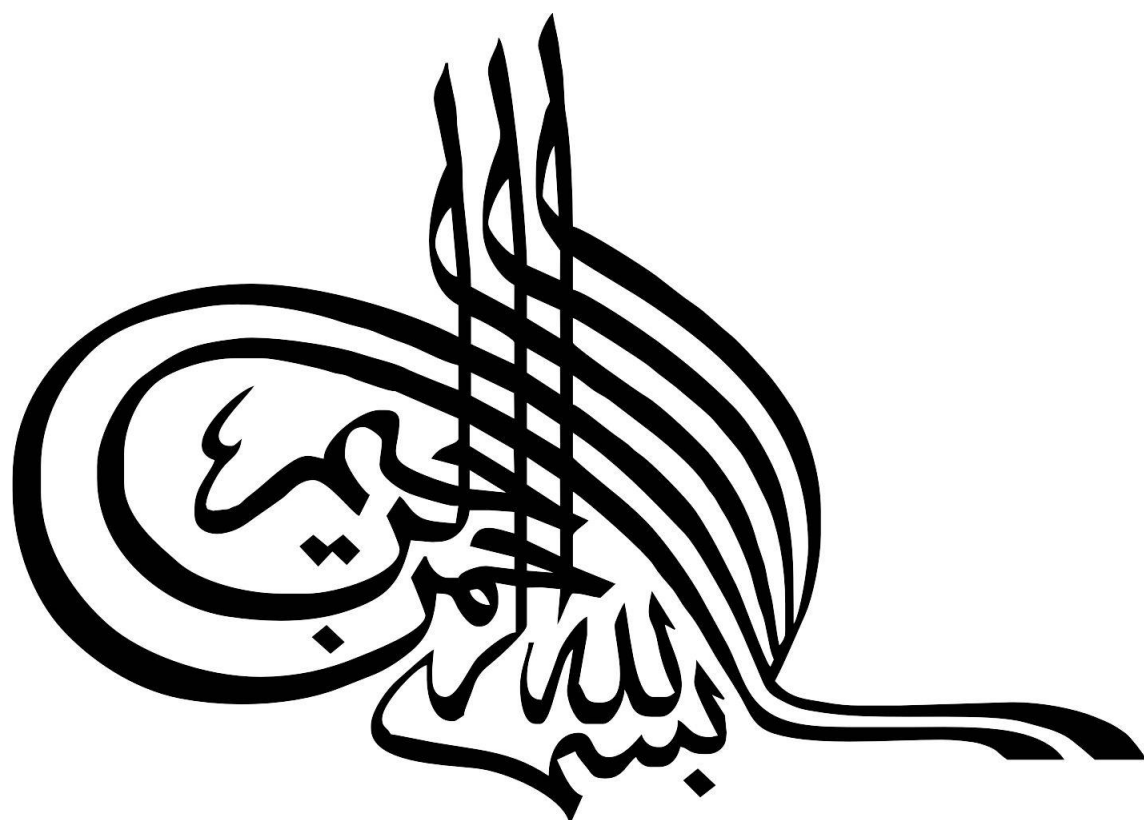






دانشکده: مکانیک
گروه: مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد

موضوع:

روشی جدید جهت تشخیص عیب لایه‌ای شدن در کاشی با استفاده از امواج فراصوت

نگارش:

محمدعلی اکبریان ترک آباد

استاد راهنما:

دکتر علیرضا احمدی فرد

دکتر حسین خسروی

استاد مشاور:

دکتر امیر جلالی

تابستان ۱۳۹۳



دانشگاه علمی کاربردی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمدعلی اکبریان ترک آباد رشته مهندسی مکترونیک گرایش مکترونیک تحت عنوان روشی جدید جهت تشخیص عیب لایه‌ای شدن در کاشی با استفاده از امواج فراصوت که در تاریخ ۱۳۹۳/۰۶/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود	☐ دفاع مجدد	☒ قبول (با درجه : خوب - امتیاز: ۱۷,۸)
--------------------------------	------------------------------------	---

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

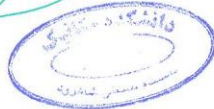
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	علیرضا احمدی فرد	استادیار	
۲- استاد راهنما	حسین خسروی	استادیار	
۳- استاد مشاور	امیر جلالی	استادیار	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مهدی بامداد	استادیار	
۵- استاد ممتحن	حمید حسن پور	استاد	
۶- استاد ممتحن	حبیب احمدی	استادیار	

رئیس دانشکده: محمد محسن شاه مردان

امضاء

ش. مردان



سپاسگزاری

من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق

سپاس بیکران خداوند قادر مطلق را که همواره در تمام مراحل زندگی و از جمله در انجام این تحقیق یار و یاور من بوده است. در به نتیجه رسیدن این تحقیق، خود را مدیون زحمات و مساعدت‌های عزیزان بسیاری می‌دانم که بی‌تردید، بدون همکاری و پشتیبانی ایشان، امکان به ثمر رسیدن مطلوب آن وجود نمی‌داشت. لذا بر خود لازم می‌دانم بدین‌وسیله زحماتشان را ارج نهاده و از همه آن‌ها صمیمانه قدردانی و تشکر نمایم.

هر کجا نقطه‌ای و دایره‌ای است قصه‌ای هم زیر پرگار است

رو، که اول حدیث پایه‌کنند هر کجا گفتگوی دیوار است (برون اقصای)

- اساتید راهنمای دلسوز و بزرگووارم، جناب آقای دکتر احمدی‌فرد و دکتر خسروی، که بی‌شک راهنمایی‌های ارزنده، دانش و دلسوزی‌های ایشان سبب به انجام رسیدن این تحقیق شده است و این حقیر در این راه از دانش و راهنمایی‌های ایشان بهره بسیار برده‌ام اساتیدی که در بسیاری از جنبه‌ها از جمله علمی، اخلاقی، معنوی و اجتماعی الگو و راهنما بودند.
 - استاد مشاور بزرگووارم، جناب دکتر جلالی، که با قبول زحمت مشاوره این تحقیق، در رفع نقایص و مشکلات علمی از هیچ کوششی فروگذار نکردند.
 - دوستان عزیز و گرامی، آقایان محمد حسن قیصریه‌ها، اکبر امیرشکوری، آقای کلانتری و آقای ضیغمی به خاطر همکاری در طول مراحل تحقیق و همچنین بسیاری از عزیزانی که در اینجا امکان تشکر از تک‌تک ایشان مقدور نیست، صمیمانه سپاس‌گذاری می‌کنم.
 - و نه در پایان، بلکه از آغاز تا پایان زندگی، خودم را مدیون زحمات پدر و مادر مهربانم می‌دانم که فداکارانه عمر خود را در راه پیشرفت و ترقی من صرف نمودند و همسر مهربانم که با صبر و حوصله مشوق و همراه من بوده و هست. همچنین از برادران و خواهران عزیزم و خانواده همسرم که در تمام این سال‌ها مهربانانه پشتیبان و مشوق من بوده‌اند، قدردانی می‌نمایم.
- محمدعلی اکبریان ترک‌آباد

شهریور ۱۳۹۳

تعهد نامه

اینجانب محمدعلی اکبریان ترک آباد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکاترونیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه روشی جدید جهت تشخیص عیب لایه‌ای شدن در کاشی با استفاده از امواج فراصوت تحت راهنمایی علیرضا احمدی فرد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ: ۱۳۹۳/۰۶/۲۴

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده فارسی:

خودکارسازی فرایند تشخیص عیوب محصولات در کارخانه‌ها، اقدام مهمی در جهت بهبود کیفیت، کاهش نیروی انسانی و ارتقاء رضایت مشتریان است. در کارخانه‌های تولید کاشی، یک عیب اساسی که گاهی با چشم هم به خوبی شناسایی نمی‌شود، مشکل لایه‌ای شدن کاشی است که به سبب باقیماندن هوا در لایه‌های داخلی کاشی به وجود می‌آید. این مشکل هر چه سریع‌تر در خط تولید شناسایی شود، هزینه‌های کمتری را در بر خواهد داشت. در این پایان‌نامه، با استفاده از امواج فراصوت، روشی هوشمند به منظور تشخیص عیب لایه‌ای قبل از پخت کامل کاشی، ارائه شده است. در ابتدا با استفاده از مولد امواج فراصوت و حس‌گر دریافت‌کننده امواج، یک مجموعه ۵۴۶ تایی از سیگنال‌های فراصوت عبوری از کاشی‌های سالم و معیوب تهیه شد. سپس با استفاده از تبدیل فوریه سریع و بسته موجک، ویژگی‌های مناسبی را از نمونه سیگنال‌ها استخراج کرده و برای آموزش به طبقه‌بندهای مختلف داده شد. برای یافتن طبقه‌بند مناسب از چندین طبقه‌بند به‌طور همزمان استفاده شد تا علاوه بر مقایسه عملکرد هر کدام بتوان در صورت نیاز از ترکیب طبقه‌بندها برای افزایش دقت بازشناسی استفاده کرد. طبقه‌بندهای استفاده‌شده شامل: MLP، K-NN، LVQ، Beysian و SVM است که با داشتن تفاوت در روش، از دقت خوبی برخوردارند. در انتها نیز از روش انتگرال سوگنو برای ترکیب نتایج طبقه‌بندها استفاده شده که نتایج بازشناسی را تا ۱۰۰ درصد افزایش داده است.

کلیدواژه‌ها

کاشی و سرامیک، عیوب داخلی، لایه‌ای شدن، آزمون فراصوت، طبقه‌بندی، انتگرال سوگنو

فهرست مطالب

۱ مقدمه ۱

۱.۱	مقدمه	۲
۲.۱	کاشی و سرامیک	۲
۳.۱	مراحل ساخت کاشی	۳
۴.۱	عیوب کاشی	۸
۱.۴.۱	عیوب ظاهری	۸
۲.۴.۱	عیوب ابعادی	۹
۳.۴.۱	عیوب ساختاری	۹
۵.۱	عیب لایه‌ای	۱۰
۱.۵.۱	کاهش رطوبت گرانول	۱۱
۲.۵.۱	تغییر دانه‌بندی گرانول	۱۱
۳.۵.۱	کاهش زمان پرس	۱۲
۴.۵.۱	خاصیت الاستیسیته مواد	۱۲
۶.۱	دلایل نیاز به خودکارسازی	۱۲
۷.۱	هدف این پایان‌نامه	۱۳
۸.۱	ساختار پایان‌نامه	۱۳

۲ مروری بر کارهای گذشته ۱۵

۱.۲	مقدمه	۱۶
۱.۱.۲	تشخیص عیوب ظاهری	۱۶
۲.۱.۲	تشخیص عیوب داخلی با استفاده از آزمون فراصوت	۱۸

۳ روش‌ها، تئوری‌ها و الگوریتم‌های اولیه ۲۱

۱.۳	مقدمه	۲۲
۲.۳	روش‌های مختلف استخراج ویژگی از سیگنال	۲۲
۱.۲.۳	تبدیل فوریه سریع	۲۲
۲.۲.۳	بسته موجک	۲۴
۳.۳	معرفی روش‌های مختلف طبقه‌بندی	۲۵
۱.۳.۳	طبقه‌بند نزدیک‌ترین همسایگی	۲۵
۳.۳.۳	شبکه عصبی LVQ	۳۱
۳.۳.۳	ماشین بردار پشتیبان	۳۳
۴.۳.۳	بیزین	۳۴
۴.۳	روش‌های مختلف برای ترکیب نتایج طبقه‌بندها	۳۶
۱.۴.۳	مروری بر ترکیب طبقه‌بندها	۳۶
۲.۴.۳	الگوهای ترکیب	۳۸
۵.۳	دستگاه آزمون فراصوت بتن	۴۲
۶.۳	اوسیلوسکوپ	۴۳
۷.۳	نتیجه‌گیری	۴۴

۴ استخراج ویژگی و شبیه‌سازی ۴۵

۱.۴	مقدمه	۴۶
۲.۴	تهیه مجموعه داده	۴۶
۱.۲.۴	آزمون‌های مخرب	۴۷
۲.۲.۴	آزمون‌های غیر مخرب	۴۷

۳.۴	آنالیز ظاهری سیگنال	۵۲
۴.۴	طبقه‌بندی با استفاده از باند میانی سیگنال	۵۷
۵.۴	تعیین محدوده زمانی باارزش سیگنال	۵۷
۶.۴	استخراج ویژگی با بسته موجک	۶۳
۷.۴	ترکیب اطلاعات	۶۶
۲.۷.۴	رویکردهای ترکیب طبقه‌بندها	۶۷

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۷۱

۱.۵	جمع‌بندی	۷۲
۲.۵	پیشنهادهای	۷۳

منابع ۷۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نمایی از خشک کن استوانه‌ای و تجهیزات جانبی به ارتفاع ۲۵ متر..... ۵
- شکل ۲-۱: نمایی از پرس پنج قالب با نیروی ۱۵۰۰ تن..... ۶
- شکل ۳-۱: نمونه یک بیسکوئیت معیوب..... ۱۰
- شکل ۴-۱: گرانول با قطر زیاد (A)، متوسط (B) و کم (C) [۴]..... ۱۱
- شکل ۱-۳: اعمال تبدیل فوریه زمان کوتاه به ازای اعمال پنجره‌های مستطیلی با همپوشانی ۵۰ درصد..... ۲۴
- شکل ۲-۳: نمایش اعمال تبدیل بسته موجک به سیگنال اولیه تا سه مرحله..... ۲۵
- شکل ۳-۳: نحوه محاسبه تعلق نمونه q به کلاس‌های مختلف در الگوریتم KNN..... ۲۷
- شکل ۴-۳: ساختار پرسپترون با یک نرون..... ۲۸
- شکل ۵-۳: نمونه‌هایی از توابع فعال‌ساز در شبکه‌های عصبی..... ۲۸
- شکل ۶-۳: ساختار کلی بهینه‌سازی وزن‌های شبکه عصبی..... ۳۱
- شکل ۷-۳: شبکه LVQ..... ۳۲
- شکل ۸-۳: ابرصفحه‌های مختلف برای تفکیک دو کلاس به همراه ابرصفحه تفکیک کننده بهینه برای داده‌های
دو بعدی..... ۳۳
- شکل ۹-۳: تشکیل ماتریس پروفایل تصمیم..... ۳۹
- شکل ۱۰-۳: نمایی شماتیک از عملکرد انتگرال‌های فازی سوگنو..... ۴۲
- شکل ۱۱-۳: دستگاه آزمون بتن در حال نشان دادن زمان عبور سیگنال (حالت استاندارد)..... ۴۳
- شکل ۱۲-۳: اوسیلوسکوپ مدل GDS-1052-U، استفاده شده جهت آشکارسازی سیگنال..... ۴۴
- شکل ۱-۴: تصویری از طرح پشت کاشی و محل‌های نمونه‌گیری (نقاط دایره‌ای)..... ۴۹
- شکل ۲-۴: دستگاه طراحی شده برای نمونه‌گیری..... ۵۲
- شکل ۳-۴: سیگنال زمانی عبوری از کاشی..... ۵۳

- شکل ۴-۴: تصویر خروجی نمایشگر از سیگنال زمانی عبوری از کاشی سالم (الف) و کاشی معیوب (ب)..... ۵۳
- شکل ۴-۵: تبدیل فوریه گرفته شده از کاشی سالم (الف) و کاشی معیوب (ب)..... ۵۴
- شکل ۴-۶: سیگنال تجزیه شده به باندهای مختلف فرکانسی توسط آنالیز موجک ۵۵
- شکل ۴-۷: سیگنال باند میانی برای کاشی معیوب در حوزه زمان ۵۵
- شکل ۴-۸: سیگنال باند میانی برای کاشی سالم در حوزه زمان..... ۵۶
- شکل ۴-۹: سیگنال باند میانی نمونه های سالم و معیوب..... ۵۶
- شکل ۴-۱۰: نتایج ماتریس max برای پنجره لغزان با عرض ۶۰۰ برای طبقه بندیهای مختلف ۵۹
- شکل ۴-۱۱: بهترین جواب برای هر عرض مشخص ۵۹
- شکل ۴-۱۲: نتایج مرتب شده برای کل نمونه ها و طبقه بندیها ۶۱
- شکل ۴-۱۳: رویکردهای مختلف برای ایجاد گوناگونی لازم در ترکیب طبقه بندیها ۶۸

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: زمان بندی مراحل تولید ۸
- جدول ۱-۴: نتایج اولیه طبقه بندی با باندهای مختلف سیگنال ۵۷
- جدول ۲-۴: نتایج طبقه بندی با پنجره با عرض ۲۹۵۰ با مرکز ۲۱۰۰ که بهترین جواب طبقه بند MLP را به همراه داشته است. ۶۰
- جدول ۳-۴: نتایج طبقه بندی با پنجره با عرض ۶۰۰ با مرکز ۳۰۰ که بهترین جواب طبقه بند KNN را به همراه داشته است. ۶۰
- جدول ۴-۴: نتایج طبقه بندی با پنجره با عرض ۸۰۰ با مرکز ۲۵۰۰ که بهترین جواب طبقه بند LVQ را به همراه داشته است. ۶۰
- جدول ۵-۴: نتایج طبقه بندی با پنجره با عرض ۲۳۰۰ با مرکز ۲۷۵۰ که بهترین جواب طبقه بند Bayesian را به همراه داشته است. ۶۱
- جدول ۶-۴: بهترین نتایج طبقه بند MLP از چپ به راست ۶۲
- جدول ۷-۴: بهترین نتایج طبقه بند KNN به ترتیب از چپ به راست ۶۲
- جدول ۸-۴: از چپ به راست به ترتیب بهترین نتایج LVQ ۶۲
- جدول ۹-۴: بهترین نتایج Bayesian از چپ به راست ۶۲
- جدول ۱۰-۴: نتایج حاصل از طبقه بندی در چهار نوبت ۶۴
- جدول ۱۱-۴: نتایج حاصل از طبقه بندی با سطوح مختلف بسته مویک ۶۴
- جدول ۱۲-۴: طبقه بندی با سطوح بهینه هر طبقه بند ۶۶
- جدول ۱۳-۴: نتایج طبقه بندی با انتگرال فازی سو گنو ۶۹
- جدول ۱۴-۴: نتایج طبقه بندی با انتگرال فازی سو گنو بهینه شده ۶۹
- جدول ۱۵-۴: مقادیر بهینه شده چگالی های فازی ۷۰

فصل اول

۱ مقدمه

۱.۱ مقدمه

امروزه در سراسر جهان از مواد سرامیکی به‌طور وسیع برای پوشش کف و بدنه ساختمان‌ها استفاده می‌شود. در کاربردهای صنعتی نیز از این مواد برای ایجاد لایه‌ای محافظ در برابر سایش و خوردگی و ... استفاده می‌شود. کشور ما به دلیل داشتن منابع خاک مورد نیاز کاشی و سرامیک و تولید بیش از ۵ درصد محصولات سرامیکی دنیا از جایگاه خوبی در این صنعت برخوردار است. در این بین استان یزد با داشتن بیش از ۴۰ درصد تولیدات کاشی و سرامیک کشور از جایگاه ویژه‌ای در این صنعت برخوردار است. این محصول از جمله محصولاتی است که بعد از تولید با توجه به کیفیت آن درجه‌بندی و به بازار عرضه می‌شود. بدیهی است که با افزایش درجه که متناسب با کاهش کیفیت است قیمت محصول به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. اگر درجه‌بندی به هر دلیلی به‌درستی صورت نگیرد؛ باعث تحمیل هزینه‌های بالا شده و از اعتبار کارخانه در بازار می‌کاهد.

با توجه به سهم تولید ایران در منطقه و ارتباط مستقیم کیفیت و قیمت عرضه این محصول، لزوم سرمایه‌گذاری در بخش کنترل کیفی کارخانه‌های تولید کاشی و سرامیک به‌خوبی احساس می‌شود. بعلاوه به دلیل سرعت بالای خطوط تولید و وجود خطاهای انسانی لازم است تا به سمت خودکارسازی فرایند تولید و کنترل کیفیت حرکت کرد. در همین راستا و به‌منظور خودکارسازی در پژوهش حاضر به تشخیص عیب داخلی پرداخته شده است.

در ابتدای کار به‌منظور آشنایی بیشتر با فرایند تولید این محصول به معرفی کاشی و سرامیک پرداخته و سپس فرایند تولید به‌طور مختصر شرح داده می‌شود و درنهایت به دلایل ایجاد عیب لایه‌ای در کاشی و سرامیک اشاره کرده و در انتها با توجه به مطالب این فصل نتیجه‌گیری می‌شود.

۲.۱ کاشی و سرامیک

کلمه کاشی (Tile) از کلمه لاتین Tegula گرفته شده که مترادف کلمه فرانسوی Tuile می‌باشد؛ به

معنای گل پخته و کلمه انگلیسی Tile نیز به معنای پوشش بر روی ساختمان است. کاشی از دو قسمت بدنه و لعاب تشکیل شده است. قسمت بدنه از جنس خاک رس بوده و استحکام کاشی برای نصب تأمین می‌کند. لعاب، قسمت روی کاشی است که سطح صیقلی و شفاف را به کاشی برای زیبایی، تمیزی و بهداشت می‌دهد. کاشی معمولاً برای پوشش دیوار مکان‌هایی که نیاز به بهداشت و شست‌وشو با آب دارند، استفاده می‌شود.

کلمه سرامیک (Ceramic) نیز از ریشه یونانی آن یعنی کراموس (Keramos) گرفته شده به معنای سفالگری (Pottery) و چیزی که سوخته شود. سرامیک هم دارای قسمت‌های بدنه و لعاب می‌باشد؛ ولی قسمت بدنه آن از مواد سیلیسی و سخت تشکیل می‌شود و لعاب آن هم دارای موادی سخت و محکم‌تر نسبت به لعاب کاشی است. از سرامیک برای پوشش کف مکان‌های بهداشتی، کف سالن‌های پذیرایی، کف اتاق خواب و ... استفاده می‌شود. به علت استحکام و مقاومت بهتر آن نسبت به کاشی، بیشتر در قسمت کف پوش استفاده می‌شود.

سرامیک‌ها ویژگی‌هایی منحصربه‌فردی دارند که از آن‌ها موادی پرکاربرد و پرتعداد ساخته است [۱]. این مواد به علت شکل‌گیری در فشار بالا، دارای خلل و فرج داخلی صفر و یا نزدیک به صفر هستند. همچنین دارای استحکام و مقاومت مکانیکی بالا، سختی زیاد و مقاوم در برابر مواد شیمیایی و ... بوده و دارای سطحی براق هستند که با رنگ و لعاب شیشه‌ای صیقلی پوشیده شده است [۲]. در ادامه کار هرکجا کلمه کاشی به کار برده شود منظور کاشی و سرامیک است چراکه در روند ساخت آن‌ها تفاوتی وجود نداشته و دارای عیوب و راه تشخیص مشترک هستند.

۳.۱ مراحل ساخت کاشی

برای رسیدن به دید مناسب جهت درک موضوع نیاز است تا از فرایند تولید کاشی و سرامیک اطلاعات کافی در اختیار داشت تا هم اصطلاحات به کار برده شده را بهتر درک کرد و هم به ضرورت و اهمیت موضوع نیز واقف شد. در ادامه به اختصار آن را شرح داده می‌شود.

به‌طور کلی می‌توان مراحل ساخت کاشی را به چند دسته کلی تقسیم کرد:

۱- آماده‌سازی خاک

اولین واحد در فرایند تولید کاشی، آماده کردن خاک مورد نیاز جهت تولید بدنه کاشی و سرامیک است. در ابتدا خاک مورد نیاز به‌صورت سنگ از معادن مختلف استخراج و در انبار مواد اولیه کارخانه انباشته می‌شود و به ترتیب توسط دو سنگ‌شکن فکی و چکشی به‌صورت پودر با دانه‌بندی ریز تبدیل می‌شود و سپس در آسیاب گلوله‌ای همراه با اضافه کردن آب به صورت دوغابی با دانه‌بندی (در حد میکرون) می‌رسد. برای استفاده این مواد در مرحله پرس نیاز است تا رطوبت اضافی آن گرفته شود و به دانه‌هایی کروی با دانه‌بندی مشخص و مختلف تبدیل شوند. قطر دانه‌ها در این مرحله در حد میلی‌متر است. برای تبدیل دوغاب به دانه‌های خاک از خشک‌کن استوانه‌ای^۱ که دارای ارتفاع و قطر زیادی است؛ استفاده می‌شود (شکل ۱-۱). در این دستگاه دوغاب از میانه استوانه توسط نازل‌هایی با فشار زیاد از پایین به سمت بالای استوانه پاشیده شده و همزمان هوای گرم تولیدشده توسط مشعل از بالای استوانه به سمت پایین دمیده می‌شود. در نهایت دانه‌های کروی گرانول^۲ در پایین استوانه جمع‌آوری و به مخازنی جهت مصرف روزانه منتقل می‌شود. تنظیم قطر دانه‌ها که توسط قطر سوراخ و فشار نازل تنظیم می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین دلیل در فواصل زمانی مشخص از محصول به‌صورت دستی نمونه‌برداری شده و در آزمایشگاه میزان رطوبت و قطر آن را اندازه‌گیری و کنترل می‌کنند.

^۱ Spray-dried

^۲ Granul

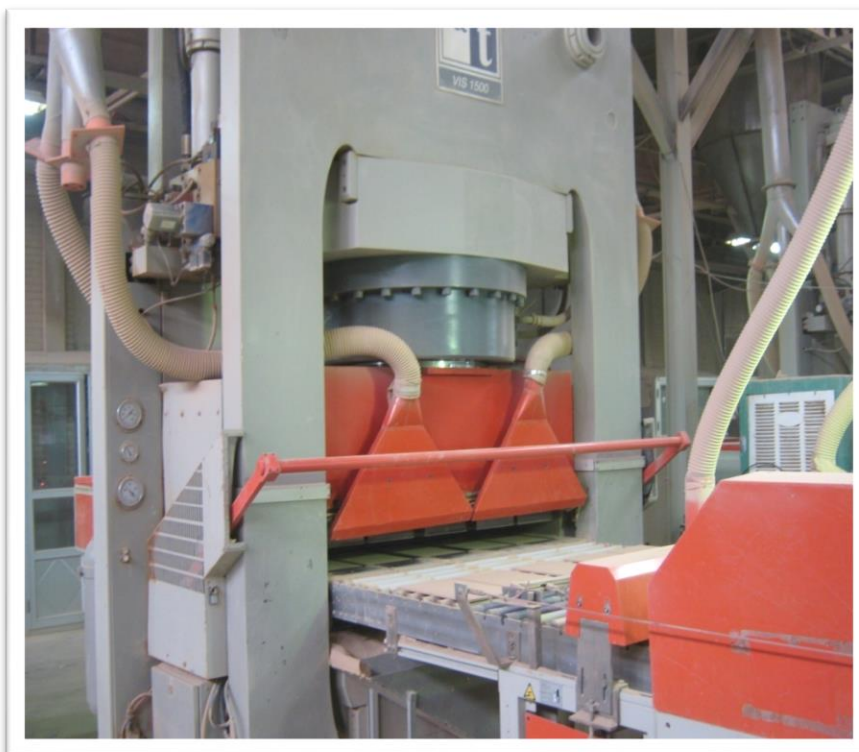


شکل ۱-۱: نمایی از خشک‌کن استوانه‌ای و تجهیزات جانبی به ارتفاع ۲۵ متر

۲- واحد پرس و شکل‌دهی

گرانول تولیدشده، توسط لوله‌هایی به داخل قالب‌های شکل‌دهی منتقل می‌شود و توسط صفحه‌ای به‌طور یکنواخت و به میزان تعیین‌شده داخل قالب‌ها قرار می‌گیرد؛ صفحه‌ی بالایی قالب (ماتریس) که به یک پرس هیدرولیک با قدرت ۱۵۰۰ تن متصل است (شکل ۱-۲)، گرانول موجود در قالب را فشرده کرده و بدنه کاشی را شکل می‌دهد. به دلیل شکل هندسی گرانول (کروی بودن) هنگامی که دانه‌های آن کنار یکدیگر قرار می‌گیرد فاصله‌ای هوایی میان دانه‌ها به وجود می‌آید، برای رسیدن به تراکم مورد نیاز و جلوگیری از ایجاد تخلخل و ترک در بدنه لازم است تا هوای بین دانه‌ها از قالب خارج شود، برای رسیدن به این هدف فرایند شکل‌دهی در پرس طی دو مرحله صورت می‌پذیرد:

در **مرحله اول** ضربه‌ای اولیه وارد شده اجازه داده می‌شود تا هوا از لبه‌های قالب خارج شود. بعد از آن **مرحله دوم** آغاز می‌شود که در این مرحله ضربه نهایی وارد شده و بدنه کاشی شکل می‌گیرد. این دو مرحله در کسری از ثانیه اتفاق می‌افتد. کاشی‌ها به منظور تأمین استحکام اولیه، وارد خشک‌کن می‌شوند. دمای خشک‌کن حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت‌زمان عبور کاشی از آن حدود یک ساعت است.



شکل ۱-۲: نمایی از پرس پنج قالب با نیروی ۱۵۰۰ تن

۳- لعاب و چاپ

بیسکوئیت (کاشی خام) تولیدشده در ادامه‌ی خط تولید وارد قسمت لعاب می‌شود. در ابتدای این قسمت به کمک فرچه‌ای با سرعت دورانی بالا و دمیدن هوا، سطح کاشی از پلیسه و آشغال تمیز می‌شود و کاشی وارد محفظه آب شده تا به وسیله نازل‌هایی مخلوط آب و هوا، به صورت پودر به طور یکنواخت روی سطح کاشی پاشیده شود؛ تا ضمن کاهش دمای سطح کاشی، حفره‌های سطح را پر کرده و از بروز حفره و ترک سطحی در مراحل بعد جلوگیری شود. در ادامه کار یک لایه لعاب مات^۱ به عنوان آستر روی سطح کاشی قرار می‌گیرد؛ تا ضمن ایجاد بستری مناسب جهت چسبیدن لعاب اصلی، رنگ قهوه‌ای زمینه بیسکوئیت نیز پوشیده شود. سپس لعاب اصلی با همان شیوه قبل روی سطح بیسکوئیت قرار می‌گیرد. این لعاب به سطح کاشی حالتی براق و صیقلی می‌دهد.

^۱ Engob

برای جلوگیری از جدا شدن چاپ روی کاشی و بروز عیب چسبندگی طرح، قبل از چاپ، کاشی وارد محفظه چسب می‌شود. در این واحد به وسیله نازل‌هایی مخلوط آب و چسب به‌طور یکنواخت روی سطح قرار می‌گیرد. بعد از این مرحله، سطح اصلی بیسکوئیت آماده پذیرش طرح شده است. عمل چاپ طرح بر روی سطح کاشی با یکی از سه روش: چاپ تخت، غلتکی و یا دیجیتال صورت می‌گیرد. در نهایت به‌منظور تثبیت طرح و براق‌سازی، یک‌لایه لعاب شیشه‌ای شفاف روی کاشی قرار می‌گیرد. پس از آن کاشی آماده‌ی ورود به کوره است؛ ولی جهت جلوگیری از چسبندگی پشت کاشی به غلتک‌های کوره به کمک فرچه‌هایی دوار سطح زیرین کاشی را نیز به لعاب آغشته می‌کنند. با توجه به رطوبتی که در سطح کاشی در مراحل لعاب و چاپ ایجاد شده، احتمال بروز ترک و انحنای در سطح کاشی در مرحله پخت وجود دارد؛ به همین دلیل نیاز است تا کاشی را به مدت حداقل ۸ ساعت در هوای آزاد نگهداری کنند.

۴- پخت و کوره

کوره‌ها صرف‌نظر از اینکه دارای چندطبقه و چه نوعی باشند از سه قسمت شامل: پیش گرم، جهنم و سردکن، که در امتداد هم قرار دارند؛ تشکیل شده‌اند. طرح روی کاشی طی عبور از این سه قسمت تثبیت شده و بدنه آن نیز به استحکام موردنیاز خود می‌رسد. در هنگام عبور کاشی از مراحل مختلف کوره که طول آن بیش از ۱۰۰ متر است و حدود ۲۰ دقیقه به طول می‌انجامد، تغییر دما باید به آرامی و یکنواخت انجام شود تا از ایجاد ترک و انحنای در بدنه کاشی جلوگیری به عمل آید، پس از خروج کاشی از کوره تا زمانی که به دمای محیط برسد و نوبت به بسته‌بندی آن‌ها شود، حداقل ۲۴ ساعت در هوای آزاد نگهداری می‌شود.

۵- بسته‌بندی

در خط بسته‌بندی ابتدا سطح ظاهری کاشی توسط نیروی انسانی ماهر مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورت مشاهده عیب ظاهری در سطح کاشی، بسته به میزان و نوع عیب از ۱ تا ۵ درجه‌بندی می‌شود. سپس با استفاده از یک سیستم اندازه‌گیر دقیق، ابعاد و انحنای سطح کاشی را تعیین کرده و با توجه به

میزان انحراف از استاندارد تعیین شده برای ابعاد و در نظر گرفتن درجه‌ای که کارگر مشخص کرده، درجه‌بندی اصلی به صورت خودکار انجام شده و هر کاشی در بسته‌بندی مربوط به درجه خود قرار می‌گیرد. در این مرحله فقط عیوب ظاهری و ابعادی کاشی بررسی می‌شود و عیوب ساختاری آن قابل تشخیص نیست.

جدول ۱-۱ ترتیب و زمان‌بندی فرایند تولید را به جهت درک فرایند تولید نشان می‌دهد؛ ذکر این جدول به این دلیل است که بتوان در مورد اینکه در کدام مرحله باید به تشخیص عیب پرداخت تصمیم‌گیری بهتری انجام داد.

جدول ۱-۱: زمان‌بندی مراحل تولید

مرحله	زمان
آماده‌سازی خاک	۲۴ ساعت
پرس	۳ دقیقه
خشک‌کن	۶۰ دقیقه
لعاب و چاپ	۲ دقیقه
نگهداری در فضای آزاد	۸ ساعت
پخت	۳۰ دقیقه
نگهداری در هوای آزاد	۱۲ تا ۲۴ ساعت
درجه‌بندی و بسته‌بندی	۱ دقیقه

۴.۱ عیوب کاشی

به‌طور کلی عیوب کاشی و سرامیک را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد:

۱.۴.۱ عیوب ظاهری

عیوب ظاهری کاشی به عیوبی گفته می‌شود که بر روی سطح اصلی کاشی به وجود آمده و از فاصله

یک متری با چشم غیرمسلح قابل مشاهده باشد. این عیوب شامل: عیب لعاب برگشتی، پین هول^۱، لب پریدگی، شره رنگ، تغییر رنگ (طیف رنگ)، چسبندگی طرح، عیوب مربوط به چاپ، ترک، مواد زائد سطحی و ... می باشد. در حال حاضر در داخل کشور این عیوب توسط نیروی انسانی تشخیص داده می شود. البته مقالات زیادی در راستای هوشمندسازی و تشخیص این عیوب با استفاده از روش های پردازش تصویر و الگوریتم های هوشمند طبقه بندی در داخل و خارج از کشور منتشر شده است.

۲.۴.۱ عیوب ابعادی

عیوب ابعادی در انتهای خط تولید، توسط دستگاه های اندازه گیر لیزری، با دقت خوبی اندازه گیری و تشخیص داده می شود. در این دستگاه نور لیزر به سطح کاشی تابانده و زمان بازگشت آن را محاسبه می کنند و به با توجه به قطعه استاندارد که برای تنظیم دستگاه زیر آن قرار داده اند؛ این زمان را به ابعاد کاشی تبدیل می کند. در این مرحله کاشی با توجه به میزان انحراف از اندازه استاندارد درجه بندی می شود.

۳.۴.۱ عیوب ساختاری

عیوب ساختاری در خط تولید قابل شناسایی نیستند و در حال حاضر تنها راه تشخیص آن ها، نمونه برداری از محصول است. در فواصل زمانی معین نمونه هایی از خط تولید به آزمایشگاه منتقل می شود و توسط دستگاه هایی که اغلب مکانیکی هستند، مشخصاتی از قبیل رطوبت، استحکام، چگالی و ترک داخلی اندازه گیری و کنترل می شود. این کار مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است و محدودیت های زیادی را نیز به همراه دارد.

^۱ Pinhole

۵.۱ عیب لایه‌ای

همان‌طور که گفته شد عیب لایه‌ای یکی از انواع عیوب داخلی است که علیرغم اینکه همیشه در خط تولید وجود ندارد ولی در مواقعی که ایجاد می‌شود باعث ایجاد خسارت زیادی می‌شود. شکل ۳-۱ نمونه یک بیسکوئیت حاوی عیب لایه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱: نمونه یک بیسکوئیت معیوب

این عیب از شکل ظاهری کاشی قابل‌رؤیت نیست. در صورت وجود این عیب، کاشی پس از نصب بر روی دیوار، پس از مدت‌زمانی (بسته به شرایط محیطی نظیر دما و رطوبت)، لایه‌ی اصلی کاشی جدا شده و فقط قسمت بدنه آن به محل نصب باقی می‌ماند.

عیب لایه‌ای در مرحله پرس و در هنگام شکل‌گیری بدنه کاشی به وجود می‌آید. در این مرحله اگر به هر دلیلی هوای محبوس در بین دانه‌های گرانول نتواند از قالب خارج شود، در بین بدنه کاشی به شکل صفحه‌ای گیر افتاده و در آن محل دولایه مجزا را تشکیل می‌دهد. بسته به میزان هوا، ممکن است محل عیب به‌صورت دایره‌ای از قطر حدود ۲ سانتی‌متر شروع شده و درنهایت تمامی سطح کاشی را در برگیرد. در این صورت کاشی به‌صورت دولایه مجزا که روی یکدیگر قرار گرفته‌اند؛ شکل می‌گیرد.

دلایل به وجود آمدن عیب لایه‌ای ممکن است به یکی از موارد زیر باشد [۳]:

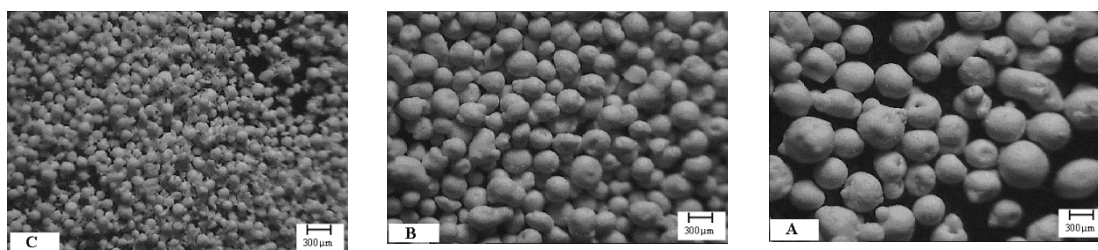
۱.۵.۱ کاهش رطوبت گرانول

کاهش رطوبت گرانول ممکن است به یکی از دلایل زیر اتفاق بیفتد:

۱. افزایش دمای خشک‌کن استوانه‌ای؛
۲. کوچک بودن سوراخ نازل‌های خشک‌کن استوانه‌ای؛
۳. زیاد شدن زمان بین خروج از خشک‌کن و استفاده در قسمت پرس.

۲.۵.۱ تغییر دانه‌بندی گرانول

عامل تغییر دانه‌بندی گرانول‌ها قطر سوراخ نازل و فشار سیال در خشک‌کن استوانه‌ای است. فشار مورد نیاز که توسط پمپ‌های دیافراگمی تأمین می‌شود، به‌ندرت تغییر می‌کند. به دلیل اینکه اکثر مواد تشکیل‌دهنده کاشی و سرامیک (حدود ۷۰ درصد) را ترکیبات اکسید سیلیسیم^۱ تشکیل می‌دهد و این ترکیبات بلورهای سوزنی‌شکل و برنده دارند و سرعت و فشار دوغاب کاشی در هنگام عبور از سوراخ نازل خیلی بالا است؛ این سوراخ‌ها به‌طور مرتب افزایش قطر می‌دهند. با افزایش قطر آن‌ها، قطر دانه‌های گرانول نیز افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین نیاز است به‌صورت مرتب بازدید و تعویض شوند. با افزایش قطر گرانول فضای خالی بین دانه‌ها زیادتر می‌شود [۴]؛ این عامل باعث بروز عیب می‌شود. شکل ۴-۱ گرانول‌ها را با سه قطر متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: گرانول با قطر زیاد (A)، متوسط (B) و کم (C) [۴]

^۱ SiO₂

۳.۵.۱ کاهش زمان پرس

مدت زمان بین مرحله اول و دوم پرس برای خروج هوای محبوس بین ذرات خاک از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر این زمان به اندازه کافی نباشد، هوای بین ذرات خاک زمان کافی برای خروج از قالب را نداشته و باعث بروز عیب لایه‌ای در محصول تولیدی می‌شود.

۴.۵.۱ خاصیت الاستیسیته مواد

در صورتی که رطوبت به اندازه کافی نباشد چسبندگی بین ذرات کم بوده و بعد از پرس به دلیل خاصیت الاستیسیته خاک، لایه‌ها از هم جدا شده و عیب لایه‌ای به وجود می‌آید.

۶.۱ دلایل نیاز به خودکارسازی

به دلیل پایین بودن دقت و فتاوری دستگاه‌های موجود و خطاهای انسانی، در عمل حذف کامل این عیب امکان‌پذیر نیست. در حال حاضر تنها راه تشخیص آن از طریق ضربه زدن به سطح کاشی، آن هم در انتهای خط تولید و قبل از بسته‌بندی و شنیدن صدای ناشی از ضربه وارده صورت می‌گیرد؛ که مستلزم تجربه و مهارت فردی بالایی است.

این مرحله درست قبل از بسته‌بندی قرار دارد؛ که در صورت عدم تشخیص عیب، کاشی معیوب در بسته‌بندی محصولات خروجی قرار گرفته و وارد بازار فروش می‌شود. این کار علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، از اعتبار و کیفیت محصول تولیدی به شدت می‌کاهد. لذا اهمیت موضوع در اینجا به خوبی نمایان می‌شود.

تشخیص عیب لایه‌ای در مرحله بسته‌بندی علاوه بر نیروی انسانی، از طریق دستگاه‌های هوشمند نیز قابل انجام است. در این مرحله تمامی مراحل تولید کاشی که دارای هزینه زیادی است؛ برای تولید کاشی انجام گرفته است. علاوه بر این در صورت تشخیص، کاشی معیوب دیگر قابل استفاده نبوده و باید

خردایش شود که این کار هزینه بالایی دارد و اغلب کارخانه‌ها به جای خردایش و بازگرداندن محصول به چرخه تولید، کاشی‌های معیوب را به صورت نخاله در محیط‌زیست دفع می‌کنند. حتی در حالت ایده‌آل اگر اولین قطعه معیوب تولیدی در خط بسته‌بندی تشخیص داده شود، چون از زمان خروج آن از واحد پرس بیش از ۱ روز گذشته است (جدول ۱-۱)، تمامی تولیدات این مدت را غیرقابل اطمینان می‌کند. در کارخانه‌های معمولی این حجم تولید در حدود ۴ هزار مترمربع برای هر خط تولید است؛ بنابراین ضرورت دارد تا تشخیص عیب در مراحل اولیه تولید انجام شود.

۷.۱ هدف این پایان‌نامه

هزینه‌های تولید تا مرحله پرس کمتر از ۵ درصد کل هزینه‌های تولید است و در صورت تشخیص عیب، قطعه معیوب را می‌توان با کمترین هزینه به چرخه تولید بازگرداند. بنابراین در این پایان‌نامه به تشخیص عیب لایه‌ای شدن در مرحله بعد از پرس پرداخته شده است. برای این منظور از روشی جدید و هوشمند برای تشخیص این عیب استفاده شده است.

۸.۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم به بیان کارهای انجام شده در زمینه تشخیص عیب با روش‌های آزمون غیر مخرب پرداخته، سپس مقالاتی را که در زمینه تشخیص عیب در کاشی و به‌ویژه عیوب داخلی است، بررسی می‌شود. در فصل سوم به تشریح روش‌ها و الگوریتم‌های به‌کاررفته در پژوهش به‌منظور استخراج ویژگی و طبقه‌بندی‌های مورد استفاده پرداخته شده است.

در فصل چهارم ابتدا در مورد روش ابتکاری جمع‌آوری بانک داده توضیحاتی داده شده است. بدین ترتیب که نمونه‌های سالم و معیوب تهیه‌شده را توسط دستگاه آزمون فراصوت مورد ارزیابی قرار داده و سیگنال فراصوت را از بدنه کاشی عبور داده و در طرف مقابل نمونه دریافت و ذخیره می‌نماید.

سیگنال‌های دریافتی پس از پالایش با روش‌های تبدیل فوریه سریع و بسته موجک، تحلیل و ویژگی‌های مناسب جهت اعمال به طبقه‌بندها استخراج شده است. از ویژگی‌های استخراج‌شده برای آموزش طبقه‌بندهای MLP، KNN، SVM و Bayesian استفاده‌شده و نشان داده می‌شود که می‌توان با دقتی بیش از ۹۰ درصد به تشخیص عیب لایه‌ای‌شدن در کاشی و سرامیک اقدام نمود.

ساختار داخلی کاشی و سرامیک حتی در نمونه‌های سالم نیز همگن نیست، این امر باعث رفتارهای پیش‌بینی‌نشده در سیگنال دریافتی می‌شود و انتخاب طبقه‌بند مناسب را مشکل می‌سازد، به همین دلیل از چند طبقه‌بند برای تعیین کلاس سالم و معیوب استفاده‌شده است. به‌علاوه در اختیار داشتن نظر چند طبقه‌بند که از لحاظ ساختار و عملکرد با یکدیگر تفاوت پایه‌ای دارند امکان استفاده از نظرات آنان در ترکیب اطلاعات و بالا بردن دقت تشخیص را نیز فراهم می‌کند.

فصل دوم

۲ مروری بر کارهای گذشته

۱.۲ مقدمه

کنترل کیفیت محصولات در هنگام تولید و به‌ویژه در بین خط تولید از اهمیت زیادی برخوردار است [۵]. هم‌اکنون در کارخانه‌های تولید کاشی و سرامیک در تمامی بخش‌های تولید به‌جز مرحله کنترل کیفیت از دستگاه‌های خودکار استفاده می‌شود [۶]. به همین دلیل در کارخانه‌های تولید کاشی و سرامیک برای شناسایی معایب کاشی و درجه‌بندی محصولات از روش‌هایی که اغلب به‌صورت دستی هستند استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت بحث کنترل کیفیت و سرعت و دقت بالایی که در فرایند تولید کاشی موردنیاز است؛ لزوم ایجاد یک سیستم خودکار و هوشمند جهت تشخیص عیب و درجه‌بندی محصولات به‌خوبی احساس می‌شود [۷].

پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تشخیص عیوب کاشی و سرامیک را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

- تشخیص عیوب ظاهری در کاشی و سرامیک؛
- استفاده امواج فراصوت به بازرسی و تشخیص عیوب داخلی مواد سرامیکی.

۱.۱.۲ تشخیص عیوب ظاهری

در زمینه تشخیص عیوب ظاهری کاشی و سرامیک پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است. در سال‌های اخیر تکنیک‌های چند دقتی از قبیل تبدیلات موجک^۱ و گابور [۸] به‌طور گسترده، جهت آنالیز ساختار و بافت تصویر مورد استفاده قرار گرفته است. برخلاف تبدیل موجک که از پارامترهای ثابت جهت تجزیه تصویر در مقیاس‌های مختلف بهره می‌گیرد، تبدیل گابور نیازمند تنظیم دقیق و مناسب پارامترهای فیلتر در مقیاس‌های متفاوت می‌باشد.

ریماک و همکاران [۹] روشی را جهت تشخیص عیب کاشی بر مبنای تبدیل موجک و شبکه‌های عصبی ارائه نموده‌اند. در روش پیشنهادی کاشی به دو قسمت تقسیم‌شده و به ازای هر قسمت یک شبکه عصبی

^۱ Wavelet

ایجاد می‌شود. ویژگی‌های مورد استفاده شامل ماکزیمم ضرایب جزئیات و میانگین ضرایب حاصل از تقریب در سه جهت است. نکته مثبت این روش کوچک بودن بردار ویژگی و نکته منفی آن استفاده از دو شبکه عصبی جهت کلاسه‌بندی است.

مواردی که در بخش قبل ذکر شد روش‌هایی هستند که جهت تشخیص عیوب ظاهری کاشی قابل استفاده می‌باشند این عیوب با تصاویری که از سطح کاشی گرفته می‌شوند عیوب قابل‌رؤیت هستند. عیوب ساختاری مربوط به داخل قطعه بوده و قابل‌رؤیت نیستند؛ بنابراین تصاویری که از نور مرئی تهیه می‌شوند در اینجا کارایی لازم را ندارند.

یکی از روش‌هایی که در حین آسیب نرساندن به نمونه آزمایش، از ساختار و عیوب داخلی آن اطلاعاتی را در اختیار قرار می‌دهد؛ استفاده از روش‌های آزمون غیر مخرب است [۱۰]. امروزه این روش‌ها متداول بوده و هرروز در حال توسعه است. انتخاب نوع آزمون غیر مخرب بستگی به جنس و ابعاد نمونه، نوع و اندازه عیب و شرایط محیطی دارد.

استفاده از آزمون الکترومغناطیس [۱۱] نیز که بیشتر در مواد فلزی و هادی جریان الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ توصیه نمی‌شود.

در سال‌های اخیر با استفاده از شلیک نور لیزر به سطح قطعه، موجی مکانیکی را در قطعه به وجود می‌آورند و با استفاده از حسگر، در طرف مقابل، آن را دریافت می‌کنند [۱۲]. این روش علاوه بر هزینه بالای تجهیزات لیزری، در محل برخورد نور لیزر با سطح آسیب‌هایی را بر جای می‌گذارد که در بعضی موارد مطلوب نیست؛ اما در مواردی که فقط به یک‌طرف قطعه دسترسی مستقیم داریم مطلوب و قابل استفاده است. در مواردی که اندازه قطعه بزرگ باشد و مقاومت آکوستیکی آن زیاد نباشد می‌توان در [۱۳] با استفاده از اشعه ایکس به اندازه‌گیری چگالی و تغییرات ضخامت سرامیک‌های با ابعاد بزرگ پرداخته است و عملکرد قسمت پرس را در میزان تغییر مشخصات ذکر شده، مورد بررسی قرار داده است. با استفاده از پرتو ایکس می‌توان تصاویری دوبعدی از ساختار داخلی قطعه تهیه کرد و با استفاده از روش‌های پردازش تصویر به تشخیص عیب در داخل قطعه پرداخت. تجهیزات موردنیاز این روش

گران‌قیمت بوده و به علت تهدیداتی که برای سلامتی انسان دارد استفاده از آن در محیط کارخانه و خط تولید را نامطلوب می‌سازد.

۲.۱.۲ تشخیص عیوب داخلی با استفاده از آزمون فراصوت

یکی از روش‌هایی که حساسیت کمی به جنس، اندازه قطعه، شرایط محیطی و نوع عیب دارد، روش آزمون فراصوت است [۱۴]. استفاده از این آزمون در سال‌های اخیر روبه افزایش است [۱۵]. در [۱۶] از روش امواج عبوری و با استفاده از دو فرستنده و گیرنده در دو طرف کاشی به بررسی میزان چگالی و سرعت عبور امواج پرداخته است.

در سال ۲۰۰۴ آگلیس و همکاران [۱۷] به بررسی اثرات میزان آب در ملاط تازه و تحلیل فرکانسی سیگنال فراصوت عبوری از آن پرداختند. در این پژوهش از دو فرستنده و گیرنده تماسی با فرکانس‌های ۲۵ کیلوهرتز و ۱ مگاهرتز به‌منظور ارسال و دریافت امواج استفاده شد. کولوکاس و همکارانش [۱۸] با استفاده از فرستنده و گیرنده‌هایی با رابط لاستیکی اقدام به گرفتن سیگنال عبوری از سرامیک نمودند؛ و با به کار بردن روش عبور از صفر^۱ و خودهمبستگی^۲ به محاسبه سرعت امواج و مقایسه آن با چگالی حجمی پرداختند. ارین و همکاران [۱۹] با قرار دادن پراب ۵ مگاهرتز بر روی سرامیکی که در دمای ۱۲۳۰ درجه سانتی‌گراد پخت شده بود و استفاده از روش امواج بازگشتی به تحلیل زمان و دامنه سیگنال بازگشتی پرداخته و با محاسبه سرعت امواج، مدول دینامیکی و استاتیکی سرامیک را با دقت خوبی تخمین زدند. همچنین آن‌ها در [۲۰] با استفاده از همین روش به تشخیص عیوبی مصنوعی که با قراردادن قطعات مختلفی از جمله لاستیک در بین کاشی، به تشخیص و بررسی این عیوب پرداختند.

^۱ Zero crossing

^۲ Cross Crolation

در [۲۱] با کمک امواج بازگشتی و در نظر گرفتن دامنه و محاسبه زمان انتشار^۱ امواج تغییرات چگالی را مورد بررسی قرار داده است. در [۲۲] با استفاده از روش امواج بازگشتی به دریافت سیگنال بازگشتی اقدام نموده و سیگنال بازگشتی را پس از پردازش و استخراج ویژگی به کمک شبکه عصبی طبقه‌بندی کرده است.

در [۲۳] ابتدا با قرار دادن مقادیر معین از نیتريد سيليسيم^۲ در سرامیک (قبل از شکل‌دهی و پخت) عیوب مصنوعی با اندازه‌های مختلف تولید کردند. سپس با استفاده از روش امواج بازگشتی و بررسی زمان و دامنه پاسخ سیگنال، روشی برای شناسایی عیوب داخلی و میزان آن پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی اگرچه دارای دقت قابل قبولی است اما با توجه به مقاومت آکوستیکی کاشی قبل از پخت عملاً استفاده از این روش در سرامیک خام، که مستلزم دو بار عبور امواج از عرض قطعه است (رفت و برگشت)؛ امکان‌پذیر نیست. کولوکاس و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۱۱ با قرار دادن یک فرستنده نوک‌تیز و گیرنده تخت، امواج عبوری با فرکانس ۱ مگاهرتز را ثبت و به کمک روش عبور از صفر و خودهمبستگی پس از محاسبه زمان عبور امواج، با در نظر گرفتن سرعت امواج به اندازه‌گیری ضخامت نقاط مختلف سرامیک پرداختند.

در [۲۴] با استفاده از فرستنده و گیرنده‌های غیر تماسی و به کارگیری روش خودهمبستگی و مقایسه سیگنال عبوری از هوا و سیگنال عبوری از سرامیک به ارائه روشی برای محاسبه زمان عبور امواج از سرامیک‌هایی با سطح پیچیده پرداختند. در این روش در هنگام عبور امواج از سطح جدایش دو محیط به دلیل متفاوت بودن مقاومت آکوستیکی آن‌ها، میزان زیادی از انرژی امواج به صورت انعکاس بازمی‌گردد. این عمل در طول ارسال و دریافت دومرتبه اتفاق می‌افتد و با توجه به ضریب پخش‌کنندگی و تضعیف در سرامیک خام، دامنه سیگنال دریافتی به حدی کاهش می‌یابد که در گیرنده قابل دریافت

^۱ Time-of-Flight

^۲ Si₃N₄

نیست.

در [۲۵] امواج عبوری را با استفاده از پراب ۱ مگاهرتز و قرار دادن فرستنده و گیرنده آن در دو طرف قطعه دریافت کرده و به کمک روش عبور از صفر، زمان عبور امواج را در نقاط مختلف سرامیک محاسبه کرده و به صورت تصویر دوبعدی نمایش داده است. در این حالت شکل الگوی سرامیک که با تغییر ضخامت در پشت سرامیک ایجاد می شود؛ به طور کامل نمایان است. سپس به منظور نشان دادن تغییرات چگالی از تصویر موجود تبدیل فوریه دوبعدی گرفته و تغییر چگالی را به صورت ظهور دامنه زیاد در سیگنال تبدیل فوریه نشان داده است. در [۲۶] با قرار دادن فرستنده و گیرنده هایی با سر لاستیکی با فرکانس ۲۲۰ کیلوهرتز، سرعت عبور امواج را محاسبه کرده و به بررسی چگالی و ضریب جذب آب، در نقاط سالم و معیوب و مقایسه آن ها پرداخته است. در این مرجع با ریختن پودر آلومینیوم در قالب، به ایجاد عیوب مصنوعی در نمونه ها پرداختند.

فصل سوم

۳ روش‌ها، تئوری‌ها و الگوریتم‌های اولیه

۱.۳ مقدمه

در این فصل روش‌های مورد استفاده جهت استخراج ویژگی و طبقه‌بندی‌های به کارگرفته شده در این پژوهش توضیح داده می‌شود.

۲.۳ روش‌های مختلف استخراج ویژگی از سیگنال

۱.۲.۳ تبدیل فوریه سریع^۱

تحلیل زمان فرکانسی، ویژگی‌های مربوط به تغییر انرژی سیگنال در زمان‌های مختلف را آشکار می‌سازد. روش‌های مختلفی برای انجام تحلیل زمان-فرکانسی سیگنال وجود دارد. یکی از این روش‌ها تحلیل فوریه زمان کوتاه^۲ است. این روش به علت سادگی محاسبات، در زمینه تحلیل سیگنال‌های تغییر با زمان استفاده می‌شود. یکی دیگر از روش‌های تحلیل زمان-فرکانسی سیگنال، تبدیل موجک است که در زمینه استخراج ویژگی کاربرد گسترده‌ای دارد.

تبدیل فوریه زمان کوتاه نگاشتی است از سیگنال اصلی در فضای زمان، به فضای فرکانس. این تبدیل با تجزیه یک سیگنال به فرکانس‌های تشکیل‌دهنده آن، تأثیر فرکانس‌های مختلف را در تشکیل سیگنال نهایی نشان می‌دهد.

تبدیل فوریه زمان کوتاه پیوسته

در مورد سیگنال‌های پیوسته روش پیاده‌سازی تبدیل فوریه زمان کوتاه بدین ترتیب می‌باشد، که سیگنال با اعمال یک پنجره با طول ثابت به بخش‌های مختلف تقسیم می‌شود و تبدیل فوریه در هر پنجره به

^۱ Fast Fourier Transform (FFT)

^۲ Short-time fourrier transform

سیگنال اعمال می‌گردد. همزمان با حرکت این پنجره در طول سیگنال تبدیل فوریه به بازه‌ای ثابت از سیگنال اعمال خواهد شد. رابطه ریاضی تبدیل فوریه زمان کوتاه به صورت رابطه (۱-۳) است.

$$STFT\{x(t)\} \equiv X(\tau, w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-jw\tau} dt \quad (1-3)$$

که در آن $w(t)$ نشان‌دهنده پنجره جدا شده از سیگنال به مرکز صفر است و $x(t)$ سیگنال مورد نظر برای تبدیل می‌باشد. $X(\tau, w)$ تبدیل فوریه پنجره جدا شده از سیگنال است. $x(t)w(t-\tau)$ نشان دهنده دامنه و فاز سیگنال در حیطه زمان و فرکانس است.

تبدیل فوریه زمان کوتاه گسسته

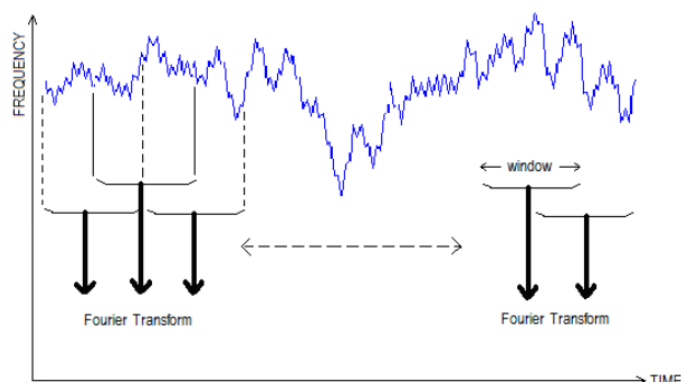
در مورد تحلیل سیگنال‌های گسسته، هر سیگنال به چند بخش (پنجره) که دارای همپوشانی با یکدیگر نیز هستند، تقسیم می‌شود و تبدیل فوریه به هر یک از این پنجره‌ها اعمال می‌گردد. نتیجه به صورت یک ماتریس خواهد بود که دامنه و فاز هر نقطه از سیگنال را در حوزه زمان و فرکانس بیان می‌کند. رابطه حاکم بر تبدیل فوریه زمان کوتاه گسسته به صورت رابطه (۲-۳) است.

$$STFT\{x[n]\} \equiv X(m, w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n-m]e^{-jwn} \quad (2-3)$$

که در آن $x[n]$ سیگنال اصلی و $[n]$ پنجره اعمال شده به سیگنال می‌باشد. در این رابطه m گسسته و w پیوسته است. در کاربردهای عملی از آنجاکه تبدیل فوریه سریع (FFT) بر سیگنال اعمال می‌شود، هر دو پارامتر گسسته و دارای مقادیر کوانتیزه شده می‌باشند. بنابراین خواهیم داشت:

$$X(m, w) = FFT_w(x[n]w[n-m]) = FFT_w(x.SHIFT_m(w)) \quad (3-3)$$

در رابطه (۳-۳)، $X(m, w)$ تبدیل FFT پنجره جدا شده از سیگنال می‌باشد که در زمان m از سیگنال جدا شده است. مقدار همپوشانی پنجره‌ها قابل تنظیم بوده و مقدار $w[m]$ متناسب با کاربرد تغییر می‌کند. توابع گوناگونی برای تعریف پنجره اعمالی به سیگنال وجود دارد مانند مستطیلی، گوسی، بارتلت، بلک‌من، همینگ و غیره. شکل ۱-۳ نشان دهند بازه‌بندی سیگنال در محاسبه تبدیل فوریه زمان کوتاه برای یک پنجره مستطیلی با همپوشانی ۵۰٪ است.



شکل ۳-۱: اعمال تبدیل فوریه زمان کوتاه به ازای اعمال پنجره‌های مستطیلی با همپوشانی ۵۰ درصد

به کمک تبدیل STFT می‌توان تأثیر فرکانس‌های مختلف را در بازه‌های زمانی گوناگون از سیگنال بررسی کرد؛ اما زمان وقوع تغییرات لحظه‌ای و نوسانات فرکانس بالا را نمی‌توان به‌خوبی تعیین نمود. برای رفع این مشکل روش تبدیل موجک برای تحلیل سیگنال معرفی گردید که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.

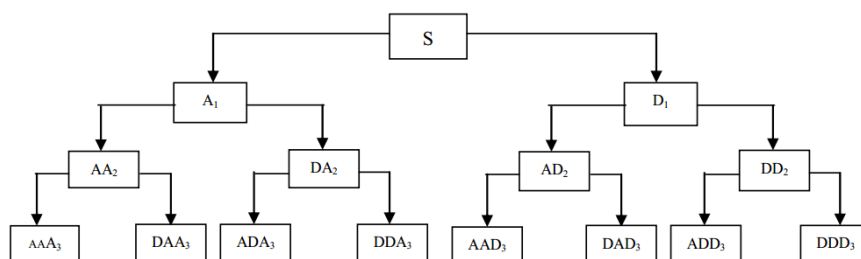
۲.۲.۳ بسته موجک^۱

موارد بسیاری وجود دارد که تغییرات ایجادشده در سیگنال در فرکانس بالا اتفاق می‌افتد و تحلیل سیگنال در فرکانس پایین اطلاعات لازم را به ما نمی‌دهد. در چنین مواردی امکان بررسی سیگنال در باندهای فرکانسی متوسط و بالا ارزشمند است. برای این منظور تبدیل بسته موجک پیشنهادشده است. به کمک این روش جزئیات بیشتری از سیگنال آشکارشده و قدرت تفکیک سیگنال‌های مختلف افزایش می‌یابد. در ادامه به بررسی روش تبدیل موجک می‌پردازیم.

تبدیل بسته موجک یک نمونه تعمیم‌یافته از تبدیل موجک است که یک تحلیل جامع از سیگنال را فراهم می‌کند. روند کار در روش بسته موجک بدین‌صورت است که همانند روش موجک گسسته با هر مرحله اعمال تبدیل، سیگنال موردنظر به دو بخش تقریب و جزئیات تقسیم می‌شود، ولی برخلاف تبدیل

^۱ Wavelet Packet

موجک گسسته در هر مرحله انجام فرایند، تبدیل موجک به روی هر دو سیگنال تقریب و جزئیات اعمال می‌گردد. در شکل ۲-۳ نمودار درختی مربوط به تبدیل بسته موجک تا سه مرحله به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: نمایش اعمال تبدیل بسته موجک به سیگنال اولیه تا سه مرحله

به کمک این روش می‌توان به تحلیل جامعی از تمامی فرکانس‌های تشکیل‌دهنده سیگنال دست‌یافت و جزئیات رخ داده در تمامی بازه‌های زمانی تشکیل‌دهنده سیگنال را بررسی کرد.

۳.۳ معرفی روش‌های مختلف طبقه‌بندی

۱.۳.۳ طبقه‌بند نزدیک‌ترین همسایگی^۱

این طبقه‌بند ساختاری کاملاً ساده دارد، نحوه‌ی کار آن به این صورت است که مجموعه داده‌های آموزش را در حافظه‌ی خود ذخیره می‌کند، حال با ورود هر داده‌ی جدید، نزدیک‌ترین‌ها به آن را تشخیص می‌دهد، کلاس برنده، کلاسی است که بیش‌ترین همسایگی را در نزدیکی ویژگی جدید داشته باشد. اگر بخواهیم کمی علمی‌تر بیان کنیم، یک همسایگی در فضای ویژگی برای ورودی در نظر می‌گیریم، ابعاد این همسایگی را آن‌قدر بزرگ می‌کنیم که K عضو داخل آن قرار گیرد، حال با یک آمارگیری به تشخیص کلاس برنده می‌پردازیم، بدین‌صورت که برچسب انتخاب‌شده برای عضو جدید معادل با

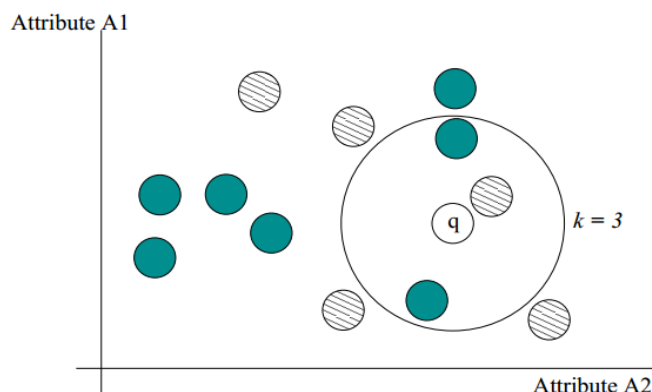
^۱ K Nearest Neighbor

برچسبی است که تعداد بیشتری از همسایگان دارای آن بوده‌اند. منظور از نزدیک‌ترین‌ها، نمونه‌هایی است که فاصله اقلیدسی آنان با نمونه جدید کمتر از سایر فواصل باشد.

برای آموزش این طبقه‌بند به تعدادی ورودی که برچسب کلاس هریک نیز مشخص باشد نیاز است. هر ورودی به صورت یک بردار ویژگی نشان داده می‌شود. درواقع در روش‌های طبقه‌بندی احتمالی، در فاز آموزش احتمال تعلق هریک از داده‌های آموزش به کلاس‌های مختلف تعیین می‌شود. زمانی که این کار انجام شد طبقه‌بند آموزش خواهد دید تا کلاس ورودی‌های جدید را بر اساس میزان شباهت میان ویژگی‌های آن ورودی با ویژگی‌های هر کلاس تعیین نماید. در روش KNN فاز آموزش بسیار کوتاه است و کافی است بردارهای ویژگی آموزش را در سیستم ذخیره نماییم. در مرحله طبقه‌بندی، بردار ورودی جدید را به سیستم معرفی می‌کنیم که دارای ویژگی‌های مختص به خود است. سیستم این بردار را به فضای ویژگی وارد می‌کند و تعداد k همسایگی در مجاور این بردار ورودی در فضای ویژگی را تعیین می‌نماید. سپس بر اساس برچسب کلاس این همسایگی‌ها رأی‌هایی در مورد برچسب بردار ورودی صادر می‌گردد.

در شکل زیر نحوه عملکرد روش KNN در فضای ویژگی دوبعدی که شامل دو کلاس مختلف می‌باشد نشان داده شده است. بردار ورودی جدید با دایره توخالی (q) مشخص شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد همسایگان مورد استفاده برای تعیین کلاس ورودی در این مسئله ۳ در نظر گرفته شده است. البته همواره لازم است تا این پارامتر برای طبقه‌بند KNN بهینه شود.

حال تنها موردی که در نحوه عملکرد طبقه‌بند KNN نیاز به توضیح دارد نحوه محاسبه فاصله و نحوه تعیین کلاس داده ورودی جدید می‌باشد. در این پژوهش از فاصله اقلیدسی برای تعیین فاصله در همسایگی بردار ورودی استفاده شده است؛ که برابر با جذر مجموع مجذور فاصله‌های تمامی ویژگی‌های تشکیل‌دهنده بردار ویژگی (برای هر نمونه از نمونه جدید) می‌باشد.



شکل ۳-۳: نحوه محاسبه تعلق نمونه q به کلاس‌های مختلف در الگوریتم KNN

شبکه‌های عصبی

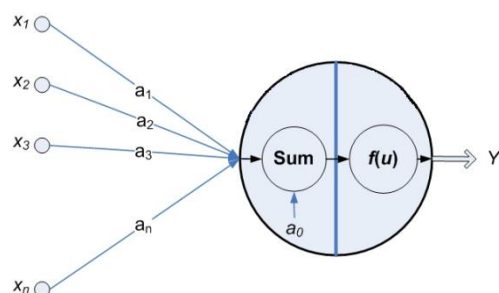
شبکه‌ی عصبی، یک شبکه توزیع‌شده موازی است که بر مبنای فرایند یادگیری زیست‌شناختی مغز انسان طراحی‌شده و کاربردهای بسیاری در زمینه طبقه‌بندی دارد. یک شبکه عصبی از تعدادی واحد پردازشگر به نام نرون تشکیل‌شده است که توسط سیناپس‌ها (وزن‌های یادگیری) به یکدیگر مرتبط می‌شوند. این وزن‌ها در یک فرایند تکراری و با استفاده از نمونه‌های اولیه و در فرایند یادگیری تعیین می‌شود. معماری شبکه را از نظر ساختار به دودسته زیر تقسیم می‌کنند:

شبکه‌های پیشرو

در شبکه‌های پیشرو، هیچ حلقه‌ای داخل گراف نهایی وجود ندارد و هر لایه توسط وزن‌هایی به لایه بعدی متصل می‌گردد. لذا وزن‌های شبکه عمل انتقال مقادیر از یک لایه به لایه دیگر را با یک تبدیل خطی، انجام می‌دهند.

شکل ۳-۴ مدل یک نرون عصبی را نشان می‌دهد. این تک نرون، پرسپترون^۱ نامیده می‌شود. عملکرد این نرون به دو بخش تقسیم می‌شود. ابتدا داده‌های ورودی در وزن‌های نرون ضرب شده و سپس تابع فعال‌ساز غیرخطی $f(x)$ روی داده‌ها اعمال می‌شود.

^۱ Perceptron

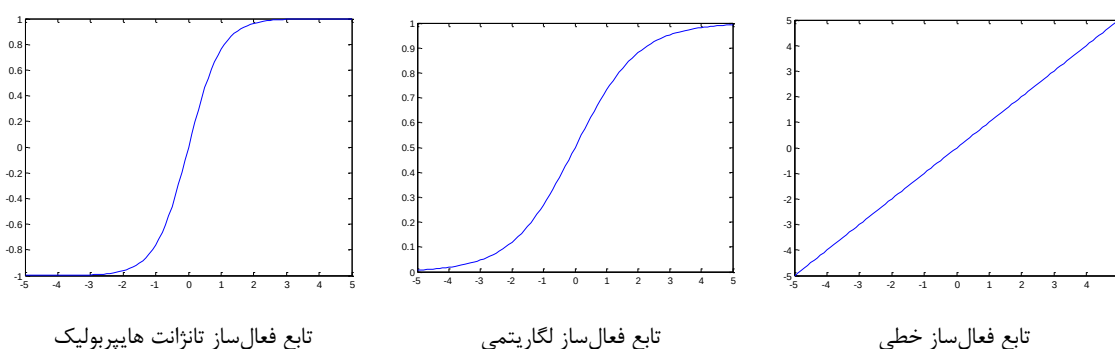


شکل ۳-۴: ساختار پرسپترون با یک نرون

در شبکه‌های تک‌لایه، بردار ورودی X توسط نرون‌های لایه اول، طبق رابطه (۳-۴) به خروجی مرتبط می‌شوند:

$$Y = f(ax + a_0) \quad (۳-۴)$$

این شبکه شکل ساده‌ای از شبکه‌های پیش‌خور است. مقدار به‌دست‌آمده در هر نرون که از مجموع حاصل‌ضرب‌ها به دست می‌آید، از یک تابع تبدیل می‌گذرد. این تابع تبدیل را تابع فعالیت نرون می‌گویند؛ که خروجی آن، خروجی نرون را تشکیل می‌دهد. تابع محرک f می‌تواند خطی یا غیرخطی باشد. تابع محرک بر اساس نیاز مسأله انتخاب می‌شود. شکل ۳-۵ توابع فعال‌سازی که به‌طور معمول در شبکه‌های عصبی استفاده می‌شوند را نشان می‌دهد.



تابع فعال‌ساز تانژانت هایپربولیک

تابع فعال‌ساز لگاریتمی

تابع فعال‌ساز خطی

شکل ۳-۵: نمونه‌هایی از توابع فعال‌ساز در شبکه‌های عصبی

آموزش یک شبکه عصبی به معنی یافتن مقادیر وزن‌هاست. این کار در یک فرایند تکراری انجام‌شده و

تا آنجا ادامه می‌یابد که خطای حاصل از شبکه‌ی آموزش دیده به حداقل برسد و مهم‌تر از آن این که در فرایند آموزش، قابلیت تعمیم شبکه برای فضای مشاهده نشده، کاهش نیابد.

قانون یادگیری، قاعده‌ای است که شبکه بر اساس آن وزن‌های اتصالاتش را تغییر می‌دهد. درواقع برای هر الگوی آموزشی، وزن‌ها به گونه‌ای تصحیح می‌شوند که خطای خروجی کاهش یابد. یکی از روش‌های کاهش خطای خروجی، استفاده از روش شیب نزولی است که در آن تصحیح وزن‌های شبکه متناسب با گرادیان خطا است. رابطه (۵-۳)

$$w(n+1) = w(n) - \eta \cdot \nabla E(w(n)) \quad (5-3)$$

در رابطه فوق ∇E بردار گرادیان خطا در نقطه w است. برای محاسبه این فرمول، تابع فعالیت نرون‌ها باید پیوسته، مشتق‌پذیر و غیر نزولی باشد.^۱ را نرخ یادگیری شبکه می‌گویند. در بیشتر دستگاه‌های طبقه‌بندی که بر اساس شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) طراحی می‌شوند، از قانون یادگیری پس‌انتشار خطا استفاده می‌شود که معمولاً از روش شیب نزولی برای تصحیح وزن‌های شبکه عصبی استفاده می‌کند. در آموزش شبکه‌های عصبی دو رویکرد وجود دارد:

آموزش دسته‌ای^۱: در این آموزش تغییر وزن‌های شبکه عصبی به صورت یکجا و با در نظر گرفتن مجموعه‌ی داده‌ها (دسته‌ای از داده‌ها) در شبکه انجام می‌گیرد.

آموزش افزایشی^۲: در این نوع آموزش تغییر وزن‌ها بعد از ارائه هر داده خاص انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر آموزش به صورت مرحله‌ای صورت می‌گیرد و داده‌ها به صورت ترتیبی وارد شده و شبکه با دیدن هر نمونه خود را اصلاح می‌کند.

الگوریتم پس انتشار خطا^۳

در شبکه‌های MLP، ابتدا مقدار خطا در هر یک از نرون‌های لایه خروجی محاسبه می‌شود؛ سپس اصلاح

¹ Batch

² Incremental

³ Back Propagation Algorithm

وزن با توجه به مشتق خطا و نسبت وزن‌های متصل به لایه خروجی صورت می‌گیرد. در ادامه خطای خروجی از طریق وزن‌های متصل شده به لایه‌های قبل انتشار داده می‌شود و بر اساس آن وزن‌های متصل به این نرون‌ها نیز اصلاح می‌شوند. این عمل تا زمانی که اثر خطا به لایه ورودی برسد ادامه پیدا می‌کند.

الگوریتم پس انتشار خطا، یکی از رایج‌ترین الگوریتم‌ها جهت آموزش شبکه‌های عصبی چندلایه پیش‌خور می‌باشد. این الگوریتم، تقریبی از الگوریتم بیشترین تنزل است.

فرمول‌بندی الگوریتم BP

الگوریتم پس انتشار خطا با معادلات زیر توصیف می‌شود:

$$W(k+1) = W(k) - \alpha \frac{\partial I}{\partial W(k)} \quad (6-3)$$

$$b(k+1) = b(k) - \alpha \frac{\partial I}{\partial b(k)} \quad (7-3)$$

به‌طوری‌که W پارامتر وزن شبکه، b پارامتر بایاس شبکه، α نرخ یادگیری¹ شبکه و I تابع هزینه است که به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

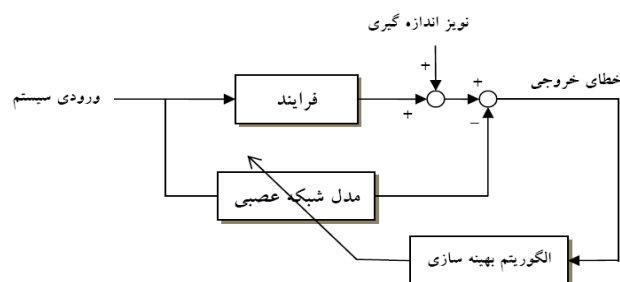
$$e = y - \hat{y} \quad (8-3)$$

$$I = MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (9-3)$$

بنابراین آموزش شبکه عصبی، یک نوع بهینه‌سازی آزاد است که در آن باید یک تابع هزینه کمینه شود و قیدی برای بهینه‌سازی وجود ندارد. ساده‌ترین روش بهینه‌سازی روش گرادیان نزولی است که به دلیل سادگی پیاده‌سازی و توانایی آموزش داده‌های آموزشی زیاد، برای شبکه‌های عصبی ارجحیت دارد. در شبکه عصبی چندلایه، هر نرون در لایه مخفی، مجموع حاصل ضرب اطلاعات ورودی و وزن‌های ارتباطی را محاسبه می‌کند؛ سپس این حاصل را با استفاده از یک تابع فعال‌ساز به نرون لایه بعد می‌فرستد.

¹ Learning Rate

مقادیر محاسبه‌شده خروجی با مقادیر واقعی آن‌ها مقایسه می‌شود. چنانچه مقدار خطا از خطای مطلوب که از قبل در نظر گرفته‌شده، متفاوت باشد؛ به عقب بازگشته و با تغییر ضرایب ارتباطی و تکرار مراحل قبلی مجدداً خروجی‌های جدید محاسبه می‌گردد.



شکل ۳-۶: ساختار کلی بهینه‌سازی وزن‌های شبکه عصبی

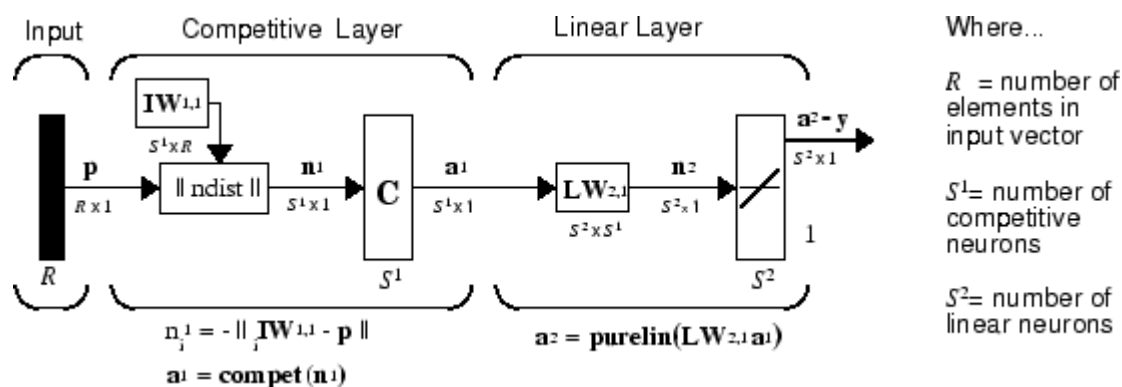
۲.۳.۳ شبکه عصبی LVQ^۱

شبکه LVQ، یک شبکه‌ی هیبرید دولایه است که هم از یادگیری با ناظر و هم بدون ناظر برای دسته‌بندی استفاده می‌کند. در این شبکه هر یک از نرون‌های لایه‌ی اول متعلق به یک گروه است. البته در مواردی هم ممکن است چند نرون به یک گروه اختصاص یابد، لایه‌ی دوم هر گروه، لایه‌ی اول را به یک نرون در لایه‌ی خروجی متصل می‌کند. درواقع تعداد نرون‌های لایه‌ی دوم ما به تعداد خروجی‌های مطلوب ما است و این لایه تنها یک نگاشت خطی میان گروه‌های لایه‌ی اول و خروجی‌های مطلوب است. به همین علت باید تعداد نرون‌های لایه‌ی اول بیشتر از تعداد نرون‌های لایه‌ی دوم باشد.

هر نرون لایه‌ی اول یک بردار مشخصه را یاد می‌گیرد، دقیقاً شبیه به اتفاقی که در یک خوشه‌بند SOM اتفاق می‌افتد، به همین دلیل شبکه می‌تواند فضای ورودی را به تعدادی ناحیه طبقه‌بندی کند. روش کار به این صورت است که فاصله‌ی بردار وزن هر نرون از بردار ورودی (ویژگی) سنجیده می‌شود. نرون برنده نرونی است که دارای کمترین فاصله باشد، خروجی نرون برنده، یک و خروجی سایر نرون‌ها صفر

^۱ Linear Vector quantization

می‌شود، حال با توجه به نگاشت خطی لایه‌ی دوم، یکی از خروجی‌ها فعال می‌شود، اگر خروجی فعال شده همان خروجی مطلوب باشد، بردار وزن نرون فعال به گونه‌ای بروز می‌شود که به سمت ویژگی ورودی متمایل شود و در غیر این صورت از بردار ویژگی ورودی فاصله می‌گیرد.



شکل ۷-۳: شبکه LVQ

روش اصلاح وزن با استفاده از قانون اصلاح وزن شبکه‌های هاپفیلد است؛ به این صورت که ضربی از اختلاف میان بردار ورودی و بردار وزن به بردار وزن اضافه می‌شود، بدیهی است در صورت اشتباه بودن تشخیص، به همین میزان از بردار ویژگی فاصله گرفته می‌شود.

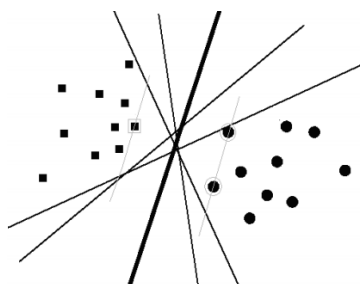
با بیانی ساده می‌توان این‌گونه عنوان کرد که شبکه‌ی LVQ فضای هر کلاس را با تعدادی بردار خطی مشخص می‌کند. لذا همواره فضای ویژگی‌های هر کلاس در یک محدوده‌ی چندضلعی محدود شده است. برای پیاده‌سازی این روش لازم است مقادیر هدف ما به صورت برداری تعریف شده باشند و در هر حالت تنها یکی از خروجی‌ها فعال باشد. لذا بردار برچسب را به صورت یک ماتریس درمی‌آوریم که تعداد سطرهاى آن به تعداد کلاس‌های خروجی است و در هر ستون، عنصر متناظر با شماره‌ی کلاس وردی یک و مابقی صفر هستند.

این شبکه در مراحل اول به عنوان یکی از ساختارهای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. اما با توجه به زمان‌بر بودن مراحل آموزش و همچنین عدم پاسخگویی بهتر نسبت به سایر شبکه‌ها از مراحل کار حذف گردید.

۳.۳.۳ ماشین بردار پشتیبان^۱

سیستم‌های مبتنی بر بردارهای پشتیبان (SVM) از جمله روش‌های طبقه‌بندی پشتیبانی شده می‌باشد که به عنوان یک ابزار قدرتمند در طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش هدف، جداسازی کلاس‌های موجود به کمک یک ابرصفحه در فضای ویژگی می‌باشد. این ابرصفحه بر اساس نمونه‌های مشاهده شده ترسیم می‌گردد.

برای تفکیک کلاس‌های موجود می‌توان صفحات مختلفی را به کمک طبقه‌بندی خطی ترسیم کرد. نکته اساسی در مورد این صفحه آن است که باید قابلیت تعمیم بالایی داشته باشد تا بتواند داده‌های مشاهده نشده را به خوبی طبقه‌بندی نماید. برای این منظور SVM به دنبال یافتن صفحه‌ای با حداکثر فاصله ممکن از داده‌های هر کلاس است. در این شرایط یک صفحه تفکیک کننده بهینه به دست خواهد آمد. داده‌هایی از هر کلاس که به صفحه تفکیک کننده نزدیک تر هستند، بردارهای پشتیبان هر کلاس نامیده می‌شوند. در شکل ۳-۸ داده‌های دوبعدی مربوط به دو کلاس مختلف نشان داده شده است که به کمک خط‌های متعددی قابل تفکیک هستند. با این وجود تنها یک خط وجود دارد که بین دو کلاس و در حداکثر فاصله از داده‌های هر یک قرار دارد. تابع تعریف این خط توسط SVM مشخص می‌شود.



شکل ۳-۸: ابرصفحه‌های مختلف برای تفکیک دو کلاس به همراه ابرصفحه

تفکیک کننده بهینه برای داده‌های دوبعدی

زمانی که داده‌های مربوط به کلاس‌های مختلف در فضای ویژگی به صورت خطی قابل جداسازی نیستند

^۱ Support Vector Machin (SVM)

می‌توان آن‌ها را با استفاده از توابع کرنل غیرخطی به فضای ویژگی با ابعاد بیشتر نگاشت، تا در فضای ویژگی جدید بتوان آن‌ها را به صورت خطی جدا نمود [۲۱]. برخی از توابع کرنل مورد استفاده در SVM در ادامه معرفی شده است.

توابع کرنل

تابع کرنل چند جمله‌ای:

$$K(x_i, x_j) = \langle x_i, x_j \rangle^d \text{ یا } K(x_i, x_j) = (\langle x_i, x_j \rangle + 1)^d \quad (۱۰-۳)$$

توابع گوسی^۱: RBF

$$K(x_i, x_j) = e^{-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}} \quad (۱۱-۳)$$

توابع سیگموئید:

$$K(x_i, x_j) = \tanh(kx_i, x_j - \delta) \quad (۱۲-۳)$$

اگرچه این طبقه‌بند کارایی بسیار مناسبی دارد و جزو بهترین طبقه‌بندهای موجود به حساب می‌آید. اما ساختار آن باعث می‌شود تا نسبت به داده‌های ورودی حساسیت داشته باشد و لازم است تا قبل از ورود ویژگی‌ها، پیش‌پردازش‌های گزینشی روی آن انجام شود، چراکه ورود داده‌های نویزی باعث کاهش بازده شبکه می‌گردد.

۴.۳.۳ بیزین^۲

این روش بر اساس تئوری بیزین عمل می‌کند و به عنوان یک روش طبقه‌بندی احتمالاتی شناخته می‌شود. در روش‌های ریاضی، تعلق بردار X به کلاس ω_i به عنوان یک رخداد تصادفی از تابع چگالی

^۱ Gaussian Radial Basis Function

^۲ Bayesian

شرطی $p(x|\omega_i)$ در نظر گرفته می‌شود. مهم‌ترین مفهومی که بر اساس تئوری‌های تصمیم‌گیری آماری ارائه شده است قانون بیز است. بزرگ‌ترین ویژگی این روش استفاده از ویژگی‌های مستقل برای طبقه‌بندی می‌باشد.

قانون بیز، در صورتی که تابع چگالی شرطی هر کلاس مشخص باشد، قاعده تصمیم بهینه‌ای را به دست می‌دهد که تعداد طبقه‌بندی نادرست آن کمینه است. در این قاعده، توابع تصمیم به صورت رابطه (۱۳-۳) هستند.

$$d_j(x) = p(\omega_j|x) = p(x|\omega_j) \cdot p(\omega_j) \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (13-3)$$

که در آن $p(x|\omega_j)$ تابع چگالی احتمال الگوهای متعلق به کلاس ω_j و $p(\omega_j)$ احتمال پیشین رخداد کلاس ω_j است. در عمل توابع توزیع کلاس‌ها از قبل معلوم نیست و از روی نمونه‌های آموزشی به دست می‌آیند. به‌طور کلی برای طبقه‌بندی در روش‌های پارامتریک بیزین لازم است که برای هر نمونه، احتمال حضور در تمامی کلاس‌ها محاسبه شود و کلاسی که بیشترین احتمال را داشته باشد به‌عنوان کلاس آن نمونه انتخاب می‌گردد. در روش بیزین توزیع داده‌ها به‌صورت گوسین فرض شده است. این روش به دلیل سادگی، کاربردهای زیادی دارد. برای طبقه‌بندی به روش بیزین لازم است تا ابتدا شاخص‌های هر کلاس (به‌عنوان نمونه میانگین و کوواریانس) به‌صورت مجزا از فضای آموزش محاسبه گردند و برای تک‌تک نمونه‌های فضای تست، رابطه (۱۴-۳) با شاخص‌های تمامی کلاس‌ها محاسبه گردد. با در نظر گرفتن احتمال پیشین، کلاسی که بیشترین مقدار خروجی را از رابطه (۱۴-۳) داشته باشد به‌عنوان کلاس آن نمونه، در نظر گرفته می‌شود.

برای حالتی که توابع چگالی احتمال، گوسی فرض شوند داریم:

$$p(x|\omega_j) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |C_j|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} [(x - m_j)^T C_j^{-1} (x - m_j)]\right) \quad (14-3)$$

که در آن C_j و m_j ماتریس کوواریانس و بردار میانگین الگوهای کلاس ω_j است که با استفاده از نمونه‌های آموزشی این کلاس تخمین زده می‌شود و $|C_j|$ دترمینان C_j است. رابطه (۱۴-۳) را می‌توان به‌صورت (۱۵-۳) نیز نوشت.

$$\begin{aligned}
 d_j(x) &= \ln[p(x|\omega_j).p(\omega_j)] = \ln p(x|\omega_j) + \ln p(\omega_j) \\
 &= \ln p(\omega_j) - \frac{1}{2} \ln |C_j| \\
 &\quad - \frac{1}{2} [(x - m_j)^T C_j^{-1} (x - m_j)]
 \end{aligned}
 \tag{۱۵-۳}$$

عدم وابستگی میان ویژگی‌ها در عمل باعث می‌شود که بتوان هریک را به‌عنوان یک بعد از فضای ویژگی در نظر گرفت. این موضوع از افزایش ابعاد فضای ویژگی جلوگیری کرده و مانع از ایجاد ویژگی‌های باکیفیت پایین برای کلاس‌ها می‌گردد. همین امر موجب کارایی بالای این روش در مسائل پیچیده باوجود ساختار ساده آن می‌شود.

۴.۳ روش‌های مختلف برای ترکیب نتایج طبقه‌بندها

ترکیب طبقه‌بندها امروزه از مباحث مطرح در بازشناسی الگو می‌باشد. در واقع استفاده از ترکیب نتایج چند طبقه‌بند یکی از روش‌های افزایش کارایی سیستم‌های بازشناسی الگو است که در سال‌های اخیر محققین زیادی به آن پرداخته‌اند. برای آنکه ترکیب نتایج طبقه‌بندها مفید واقع شود باید طبقه‌بندهای پایه ضمن برخورداری از کارایی قابل قبول، با یکدیگر متفاوت بوده و قاعده ترکیب مناسبی برای تلفیق نتایج آنها بکار گرفته شود. قاعده ترکیب باید به گونه‌ای انتخاب شود که طبقه‌بندها نقاط ضعف یکدیگر را بپوشانند. تنها با شناخت قواعد مختلف ترکیب و ویژگی‌های آنها است که می‌توان قاعده ترکیب مناسب را برای حل مسأله مورد نظر انتخاب کرد. در این فصل چگونگی بکارگیری روش‌های مختلف ترکیب طبقه‌بندها در سطوح مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از بکارگیری روش‌های مختلف در بهبود نتایج بدست آمده از طبقه‌بندهای پایه ارائه خواهد شد.

۱.۴.۳ مروری بر ترکیب طبقه‌بندها

ترکیب طبقه‌بندها شامل دو بخش است. بخش اول که به کاربرد وابسته است، شامل ایجاد طبقه‌بندهای

پایه، تعیین تعداد طبقه‌بندها و انتخاب ویژگی‌های مناسب برای هر طبقه‌بند است. بخش دوم که در کاربردهای مختلف، یکسان است شامل نحوه ترکیب خروجی طبقه‌بندها به منظور حصول بهترین نتیجه برای طبقه‌بندی الگوها است. در این مرحله، ابتدا بردار تعلق نهایی الگوی x به کلاس‌های مختلف تعیین شده و سپس کلاس متناظر با بزرگترین درایه این بردار به عنوان کلاس الگوی x منظور می‌شود.

فرض کنیم که $D = \{D_1, D_2, \dots, D_L\}$ مجموعه‌ای از طبقه‌بندها باشد و $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c\}$ نیز مجموعه‌ای از برچسب‌های کلاس باشد. هر طبقه‌بند بردار ورودی $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, x \in \mathbb{R}^n$ را دریافت کرده و یک برچسب کلاس از مجموعه Ω به آن نسبت می‌دهد. به عبارت دیگر هر طبقه‌بند نگاشتی معادل با $D_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \Omega$ می‌باشد. همچنین می‌توان خروجی یک طبقه‌بند را به صورت یک بردار با طول c به صورت رابطه (۱۶-۳) در نظر گرفت.

$$D_i(x) = [d_{i,1}(x), d_{i,2}(x), \dots, d_{i,c}(x)] \quad (16-3)$$

بنابراین $d_{i,j}(x)$ درجه حمایت طبقه‌بند D_i از تعلق نمونه مشخص x به کلاس ω_j است. منظور از ترکیب طبقه‌بندها پیدا کردن برچسب کلاس، برای نمونه x براساس خروجی‌های L طبقه‌بند $D_1(x), \dots, D_L(x)$ است. به طور مشابه به جای یک برچسب می‌توان برداری متشکل از c عضو برای پشتیبانی کلاس‌ها برای نمونه x به صورت رابطه (۱۷-۳) در نظر گرفت.

$$D(x) = [\mu_1(x), \dots, \mu_c(x)]^T \quad (17-3)$$

در صورتی که نیاز به برچسب قطعی برای نمونه x باشد، می‌توان از قانون بیشترین درجه عضویت بهره برد. به عبارتی برچسب ω_s به نمونه x الصاق می‌شود اگر و تنها اگر رابطه (۱۸-۳) برقرار باشد.

$$\mu_s(x) \geq \mu_t(x), \forall t = 1, \dots, c \quad (18-3)$$

باید دقت کنیم که در ایجاد طبقه‌بندهای پایه گوناگونی در خطا لحاظ گردد تا ترکیب نتایج آنها باعث بهبود دقت تصمیم‌گیری در سیستم مرکب شود. انتخاب نوع طبقه‌بندها و تعداد آنها به نوع کاربرد و نیازمندی‌های مسأله وابسته است. انتخاب ویژگی مناسب برای هر طبقه‌بند باید به گونه‌ای باشد که هم

نرخ بازشناسی آن طبقه‌بند به تنهایی خوب باشد و هم موارد خطای آن با دیگر طبقه‌بندهای سیستم مرکب متفاوت باشد. ترکیب چند طبقه‌بند، زمانی مفید واقع می‌شود که طبقه‌بندهای پایه، نرخ خطای کمی داشته باشند و خطاهای آن‌ها با یکدیگر متفاوت باشند. دو طبقه‌بند، زمانی دارای خطاهای متفاوتی هستند که الگوهایی که طبقه‌بند اول به صورت نادرست طبقه‌بندی کرده است، با آن‌هایی که دومی نادرست طبقه‌بندی کرده است، متفاوت باشند.

نحوه ترکیب خروجی طبقه‌بندها یا به عبارت دیگر انتخاب قاعده ترکیب یک مسأله وابسته به کاربرد است. با توجه به نیازمندی‌های مسأله قاعده ترکیب به گونه‌ای انتخاب می‌شود که نرخ بازشناسی سیستم طبقه‌بندی مرکب، بیشینه باشد.

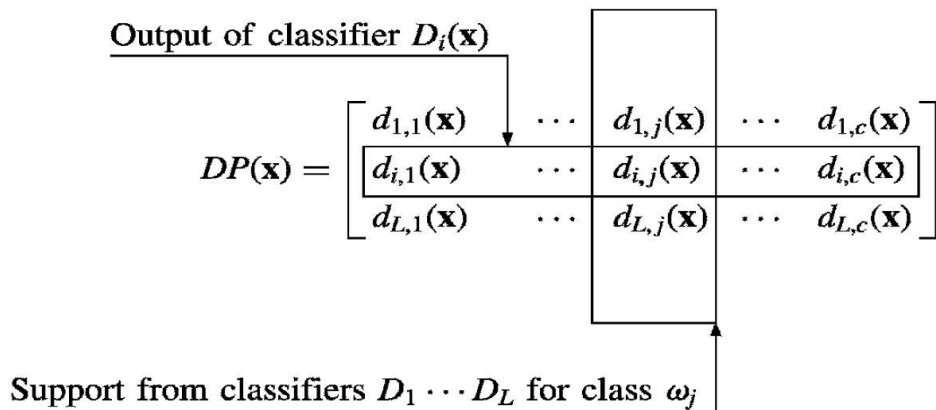
۲.۴.۳ الگوهای ترکیب

به طور کلی دو نوع ترکیب وجود دارد: انتخاب طبقه‌بندها و ترکیب طبقه‌بندها. در انتخاب طبقه‌بندها فرض بر آن است که هر کدام از آنها در یک ناحیه از فضای ویژگی خبره می‌باشند. هنگامی که بردار ویژگی $x \in \mathcal{R}^n$ برای طبقه‌بندی ارسال می‌شود، به طبقه‌بندی که در ناحیه همسایگی x خبره‌تر است اعتبار بیشتری برای برچسب زنی به x داده می‌شود. همچنین می‌توان دقیقاً یک طبقه‌بند را برای اخذ تصمیم کاندید کرد و یا چندین طبقه‌بند خاص را استفاده نمود. در ترکیب طبقه‌بندها فرض بر آن است که تمامی طبقه‌بندها در کل فضای ویژگی، آموزش داده شده‌اند و بنابراین بیشتر به عنوان رقیب مطرح می‌باشند تا به عنوان مکمل و همکار یکدیگر.

در بسیاری از کاربردها نیز ترکیب و انتخاب با هم استفاده می‌شوند. به عبارتی بجای انتخاب یک طبقه‌بند خبره، می‌توان مجموعه‌ای از آنها را انتخاب کرد و قضاوت هر کدام را گرفته و بر اساس خبرگی آنها بروی نمونه x وزنی را به آنها اختصاص داد. بنابراین طبقه‌بندی با دقت فردی بالاتر، می‌تواند به عنوان راهنما در گروه طبقه‌بندها مطرح گردد. هنگامی که طبقه‌بندهای زیادی درگیر می‌شوند، این فرایند از انتخاب طبقه‌بند به سوی ترکیب طبقه‌بندها سوق می‌یابد. دو نوع عمده از خروجی‌های طبقه‌بند چندگانه

شامل روش‌های حساس به کلاس و بی‌توجه به کلاس می‌باشد.

ماتریسی که در آن میزان تعلق هر نمونه از دید تک‌تک طبقه‌بندهای پایه، به کلاس‌های مختلف بیان می‌شود، ماتریس پروفایل تصمیم $DP(X)$ نامیده می‌شود.



شکل ۹-۳ تشکیل ماتریس پروفایل تصمیم

برخی روش‌های ترکیب، بدون توجه به پشتیبانی دیگر کلاس‌ها، تنها از ستون زام ماتریس $DP(x)$ برای محاسبه پشتیبانی کلاس W_j استفاده می‌کنند. روش‌های ترکیبی که از ماتریس $DP(x)$ به صورت کلاس به کلاس استفاده می‌کنند، روش‌های حساس به کلاس^۱ (CC) نامیده می‌شود. به گروه دیگری از روش‌ها که از کل ماتریس پروفایل تصمیم برای محاسبه $\mu_i(x)$ استفاده می‌کنند، روش‌های بی‌توجه به کلاس^۲ (CI) گفته می‌شود. شایان ذکر است که تفاوت بین این دو گروه در آن است که گروه اول از مفهوم ماتریس پروفایل تصمیم استفاده می‌کنند، به عبارت دیگر از این واقعیت بهره می‌گیرند که هر ستون متعلق به کلاس متناظر آن می‌باشد، درحالی‌که قسمتی از اطلاعات را از دست می‌دهند. گروه دوم از روش‌ها از کل ماتریس $DP(x)$ بدون توجه به مفهوم آن استفاده می‌کنند. در زیر برخی از روش‌های ترکیب نتایج طبقه‌بندها توضیح داده می‌شود.

^۱ Class-Conscious

^۲ Class-Indifferent

روش‌های رأی‌گیری

در روش‌های رأی‌گیری، اظهار نظر هر طبقه‌بند در مورد کلاس الگوی ورودی، به عنوان یک رأی محسوب می‌شود و تصمیم‌گیری نهایی بر اساس آرای اخذ شده از طبقه‌بندهای مختلف صورت می‌گیرد. الگوی ورودی به کلاسی تعلق خواهد گرفت که بیشترین رأی را بیاورد. اگر طبقه‌بندها مستقل از یکدیگر بوده و نرخ بازشناسی صحیح آنها، مستقل از تعداد کلاس‌ها، بیش از پنجاه درصد باشد، با افزایش تعداد طبقه‌بندها، روش رأی‌گیری باعث افزایش دقت طبقه‌بندی می‌شود.

روش‌های رأی‌گیری، انواع متفاوتی دارند. از جمله می‌توان به رأی‌گیری بدون وزن، رأی‌گیری مبتنی بر میزان اطمینان و رأی‌گیری وزن‌دار اشاره کرد. در روش‌های رأی‌گیری بدون وزن، آراء تمام طبقه‌بندها از وزن یکسانی برخوردارند یا به عبارتی ضریب وزنی همه طبقه‌بندها برابر یک است. معیار برنده شدن در این روش‌ها، فقط تعداد آراء کسب شده است. روش رأی‌گیری اکثریت از جمله روش‌های رأی‌گیری بدون وزن است و تنها به تعداد آراء کسب شده توجه دارد. در روش‌های رأی‌گیری مبتنی بر اطمینان، رأی دهنده میزان اعتماد خود به هر نامزد را بیان می‌کند. هر چقدر میزان اعتماد رأی‌دهندگان به یک نامزد بیشتر باشد، میزان برنده شدن او بیشتر است. نامزدی که بیشترین اعتماد رأی‌دهندگان را حاصل کند، انتخاب می‌شود.

ترکیب طبقه‌بندها با انتگرال‌های فازی سوگنو

استفاده از انتگرال‌های فازی همواره نتایج خوبی داشته است، در این روش ابتدا لازم است تا ماتریس‌های پروفایل تصمیم، برای تمامی الگوهای ورودی تشکیل گردد. محتویات ماتریس پروفایل تصمیم همان خروجی طبقه‌بندهای پایه است و نشان می‌دهد که به‌ازای الگوی ورودی، هر طبقه‌بند چه میزان تعلق برای حضور این الگو در کلاس‌های مختلف می‌دهد. در این الگوریتم برای محاسبه میزان تعلق الگوی x به کلاس ω_k یعنی پیدا کردن $\mu_D^k(x)$ ابتدا برای هر یک از طبقه‌بندها، با توجه به اهمیت آنها چگالی‌های فازی $g^1, g^2, \dots, g^L$ را در نظر می‌گیریم. در این پژوهش چگالی‌های فازی متناسب با میزان

دقت طبقه‌بندهای پایه در نظر گرفته شده است. مقادیر چگالی‌های فازی را در رابطه (۲۰-۳) قرار داده و مقدار λ را می‌یابیم.

$$g^i \propto P_i \quad (19-3)$$

$$\lambda + 1 = \prod_{i=1}^L (1 + \lambda g^i) \quad , \quad \lambda > -1 \quad (20-3)$$

برای الگوی ورودی x ، k امین ستون $DP(x)$ را به صورت نزولی مرتب کرده و چگالی طبقه‌بندها را نیز متناظر با مقادیر ستون k ام به صورت بردار (۲۱-۳) مرتب می‌کنیم.

$$[d_{i1,k}(x) \quad d_{i2,k}(x) \quad \dots \quad d_{iL,k}(x)]^T \quad (21-3)$$

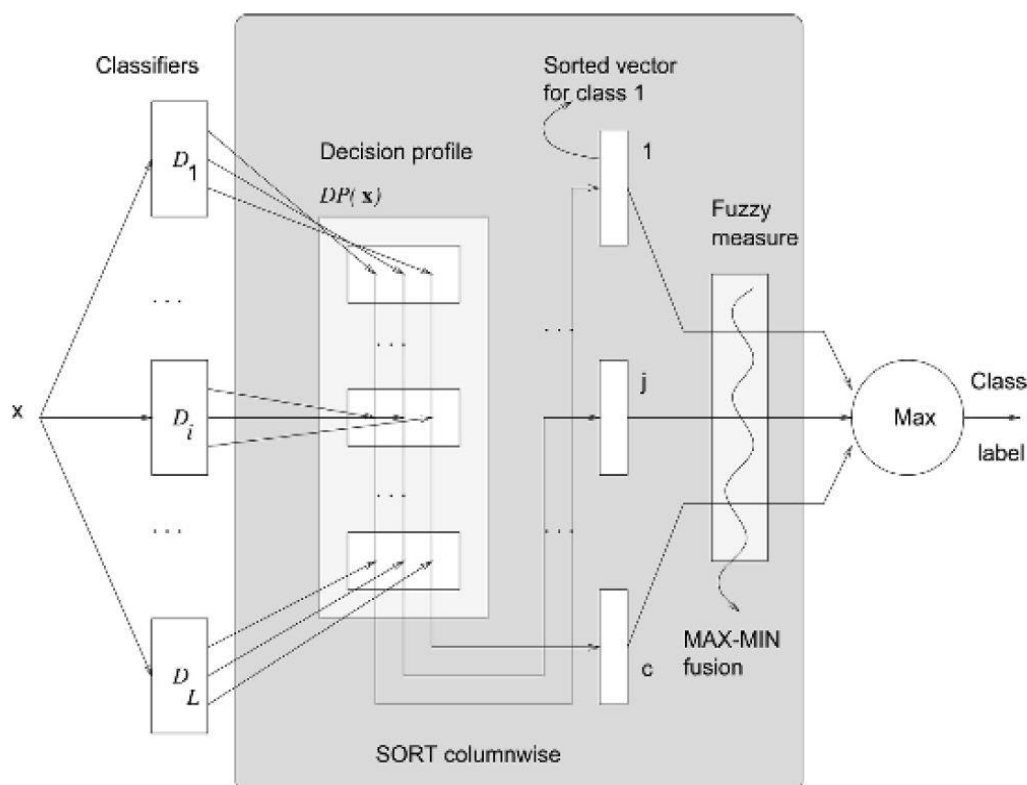
در این مرحله مقدار $g(1)$ را برابر g^{i_1} قرار داده و برای $t = 2, 3, \dots, L$ از رابطه (۲۲-۳) مقادیر اندازه‌های فازی را پیدا می‌کنیم.

$$g(t) = g^{i_t} + g(t-1) + 1.g^{i_t} . g(t-1) \quad (22-3)$$

که در آن g^{i_t} مقدار g^i در نظر گرفته شده برای طبقه‌بند t ام است. در این روش تعلق نهایی الگوی x به کلاس ω_k را از مصالحه بین اندازه فازی و شواهد بیان شده توسط ستون k ام ماتریس $DP(x)$ به کمک رابطه (۲۳-۳) به دست می‌آید.

$$\mu_D^k(x) = \max_{t=1}^L \{ \min \{ d_{it,k}(x), g(t) \} \} \quad (23-3)$$

رابطه (۲۳-۳) به انتگرال فازی سوگنو معروف است. شکل ۳-۱۰ نمایی شماتیک از عملکرد این روش ترکیب می‌باشد.

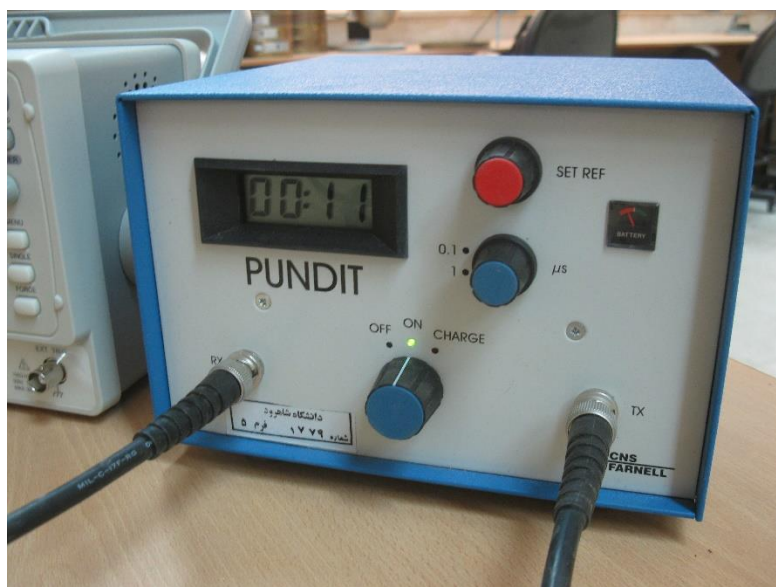


شکل ۳-۱۰: نمایی شماتیک از عملکرد انتگرال‌های فازی سوگنو

۵.۳ دستگاه آزمون فراصوت بتن

یکی از روش‌های آزمون غیر مخرب سازه‌های بتنی روش استفاده از امواج فراصوت است. در این روش با محاسبه زمان عبور امواج از نمونه و با داشتن ضخامت آن به محاسبه سرعت امواج عبوری اقدام می‌شود. سرعت عبور امواج در این سازه‌ها به عواملی همچون دانه‌بندی، رطوبت، ناخالصی‌های داخلی، تخلخل و فواصل هوایی مانند ترک و ... بستگی دارد. با داشتن زمان عبور امواج و مقایسه آن با جداول از پیش تعیین شده برای نمونه‌های مختلف به محاسبه استحکام و بازرسی داخلی آن‌ها اقدام می‌شود. یکی از دستگاه‌هایی که برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد دستگاه PUNDIT 6 (شکل ۳-۱۱) است. این دستگاه دارای دو فرستنده و گیرنده مجزا است که در محدوده فرکانسی ۳۶ تا ۵۰۰ کیلوهرتز در بازار یافت می‌شوند. این فرستنده‌ها با قطر زیاد و دارای دیواره فلزی هستند. ولتاژ تحریک آنها که توسط دستگاه تولید می‌شود دارای محدوده زمانی کم و در دو مقدار ۵۰۰ ولت و ۱ کیلوولت و در دو

فرکانس ۱۰ و ۱۰۰ هرتز، قابل تنظیم هستند. دستگاه پس از ارسال پالس تحریک به فرستنده، پس از چند لحظه توقف (به منظور جلوگیری از نشت سیگنال)، گیرنده را فعال می‌کند و پس از دریافت آن مدت زمان ارسال تا دریافت را با واحد میکروثانیه نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱۱: دستگاه آزمون بتن در حال نشان دادن زمان عبور سیگنال (حالت استاندارد)

۶.۳ اوسیلوسکوپ

نمایشگر دیجیتال GDS-1052-U (شکل ۳-۱۲) دارای ۲ کانال ورودی است که می‌تواند بطور همزمان با دو رنگ مختلف آن را در صفحه، نمایش دهد. این دستگاه قادر است تا امواجی تا فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز و ۳۰۰ ولت را آشکارسازی کند. از قابلیت‌های مهم آن امکان ذخیره‌سازی سازی سیگنال است. حافظه داخلی دستگاه قادر به ذخیره‌سازی ۴۰۰۰ نمونه است و می‌توان از حافظه خارجی نیز بطور همزمان استفاده کرد. اطلاعات خروجی به فرمت‌های CSV، BMP، (اکسل)، SET و یا هر سه در دسترس است.



شکل ۳-۱۲: اوسیلوسکوپ مدل GDS-1052-U، استفاده‌شده جهت آشکارسازی سیگنال

۷.۳ نتیجه‌گیری

در انتخاب روش استخراج ویژگی سعی شده از روش‌هایی استفاده شود که علاوه بر سادگی و محاسبات کم از کارایی خوبی برخوردار باشند. طبقه‌بندهایی انتخاب شد که علاوه بر قدرت کلاسه‌بندی بالایی که دارند از نظر ساختار درونی و روش مورد استفاده با یکدیگر متفاوت باشند تا بتوان در صورت نیاز از نتایج ترکیب اطلاعات خروجی طبقه‌بندها برای بهبود نتایج استفاده کرد.

در ادامه پژوهش در فصل بعد به بیان روش نمونه‌گیری و ارائه شبیه‌سازی انجام شده و نتایج حاصل می‌پردازیم.

فصل چهارم

۴ استخراج ویژگی و شبیه‌سازی

۱.۴ مقدمه

برای کلاسه‌بندی نمونه‌ها ابتدا نیاز به یک مجموعه داده مناسب است. اگرچه می‌توان از داده‌های خام به‌عنوان ورودی طبقه‌بندها استفاده کرد؛ اما در این حالت بعد فضای ویژگی زیاد بوده و علاوه بر سنگین شدن حجم محاسبات، احتمال وجود اطلاعات غیرمفید و گمراه‌کننده که تشخیص را با مشکل روبه‌رو می‌کنند نیز وجود دارد؛ بنابراین نیاز است تا با استفاده از روش‌های استخراج ویژگی، بعد فضای ویژگی را کاهش داد. نکته‌ای که در انتخاب روش استخراج ویژگی باید مدنظر داشت؛ این است که خروجی استخراج ویژگی برای داده‌های هر کلاس باید متمایزکننده باشد.

با توجه به در دسترس نبودن مجموعه داده مورد نیاز که سیگنال عبوری از کاشی خام در مرحله‌ی پرس است باید این مجموعه را به‌طور اختصاصی تهیه شود برای این منظور ابتدا نیاز به دستگاهی جهت نمونه‌گیری است. دستگاه‌های نمونه‌گیری آزمایشگاهی و صنعتی هر یک برای نمونه‌گیری عیوب خاص در مواد طراحی شده‌اند که مشخصات آن‌ها با نمونه کاشی خام کاملاً متفاوت است. طراحی و ساخت دستگاه نمونه‌برداری اختصاصی هزینه و زمان زیادی را می‌طلبد بنابراین بهترین راه ابداع روشی است که با تجهیزات موجود بتواند نمونه‌گیری را انجام دهد. در ادامه به تشریح این روش پرداخته خواهد شد.

۲.۴ تهیه مجموعه داده

برای آموزش شبکه‌های عصبی و به‌طور کلی برای استفاده از طبقه‌بندهای هدایت‌شده، نیاز به تعداد قابل قبولی داده‌های برچسب خورده داشته است، این داده‌ها باید به‌صورت صحیح و در محیطی عادلانه جمع‌آوری شده باشند تا شبکه‌ی آموزش‌دیده با این داده‌ها بتواند به داده‌های جمع‌آوری‌شده به‌عنوان نمونه‌هایی از جامعه‌ی آماری کاشی‌های سالم و معیوب نگاه کرده و درنهایت با قابلیت تعمیم‌دهی مناسبی به تفکیک کلاس‌ها پس از آموزش بپردازد.

برای این منظور نیاز به تعداد قابل توجهی نمونه از دو کلاس است و باید روش مناسبی برای استخراج

ویژگی از نمونه‌ها وجود داشته باشد تا در نهایت بتوان مجموعه داده قابل اعتمادی را تهیه نمود. با توجه به اینکه عیب مورد نظر در دسته عیوب داخلی قرار می‌گیرد و توسط چشم و سیستم‌های تصویربرداری رایج قابل‌رؤیت نیست، باید روشی را انتخاب کرد که بتوان به ساختار داخلی جسم دسترسی داشت. برای این کار دو روش عمده وجود دارد:

۱.۲.۴ آزمون‌های مخرب

همانطور که از نام آزمون‌های مخرب مشخص است روش‌هایی هستند که در حین بازرسی، به قطعه آسیب می‌رسانند. با استفاده از این روش برای پی بردن به عیوب داخلی لازم است تا کاشی‌ها از خط تولید خارج شده و با روش‌های مکانیکی و حتی پس از شکسته شدن، عیوب داخلی آنان مورد بررسی قرار گیرد. در این حالت در صورتی که قطعه مورد نظر بدون عیب هم باشد به علت آسیب وارده، دیگر قابل استفاده نیست.

۲.۲.۴ آزمون‌های غیر مخرب

این دسته، آزمون‌هایی را شامل می‌شود که بدون صدمه رساندن به جسم، به شناسایی ساختار داخلی آن می‌پردازند. از انواع آزمون‌های غیر مخرب می‌توان: آزمون امواج رادیویی، مواد مغناطیس، اشعه ایکس، امواج آکوستیک، میدان مغناطیسی، امواج فراصوت، مواد نافذ و ... را نام برد. با توجه به جنس، ابعاد، ساختار داخلی، نوع و اندازه عیب و شرایط تولید کاشی و سرامیک مانند زمان و سرعت در خط تولید، از بین روش‌های فوق روش استفاده آزمون امواج فراصوت^۱ به عنوان بهترین روش انتخاب شد. آزمون غیر مخرب امواج فراصوت از نظر نحوه نمونه‌برداری و فرستنده و گیرنده (پراب) مورد استفاده به دودسته‌ی: **تماسی** و **غیر تماسی** تقسیم می‌شود. اگرچه در نگاه اول استفاده از شیوه‌های غیر تماسی

^۱ Ultrasonic Testing

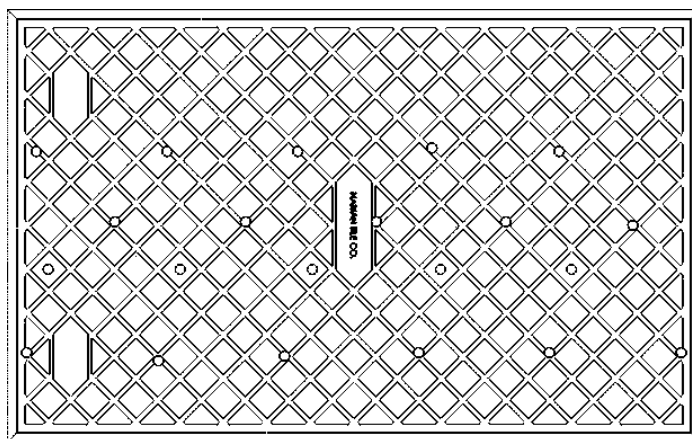
مفیدتر به نظر می‌رسد؛ اما محدودیت‌های آن نظیر در دسترس نبودن تجهیزات مورد نیاز و همچنین هزینه‌ی بالای فرستنده و گیرنده و تجهیزات مربوطه باعث می‌شود تا استفاده از روش تماسی بر روش غیر تماسی در شرایط فعلی ارجحیت داده شود.

در ابتدا از دستگاه آزمایشگاهی آزمون فراصوت با فرستنده-گیرنده تماسی ۴ مگاهرتز و تکنیک پالس بازگشتی استفاده شد. به علت بالا بودن مقاومت آکوستیکی بدنه کاشی به‌ویژه در مرحله قبل از پخت و سطح ناهموار آن سیگنال بازگشتی قابل‌رؤیت و ثبت نبود. با کاهش فرکانس امواج، انرژی و قدرت نفوذپذیری آن‌ها افزایش می‌یابد، بنابراین از فرستنده-گیرنده‌هایی با فرکانس پایین‌تر و قدرت بالاتر کمک گرفته شد. در مرحله بعد، از دستگاه آزمون صنعتی فراصوت با فرستنده-گیرنده ۲ مگاهرتز استفاده شد. در این آزمایش نیز پاسخی از بازگشت سیگنال مشاهده نشد.

در نهایت باوجود تمام محدودیت‌ها از دستگاه آزمون بتن PANDIT 6 با فرستنده-گیرنده ۲۰۰ کیلوهرتز استفاده شد. برخلاف دو دستگاه قبل که برای آزمون مواد فلزی با مقاومت آکوستیکی پایین و عیوب کوچک طراحی شده‌اند، دستگاه فوق برای بازرسی سازه‌های بتنی با مقاومت آکوستیکی بالا و ضخامت زیاد طراحی شده است و از فرستنده-گیرنده‌هایی با فرکانس ۳۵ تا ۵۰۰ کیلوهرتز و قدرت بالا استفاده می‌کند. ولتاژ تحریک فرستنده دستگاه در دو حالت ۵۰۰ ولت و ۱/۲ کیلوولت و با فرکانس ۱۰ هرتز و ۱۰۰ هرتز قابل تنظیم است.

همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد به علت مقاومت آکوستیکی بالا در کاشی و سرامیک خام، امکان استفاده از حسگرهای یک طرفه‌ی انعکاسی وجود ندارد و بهترین جواب با کمک گرفتن از حسگرهای عبوری حاصل می‌شود. روش کار دستگاه آزمون بتن بدین صورت است که دستگاه یک پالس تحریک با دامنه بالا و زمان کم به فرستنده ارسال می‌کند؛ با ارسال این پالس صفحه پیزوالکتریکی که در سر فرستنده قرار دارد تحریک شده و امواجی مکانیکی با فرکانس طبیعی آن تولید می‌کند. این امواج پس از خروج، از عرض قطعه عبور کرده و در طرف دیگر قطعه توسط گیرنده دریافت می‌شود. دستگاه زمان عبور موج فراصوت عبوری از جسم را محاسبه می‌کند.

بدیهی است زمانی که لایه‌ای از هوا میان جسم وجود داشته باشد، به دلیل تفاوت زمان عبور امواج در هوا نسبت به کاشی (سرعت عبور امواج فراصوت از هوا کمتر از کاشی است)، مدت زمان دریافت امواج از جسم افزایش خواهد یافت. با توجه به اینکه در کاشی معیوب وجود فاصله هوایی بین دولایه به افزایش زمان عبور امواج از آن منجر می‌شود؛ در شرایط ایده‌آل استفاده از مدت زمان عبور سیگنال می‌تواند متمایزکننده باشد اما به علت وجود نقش و نگارهای فراوان روی سطح پشتی کاشی (شکل ۴-۱) و زبری و حفره‌های ریز سطح کاشی خام، فاصله هوایی نامعینی میان فرستنده و گیرنده با کاشی ایجاد می‌شود. با توجه به جنس کاشی و حساسیت آن امکان استفاده از مواد واسطه پرکننده^۱ و حذف کامل این فاصله هوایی بین فرستنده و سطح کاشی وجود ندارد و در عمل مشاهده می‌شود که عدم اتصال مناسب می‌تواند باعث تأخیر زمانی نامعینی برای عبور سیگنال فراصوت گردد که در این صورت کاشی‌های سالم نیز در کلاس ناسالم دسته‌بندی می‌شوند؛ بنابراین باید روشی را به کار برد که عیب لایه‌ای شدن را بدون حساسیت نسبت به نحوه اتصال فرستنده و گیرنده تشخیص دهد، علاوه بر آن قابلیت اطمینان لازم را نیز فراهم نماید.



شکل ۴-۱: تصویری از طرح پشت کاشی و محل‌های نمونه‌گیری (نقاط دایره‌ای)

این مسائل باعث می‌شود تا نتوان تنها از زمان عبور سیگنال به‌عنوان معیاری برای تشخیص عیب لایه‌ای‌شدن استفاده کرد.

^۱ Couplant

برای حل این مشکل پس از ارسال پالس از فرستنده، سیگنال دریافتی برای مدت زمان قابل توجهی ذخیره شده، این عمل باعث شده است تا بتوان بر اساس اطلاعات زمانی و مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال، فارغ از تأخیر زمانی موجود به قضاوت در مورد وجود عیب در کاشی پرداخت.

برای تهیه مجموعه داده نسبت به تهیه نمونه سالم و معیوب از کارخانه تولید کاشی اقدام شد. نمونه‌های سالم را به راحتی می‌توان از روی خط تولید تهیه کرد اما برای تهیه نمونه‌های معیوب از خط تولید به دلیل اینکه از شکل ظاهر آن‌ها وجود عیب را نمی‌توان تشخیص داد و در حال حاضر نیز راهی برای تشخیص آن نه به صورت دستی و نه هوشمند وجود ندارد، به راحتی ممکن نیست.

یک‌راه برای تهیه نمونه‌های معیوب ایجاد عیوب مصنوعی در کاشی است [۲۳]. در این روش ورقه‌ای از کاغذ یا پلاستیک را قبل از پرس در قالب قرار داده تا بعد از پرس بین بدنه کاشی قرار گیرد؛ اما این روش اولاً نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی جهت تولید دارد و در خط تولید صنعتی قابل اجرا نیست و ثانیاً نوع عیب به وجود آمده با عیب لایه‌ای تفاوت دارد چراکه در اینجا عیب ناخالصی را به وجود آمده است و مشخصات عبور امواج از پلاستیک یا کاغذ با هوا متفاوت است.

در این پژوهش برای تهیه مجموعه داده از روشی بهتر استفاده شده است برای این منظور در خط تولید تنظیمات پرس را به گونه‌ای تغییر داده (کاهش زمان پرس) که محصول معیوب تولید شود و با شکستن کاشی‌های تولیدی از وجود عیب در آن‌ها اطمینان حاصل شود. تغییر تنظیمات را تا جایی که تمام کاشی‌های تولیدی یک پرس (در هر مرحله پرس ۵ کاشی تولید می‌شد) معیوب باشند؛ ادامه داده شد. زمانی که از وجود عیب در محصول اطمینان حاصل شد اقدام به تهیه نمونه‌های معیوب شده است. به دلیل آنکه نمونه‌های معیوب از استحکام خیلی کمی برخوردارند نمونه‌ها را در خشک‌کن قرارداده تا رطوبت آن کاهش یافته و امکان جابجایی آن‌ها به آزمایشگاه که مسافت زیادی داشت، فراهم شود. با توجه به محدودیت‌های ذکر شده تعداد ۱۶ عدد نمونه معیوب و ۱۰ نمونه سالم تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد.

برای تهیه مجموعه داده باید تعداد نمونه‌ها به حد کافی زیاد باشد. با توجه به اینکه ساختار داخلی در

بیسکوئیت‌های سالم و معیوب همگن نیست و از نقاط مختلف یک نمونه پاسخ کاملاً یکسانی دریافت نمی‌شود؛ اقدام به گرفتن سیگنال از نقاط مختلف ولی یکسان در نمونه‌ها شد. به دلیل وجود سطحی مشبک در بیسکوئیت شرایط قرار دادن فرستنده و گیرنده و میزان نیروی وارد به آن اهمیت زیادی دارد به همین منظور دستگاهی طراحی و ساخته شد تا علاوه بر نگه‌داشتن بیسکوئیت در حالت عمودی که دسترسی به بدنه را راحت‌تر می‌کند؛ دارای سوراخ‌هایی هم‌مرکز و هم‌قطر با فرستنده و گیرنده در دو طرف بدنه قالب باشد تا بتوان ضمن هم‌مرکز قرار دادن، به آن‌ها نیروی نسبتاً ثابتی اعمال کرد. بدیهی است که در این حالت نمونه سیگنال گرفته‌شده از هر سوراخ در روی بدنه تمامی نمونه‌ها نقطه کاملاً یکسانی است (دایره‌های روی شکل ۴-۱) و این خود بر دقت کار می‌افزاید.

ابتکاری که به‌کاربرده شد استفاده از دستگاه آزمون فراصوت بتن برای تهیه سیگنال بود. همان‌طور که گفته شد دستگاه PUNDIT 6 دارای دو فرستنده و گیرنده است که در دو طرف قطعه قرار می‌گیرد و پس از دریافت سیگنال در گیرنده اقدام به محاسبه زمان عبور امواج از قطعه می‌کند (شکل ۳-۱۱)؛ در کاربردهای صنعتی با توجه به ضخامت سازه‌های بتنی، سرعت عبور امواج را محاسبه و با مقایسه آن با جداول از قبل تهیه‌شده به تشخیص عیوب و محاسبه مشخصات فنی سازه‌های بتنی پرداخته می‌شود. با توجه به ضخامت کم کاشی و کوچک بودن ابعاد عیب در برابر فواصل هوایی که در بین فرستنده و گیرنده با سطح کاشی ایجاد می‌شود تشخیص نمونه سالم و معیوب از روی زمان یا سرعت عبور امواج امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین از نمایشگر دیجیتال مدل GDS-1052-U که قابلیت ذخیره‌سازی سیگنال را هم دارد استفاده شد؛ و خروجی پراب گیرنده به‌جای اتصال به دستگاه آزمون به اسیلوسکوپ جهت نمایش سیگنال دریافتی متصل شد. شکل ۳-۱۱ دستگاه طراحی شده را در حین تهیه مجموعه داده در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود نشان می‌دهد.

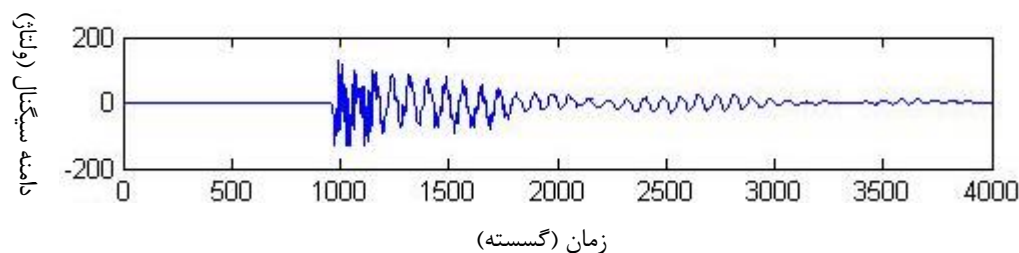


شکل ۴-۲: دستگاه طراحی شده برای نمونه‌گیری

انتخاب مدل نمایشگر فوق به دلیل آشکارسازی سیگنال دریافتی که دارای دامنه ولتاژ کم (در محدوده چند میلی ولت) است و امکان ذخیره‌سازی سیگنال، انجام شد. درنهایت پس از طی این فرایند تعداد ۲۱۰ نمونه سیگنال از کاشی سالم و ۳۳۶ سیگنال از کاشی معیوب تهیه و به‌عنوان مجموعه داده در مراحل بعد از آن استفاده شد.

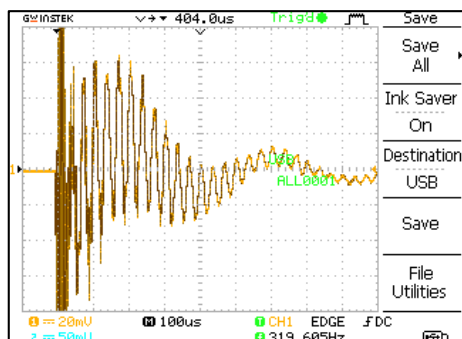
۳.۴ آنالیز ظاهری سیگنال

شکل ۴-۳ تصویری از یک سیگنال کامل نمونه‌برداری شده توسط اسیلوسکوپ را نشان می‌دهد. این سیگنال به مدت ۱/۶ میلی‌ثانیه و با نرخ نمونه‌برداری $10^6 \times 25$ ذخیره شده است که درمجموع ۴۰۰۰ نمونه را شامل می‌شود.

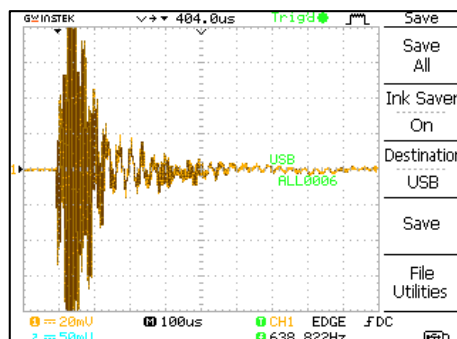


شکل ۳-۴: سیگنال زمانی عبوری از کاشی

این سیگنال توسط گیرنده‌ای که در طرف دیگر کاشی قرار گرفته است دریافت و با کمک نمایشگر دیجیتال ذخیره می‌شود. اطلاعات مختلفی داخل این سیگنال وجود دارد که باید به استخراج این اطلاعات پرداخت، در نگاه اول با مقایسه سیگنال عبوری از کاشی‌های سالم و معیوب شکل ۴-۴ می‌توان دید که مؤلفه‌های فرکانس بالا در سیگنال سالم بیشتر ظاهر شده است. علت این امر عبور نکردن فرکانس‌های بالا از لایه هوایی نمونه‌های معیوب است (به علت بالا بودن مقاومت آکوستیکی هوا)؛ اما این موضوع در تمام سیگنال‌ها به صورت آشکار وجود ندارد. بنابراین از حوزه فرکانس برای تحلیل سیگنال‌های به دست آمده می‌توان استفاده کرد.



(ب)



(الف)

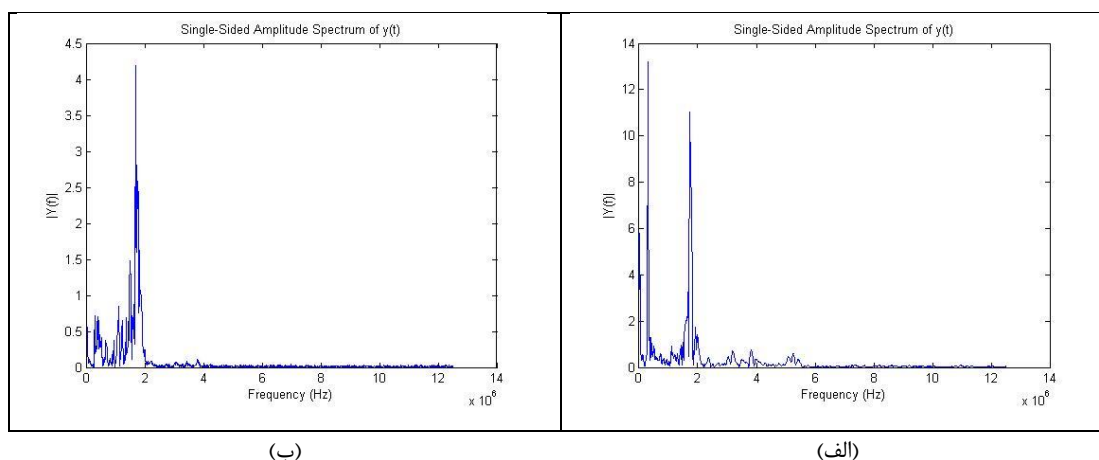
شکل ۴-۴: تصویر خروجی نمایشگر از سیگنال زمانی عبوری از کاشی سالم (الف) و کاشی معیوب (ب)

صفحه پیزوالکتریک موجود در فرستنده در زمان تحریک شروع به نوسان با فرکانس پایین کرده و پس از زمان کوتاهی به فرکانس طبیعی خود می‌رسد و سریع میرا می‌شود. پس وجود باندهای فرکانسی مختلف در سیگنال دریافتی طبیعی است. با نگاه به طیف فرکانسی (شکل ۴-۵) مشاهده می‌شود که سه محدوده فرکانسی را در سیگنال‌ها می‌توان در نظر گرفت. محدوده اول مربوط به فرکانس‌های کمتر از ۴۰ KHz، محدوده دوم فرکانس‌های بالاتر از ۴۰ و کمتر از ۴۰۰ KHz و محدوده سوم فرکانس‌های

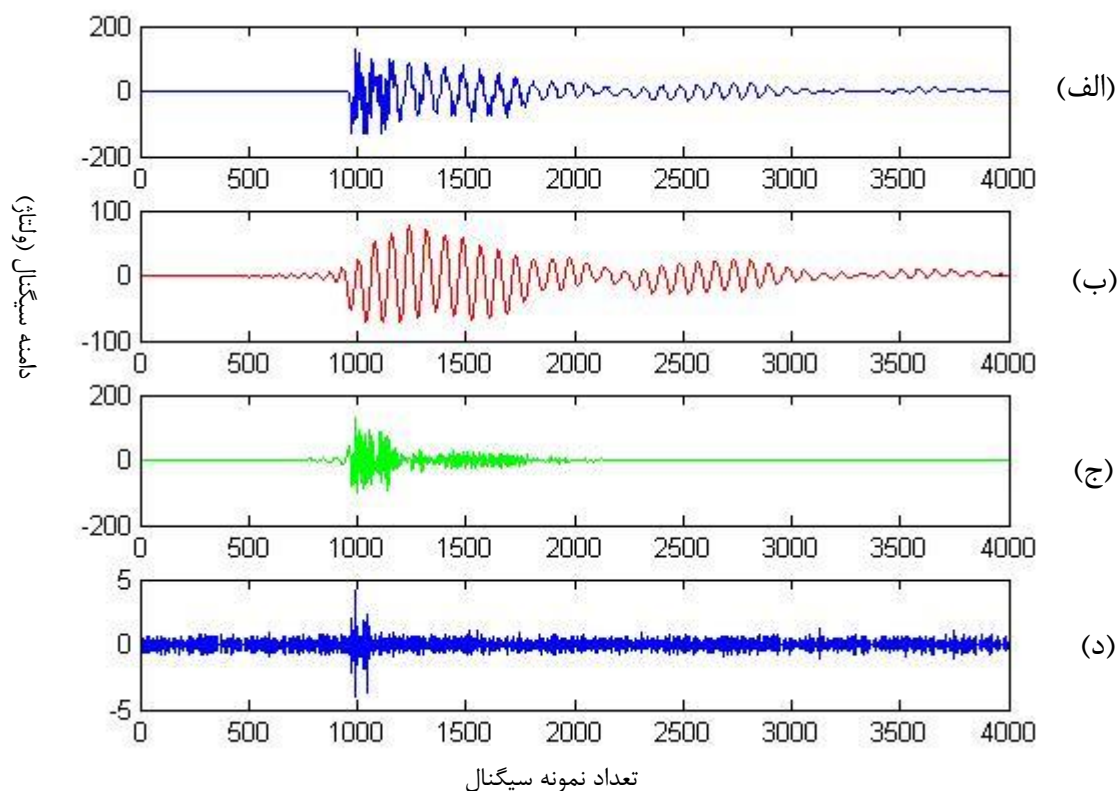
بالتر از ۴۰۰ KHz، به‌طوری‌که در ادامه می‌توان دید اگر این سه ناحیه را از هم جدا کرده و فرکانس بین ۴۰ و ۴۰۰ کیلوهرتز را به حوزه زمان برگردانده شود می‌توان اطلاعات خوبی را برای تشخیص سیگنال‌های سالم از معیوب به دست آورد. در ادامه این کار بر روی چند نمونه آزمایشگاهی انجام‌شده و نتایج آن به نمایش گذاشته‌شده است.

در شکل ۴-۹ از هر سیگنال چهار شکل تهیه‌شده است شکل اول سیگنال خام اولیه، شکل دوم مؤلفه‌های فرکانس پایین، شکل سوم محدوده فرکانسی مابین ۴۰ و ۴۰۰ کیلوهرتز و شکل چهارم مؤلفه‌های فرکانس بالا را نشان می‌دهد.

اگر سیگنال‌های باند میانی برای دو نمونه‌ی سالم (شکل ۴-۸) و معیوب (شکل ۴-۷) را در حوزه زمان را باهم مقایسه کنیم، وجود تمایز میان سیگنال حاصل از کاشی‌های معیوب و سالم تا حدودی قابل مشاهده می‌گردد. این امر در باند میانی فرکانس آن‌ها به‌خوبی نمایان است. (شکل ۴-۵)

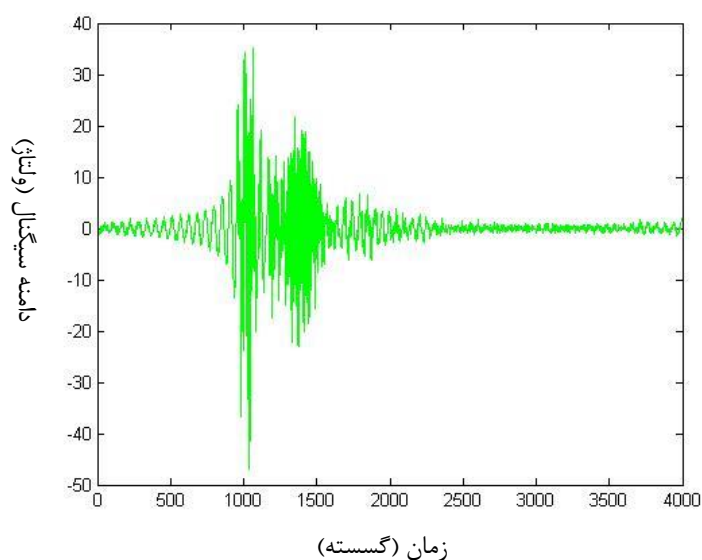


شکل ۴-۵: تبدیل فوریه گرفته‌شده از کاشی سالم (الف) و کاشی معیوب (ب)

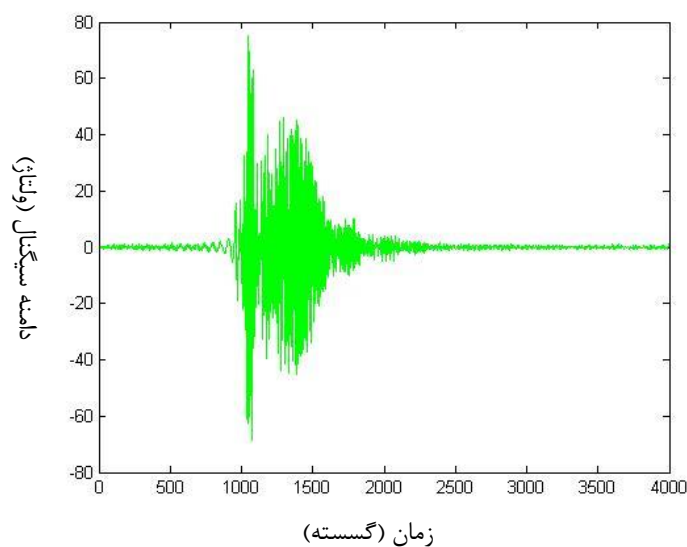


شکل ۴-۶: سیگنال تجزیه شده به باندهای مختلف فرکانسی توسط آنالیز موجک

الف) سیگنال ورودی، ب) سیگنال تقریب، ج) جزئیات مرحله ۱ و د) جزئیات مرحله ۲



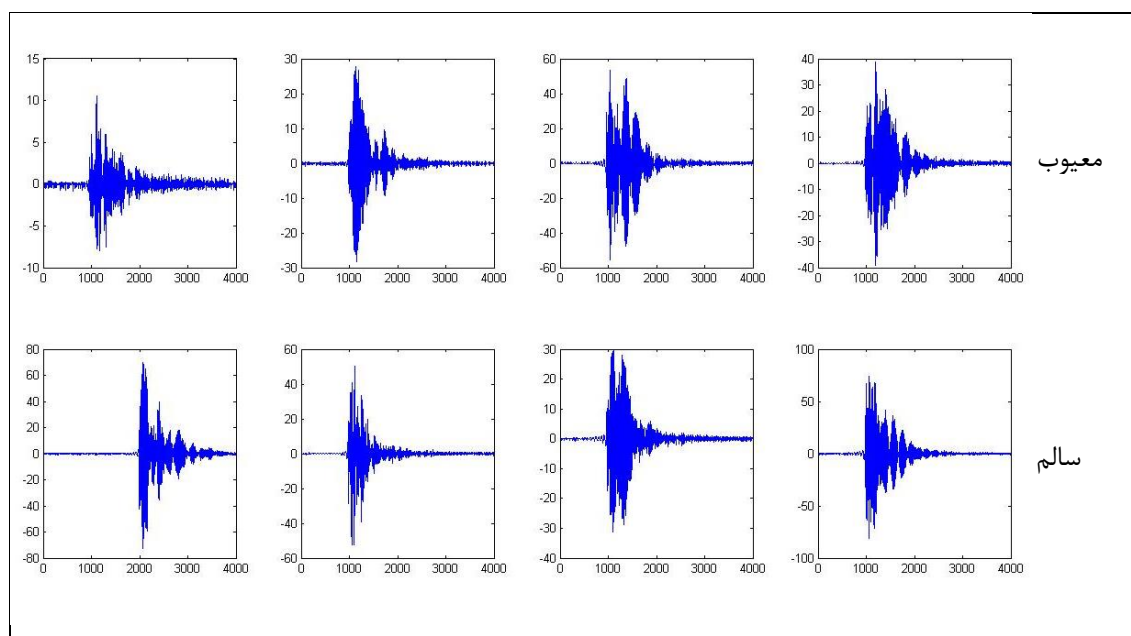
شکل ۴-۷: سیگنال باند میانی برای کاشی معیوب در حوزه زمان



شکل ۴-۸: سیگنال باند میانی برای کاشی سالم در حوزه زمان

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت سیگنالی که مؤلفه‌های فرکانس پایین و بالای آن حذف شده برای استفاده جهت طبقه‌بندی نسبت به کل سیگنال مناسب‌تر است؛ چراکه اطلاعات نامعتبر آن حذف گردیده است.

شکل ۴-۹ سیگنال باند میانی برای قسمت‌های سالم و معیوب کاشی‌هایی با عیوب مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۹: سیگنال باند میانی نمونه‌های سالم و معیوب

(محور افق: زمان (گسسته) – محور عمود: دامنه‌ی سیگنال (ولتاژ))

۴.۴ طبقه‌بندی با استفاده از باند میانی سیگنال

در فصل سوم به مباحث مرتبط با طبقه‌بندی اشاره شد در اینجا برای اثبات عملی بهتر بودن باند میانی نسبت به اصل سیگنال و باندهای پایین و بالا، دسته‌بندی را با طبقه‌بندهای مختلف در باندهای فرکانسی مختلف انجام شده است که میانگین عملکرد هر کدام در جدول زیر مشاهده می‌شود.

جدول ۴-۱: نتایج اولیه طبقه‌بندی با باندهای مختلف سیگنال

نوع طبقه‌بند	MLP	KNN	LVQ
باند پایین	۴۷/۵ درصد	۴۱/۷ درصد	۴۱/۲ درصد
باند میانی	۷۲/۳ درصد	۶۸/۷ درصد	۶۲ درصد
باند بالایی	۵۱/۳ درصد	۴۹/۶ درصد	۵۰ درصد

باند فرکانسی پایین سیگنال عبوری از قدرت بالایی برخوردار است و به راحتی تغییر نمی‌کند و باند فرکانسی بالا معمولاً حاوی نویزهای مختلف می‌باشد. در این بین باند میانی از دو عامل قبل میرا بوده و برای کلاسه‌بندی شرایط مناسب‌تری دارد. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود با استفاده از باند میانی سیگنال می‌توان به نتایج بهتری در طبقه‌بندی رسید. ولی در باندهای دیگر نیز اطلاعاتی وجود دارد و در صورتی که بتوان اثرات منفی آن‌ها را حذف کرد می‌توان در طبقه‌بندی نمونه‌ها از آن‌ها استفاده کرد. با توجه به اینکه باندهای فرکانسی در زمان‌های مختلف ظاهر می‌شوند می‌توان با بررسی فرکانس در محدوده‌های زمانی خاص به نتایج بهتری رسید. برای دستیابی به نتایج بهتر باید محدوده‌های زمانی مناسب را شناسایی کرد.

۵.۴ تعیین محدوده زمانی با ارزش سیگنال

حال با تعیین محدوده فرکانسی مناسب باید به سراغ تعیین بهترین محدوده زمانی برویم و مشخص کنیم کدام یک از محدوده‌های زمانی برای طبقه‌بندی مناسب‌تر است یا به عبارت دیگر، اطلاعات مهم در

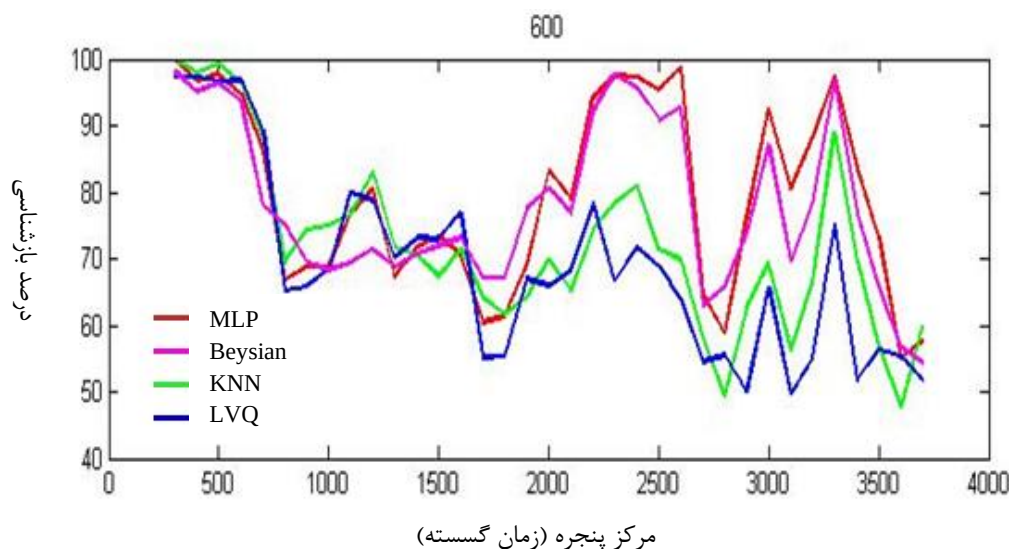
کدام‌یک از بازه‌های زمانی قرار دارد.

یافتن قسمت مناسب سیگنال زمانی برای بازشناسی سیگنال‌های سالم و معیوب:

در این مرحله یک پنجره به مرکز C و عرض W تعریف شده و روی بردار سیگنال زمانی قرار داده می‌شود و از داده‌های داخل پنجره، تبدیل فوریه گرفته و حاصل به ۳۰ قسمت مساوی با همپوشانی ۱۰ درصد تقسیم می‌شود و به‌عنوان بردار ویژگی برای تشخیص به هر چهار طبقه‌بند داده می‌شود. با توجه به اندازه سیگنال، عرض پنجره را در ابتدا ۵۰۰ گرفته و در هر مرحله ۱۰۰ واحد به آن اضافه می‌شود تا زمانی که عرض پنجره کل سیگنال را که ۴۰۰۰ نمونه دارد در برگیرد. همچنین مرکز پنجره‌ها نیز در ابتدا به اندازه نصف عرض انتخابی گرفته و در هر مرحله ۱۰۰ واحد به جلو منتقل می‌شود تا به انتهای سیگنال برسد.

با هر بار استخراج ویژگی هر چهار طبقه‌بند را اجرا و نتایج حاصل در ماتریسی چهاربعدی ذخیره می‌شود. این کار سه بار تکرار شده که به علت زمان‌بر بودن الگوریتم LVQ و زیاد بودن تعداد حالت‌ها هر بار اجرای برنامه حدود ۱۵ ساعت به طول می‌انجامد. سپس از نتایج به‌دست‌آمده برای هر طبقه‌بند در سه مرتبه تکرار، ماکزیمم جواب را به‌عنوان نتیجه آن طبقه‌بند برای هر عرض و مرکز، در ماتریس دیگری ذخیره می‌شود.

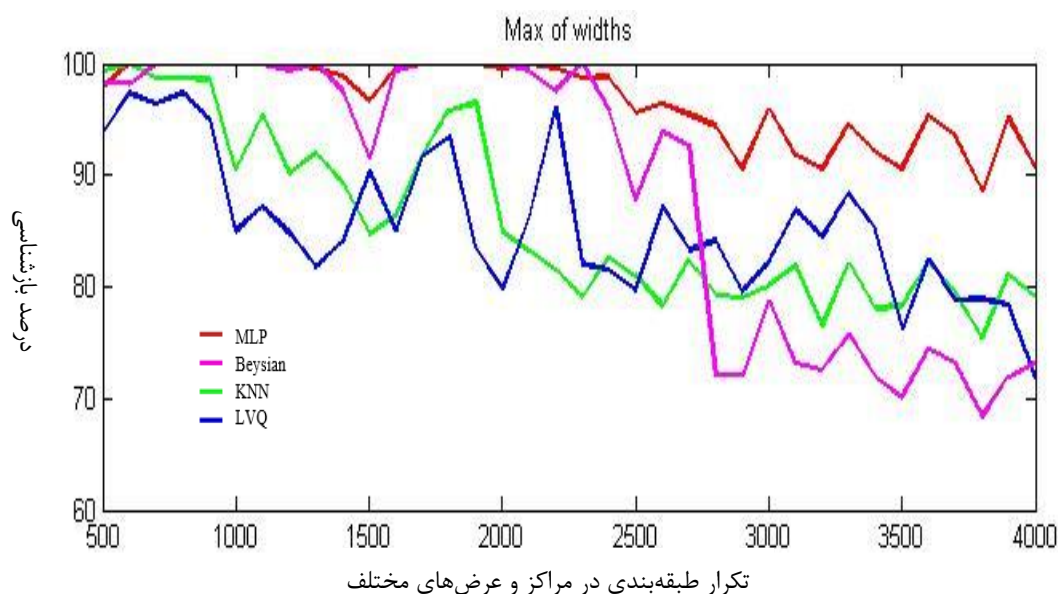
با رسم نتایج حاصل برای هر عرض پنجره یکسان و مراکز مختلف در یک نمودار مشاهده می‌شود که بهترین نتایج مربوط به عرض پنجره‌هایی بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ است و در این عرض‌ها جواب به‌دست‌آمده از طبقه‌بندها اگرچه باهم متفاوت است اما با تغییر مرکز پنجره باهم هماهنگی و هم‌خوانی دارند.



شکل ۴-۱۰: نتایج ماتریس max برای پنجره لغزان با عرض ۶۰۰ برای طبقه‌بندی‌های مختلف

در شکل ۴-۱۰ برای نمونه نتایج به‌دست‌آمده برای عرض پنجره ۶۰۰ پس از ۳ بار تکرار طبقه‌بند و انتخاب ماکزیمم نتایج به‌صورت نمودار رسم شده است.

برای یافتن مرکز و عرض پنجره مناسب، نتایج به‌دست‌آمده برای عرض‌های یکسان که ردیف‌های ماتریس نتایج را تشکیل می‌دهند به ترتیب از بزرگ به کوچک مرتب می‌شود (ماتریس Sorting_w)؛ که نمودار آن نیز در شکل ۴-۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۱: بهترین جواب برای هر عرض مشخص

نتایج به‌دست‌آمده که بهترین جواب حاصل برای هر پنجره است را به ترتیب کوچک به بزرگ مرتب

کرده تا دوباره از بین آن‌ها بهترین عرض و مرکز انتخاب شود. (جدول ۴-۶-جدول ۴-۹)
 حال برای آزمودن مجدد با توجه به ماتریس مرتب‌شده، با انتخاب بهترین جواب برای هر یک از طبقه‌بندها عرض و مرکز پنجره مربوط به همان جواب را محاسبه و از آن بازه استخراج ویژگی انجام شده و طبقه‌بندی مجدداً انجام می‌شود.

جدول ۴-۲-جدول ۴-۵ عرض و مرکز پنجره بهترین جواب‌های هر طبقه‌بند را نشان می‌دهد:

جدول ۴-۲: نتایج طبقه‌بندی با پنجره با عرض ۲۹۵۰ با مرکز ۲۱۰۰

که بهترین جواب طبقه‌بند MLP را به همراه داشته است.

MLP	۹۸/۷
KNN	۷۹/۴۵
LVQ	۶۶/۹
Beysian	۹۹/۳

جدول ۴-۳: نتایج طبقه‌بندی با پنجره با عرض ۶۰۰ با مرکز ۳۰۰

که بهترین جواب طبقه‌بند KNN را به همراه داشته است.

MLP	۹۴/۸
KNN	۹۷/۶
LVQ	۹۰/۹
Beysian	۹۵/۷

جدول ۴-۴: نتایج طبقه‌بندی با پنجره با عرض ۸۰۰ با مرکز ۲۵۰۰

که بهترین جواب طبقه‌بند LVQ را به همراه داشته است.

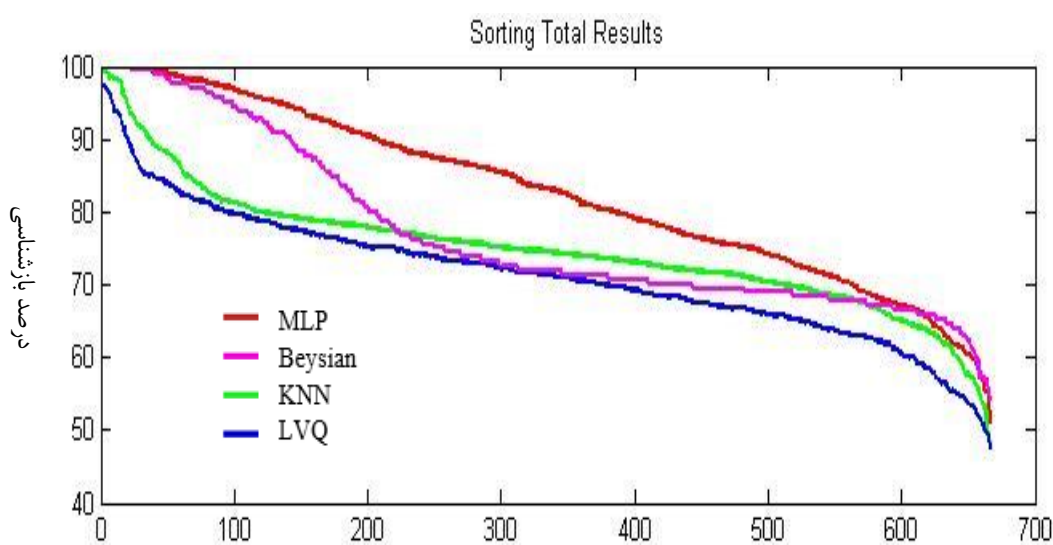
MLP	۱۰۰
KNN	۹۳/۲
LVQ	۸۸/۵
Beysian	۹۳/۵

جدول ۴-۵: نتایج طبقه‌بندی با پنجره با عرض ۲۳۰۰ با مرکز ۲۷۵۰

که بهترین جواب طبقه‌بند Bayesian را به همراه داشته است.

MLP	۹۷/۹
KNN	۷۵/۴
LVQ	۷۳/۱
Beysian	۹۶/۹

همان‌طور که مشاهده می‌شود بهترین عرض و مرکز پنجره برای تمام طبقه‌بندها یکسان نیست و هر کدام بازه بهینه خاص خود را دارد اما تا حدودی این بازه‌ها نزدیک به هم هستند. با بررسی نتایج عرض‌های یکسان چنین نتیجه می‌شود که بهترین جواب‌ها مربوط به بازه‌های کوچک است که مرکز آن‌ها در محدوده ابتدایی تا میانی سیگنال قرار دارد.



تمامی حالات ممکن که با تغییر عرض و مرکز بازه زمانی ایجاد می‌شود

شکل ۴-۱۲: نتایج مرتب‌شده برای کل نمونه‌ها و طبقه‌بندها

برای بررسی اینکه در کل بازه‌ها کدام طبقه‌بند عملکرد بهتری دارد نتایج به‌دست‌آمده را پس از ماکزیمم-گیری برای تمام بازه‌ها از بزرگ به کوچک مرتب می‌کنیم که نتیجه آن را در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود.

همان‌طور که از شکل هم قابل‌مشاهده است در حالت کلی بهترین جواب‌ها به ترتیب مربوط به طبقه‌بند

MLP، KNN، Beysian و LVQ است. نتایج جدول‌های جدول ۴-۲-جدول ۴-۵ نیز مؤید این مطلب است.

جدول ۴-۶: بهترین نتایج طبقه‌بند MLP از چپ به راست

درصد بازشناسی	۹۸/۹	۹۸	۹۷/۱	۹۶	۹۵/۹	۹۵/۸	۹۵/۲	۹۴/۳
مراکز	۳۰۰	۲۴۵۰	۲۳۰۰	۲۳۵۰	۲۴۰۰	۲۴۵۰	۲۵۰۰	۲۹۵۰
عرض	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۲۰۰	۱۷۰۰

در نتایج به‌دست‌آمده برای بازه‌های بالا همگی درصد تشخیص خوبی داشته‌اند.

جدول ۴-۷: بهترین نتایج طبقه‌بند KNN به ترتیب از چپ به راست

درصد بازشناسی	۹۷	۹۶/۱	۹۵/۴	۹۵/۱	۹۴/۵	۹۴	۹۳/۲	۹۲
مراکز	۲۶۰۰	۳۱۵۰	۳۳۵۰	۳۴۵۰	۳۰۰۰	۳۰۵۰	۴۵۰	۵۵۰
عرض	۱۰۰۰	۱۷۰۰	۱۳۰۰	۱۱۰۰	۱۸۰۰	۱۹۰۰	۹۰۰	۷۰۰

جدول ۴-۸: از چپ به راست به ترتیب بهترین نتایج LVQ

درصد بازشناسی	۹۲/۱	۹۱/۵	۹۰/۲	۸۴/۸	۸۱	۷۹/۳	۷۴/۱	۷۱/۸
مراکز	۲۶۰۰	۲۳۵۰	۱۱۵۰	۲۷۵۰	۳۰۰۰	۲۵۰	۴۵۰	۱۳۰۰
عرض	۲۶۰۰	۳۳۰۰	۱۵۰۰	۱۷۰۰	۱۸۰۰	۵۰۰	۹۰۰	۲۲۰۰

بهترین نتایج طبقه‌بند Beysian نیز نتایج ۱۰۰ درصد در بازه‌های زیر است:

جدول ۴-۹: بهترین نتایج Beysian از چپ به راست

درصد بازشناسی	۹۷	۹۶/۱	۹۶	۹۵/۹	۹۵/۴	۹۵	۹۴/۲	۹۱
مراکز	۲۵۵۰	۲۵۰۰	۲۳۵۰	۲۴۰۰	۲۵۵۰	۲۷۵۰	۲۸۵۰	۲۸۰۰
عرض	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۳۰۰	۱۷۰۰	۱۸۰۰

در واقع بهترین بازه سیگنال، نیمه ابتدائی آن است؛ اما بازه مشخصی برای آن نمی‌توان تعیین کرد به دلیل این‌که پیک شروع نوسان در یک نقطه خاص نیست و در بازه‌های قبل و بعد از بازه اصلی نیز اطلاعاتی محدود وجود دارد.

۶.۴ استخراج ویژگی با بسته موجک

برای کمک گرفتن از اطلاعات زمانی و افزایش قابلیت اطمینان و تکرارپذیری، از استخراج ویژگی با بسته موجک کمک گرفته شد. برای این منظور به سیگنال ورودی در سطوح مختلف بسته موجک اعمال شد. در هر مرحله با توجه به تعداد سطح انتخاب شده طول بردار ویژگی نیز تغییر می‌کند. بردار ویژگی حاصل را به طبقه‌بندهای مختلف داده و جواب در یک جدول به منظور مقایسه و نتیجه‌گیری نمایش داده می‌شود. (جدول ۴-۱۱)

برای اعمال بسته موجک از دستور آماده wpdec در نرم‌افزار متلب استفاده شده است:

(۳-۴)

```
wpt = wpdec(Tf, (i), M, 'db3', 'shannon')
```

در رابطه فوق Tf سیگنال ورودی است که یک بردار ۴۰۰۰ نمونه‌ای و مقدار M تعداد سطوح بسته موجک است.

از بین تعداد سطوح مختلف آزمایش شده همان‌طور که در جدول ۴-۱۱ مشاهده می‌شود از تقسیم باند فرکانسی به ۶ زیرباند نتایج بهتری حاصل شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سطوح پایین به دلیل همپوشانی زیاد اطلاعات فرکانسی نمونه‌های سالم و معیوب جواب مطلوبی حاصل نمی‌شود؛ اما هر چه تعداد سطوح بالاتر می‌رود اطلاعات زیرباندها از یکدیگر تفکیک‌تر شده و طبقه‌بندها قادر به تشخیص بهتری هستند. به‌ویژه طبقه‌بند MLP که به ویژگی‌های ورودی حساس نبوده و قادر است تا وزن ویژگی بی‌ارزش را کم و عملاً تأثیر آن را در تصمیم‌گیری به صفر برساند.

اما با عبور از عدد ۶ طول بردار ویژگی، از ۶۴ به ۱۲۸ ویژگی می‌رسد. بالا رفتن تعداد ویژگی تصمیم‌گیری را برای طبقه‌بندها دشوار می‌کند؛ بنابراین در ادامه کار عدد ۶ برای تعداد سطوح بسته موجک انتخاب شده است.

با قرار دادن عدد ۶ برای تعداد سطوح، سیگنال اولیه به ۶۴ زیرباند تقسیم می‌شود. به منظور تشکیل

بردار ویژگی مجموع قدر مطلق هر زیر باند به‌عنوان مشخصه آن زیرباند در نظر گرفته شد؛ و در ادامه با تشکیل ماتریس بردارهای ویژگی شبکه‌های طراحی‌شده از قبل آموزش داده و نتایج زیر حاصل شده است. نتایج جدول ۴-۱۰ میانگین نتایج حاصل از ۴ مرتبه اجرای برنامه طبقه‌بند با اعمال سطح ۶ بسته موجک است.

جدول ۴-۱۰: نتایج حاصل از طبقه‌بندی در چهار نوبت

نوبت تکرار	MLP	KNN	LVQ	Beysian
۱	۹۹/۲	۸۷/۹	۹۰/۲	۸۶/۵
۲	۹۹/۵	۸۶/۲	۷۵	۹۲/۴
۳	۹۹	۸۹/۱	۸۷/۱	۸۲/۳
۴	۹۹	۸۹/۵	۹۱/۴	۸۴/۱
میانگین	۹۹/۲	۸۸/۱	۸۵/۹	۸۶/۱

در این مورد با انتخاب بازه‌هایی که در بخش ۴-۵ به‌عنوان بازه‌های مفید جهت تشخیص بود که عمدتاً با طول کم و در ابتدا و میانه سیگنال قرار داشتند و با استخراج ویژگی از آن‌ها به نتایج خیلی خوبی رسیده بودیم، برخلاف انتظار دقت طبقه‌بندها به‌شدت کاهش می‌یابد و بلعکس با در نظر گرفتن تمام سیگنال، نتایج همان‌طور که مشاهده می‌شود مناسب و قابل قبول است.

طبقه‌بند LVQ به زمان زیادی برای آموزش نیاز دارد که این زمان چندین برابر مجموع زمان‌های موردنیاز بقیه طبقه‌بندها است بنابراین در این مرحله به دلیل اهمیت زمان در این پژوهش و علاوه پایین‌تر بودن درصد تشخیص آن از بقیه طبقه‌بند LVQ را با SVM جایگزین شد.

روند و نتیجه به‌کارگیری بسته موجک در استخراج ویژگی به‌صورت زیر می‌باشد:

ابتدا روی کل سیگنال بسته موجک را اعمال کرده و جمع قدر مطلق هر زیرباند را به‌عنوان یک ویژگی منظور می‌شود. بردار حاصل را برای کلاسه‌بندی به طبقه‌بندها داده می‌شود. برای بهینه کردن تعداد سطوح بسته موجک مجدداً این کار را با سطوح مختلف تکرار و میانگین‌گیری می‌شود

جدول ۴-۱۱: نتایج حاصل از طبقه‌بندی با سطوح مختلف بسته موجک

در هر سطح از بالا به پایین به ترتیب ۳ بار تکرار طبقه‌بندی و سپس میانگین‌گیری

تعداد سطوح	MLP	SVM	Bayesian	KNN
۲	۶۵/۹	۷۸/۱	۷۶/۲	۶۵/۳
	۵۰	۷۶/۶	۷۸/۶	۷۳/۷
	۵۶	۷۷/۳	۷۵/۶	۶۷
	۵۷,۳	۷۸,۴	۷۶/۸	۶۸/۷
۳	۸۲/۹	۸۷	۸۰/۴	۷۴/۱
	۸۳/۱	۹۲/۱	۸۱	۷۳/۳
	۸۲/۶	۹۱/۵	۸۲/۹	۷۶/۸
	۸۲/۹	۹۰/۲	۸۱/۵	۷۴/۷
۴	۵۰	۹۶/۶	۸۴/۱	۷۶/۳
	۸۶/۸	۹۶/۲	۸۲/۹	۷۹/۳
	۸۸/۵	۹۴/۸	۸۰/۴	۷۶/۱
	۷۵/۱	۹۵/۹	۸۲/۵	۷۷/۲
۵	۹۰/۳	۹۳/۹	۸۴/۷	۷۰/۶
	۷۰/۶	۸۹/۹	۷۸	۷۱/۸
	۷۹/۷	۹۳/۸	۸۲/۳	۷۰/۱
	۸۰/۲	۹۲/۵	۸۱/۷	۷۰/۸
۶	۹۸	۹۲/۱	۸۷/۱	۸۵/۲
	۹۷/۱	۸۹/۶	۸۹/۶	۸۴/۴
	۹۸/۱	۸۷/۸	۸۸/۴	۸۶/۵
	۹۷/۷	۸۹/۸	۸۸/۴	۸۵/۴
۷	۶۹/۶	۵۰	۶۰/۹	۷۲/۳
	۶۸/۵	۵۰	۶۲/۸	۶۶/۸
	۶۲/۷	۵۰	۶۲/۱	۷۰/۸
	۶۶/۹	۵۰	۶۱/۹	۶۹/۹

همان‌طور که در جدول ۴-۱۱ مشاهده می‌شود طبقه‌بند SVM در سطح ۴ دارای درصد بازشناسی

بالایی است و بقیه طبقه‌بندها در سطح ۶ درصد تشخیص بالاتری دارند. برای نشان دادن تکرارپذیری جواب طبقه‌بندها در جدول فوق نتایج ۴ بار تکرار طبقه‌بندی نمایش داده شده است. حال برای دستیابی به نتیجه مطلوب و استفاده از نتایج در ترکیب کلاسه‌بندها هر طبقه‌بند را در سطح بهینه خود به کار می‌گیریم. با اعمال این کار نتیجه به صورت زیر حاصل می‌شود:

جدول ۴-۱۲: طبقه‌بندی با سطوح بهینه هر طبقه‌بند

KNN	Beysian	SVM	MLP
۸۳	۸۶	۹۴/۴	۹۸

مشخص است که طبقه‌بند MLP به دلیل حساس نبودن به ویژگی‌های ورودی بهترین درصد بازشناسی را به خود اختصاص داده است.

۷.۴ ترکیب اطلاعات

ترکیب طبقه‌بندها امروزه از مباحث مطرح در بازشناسی الگو می‌باشد. درواقع استفاده از ترکیب نتایج چند طبقه‌بند یکی از روش‌های افزایش کارایی سیستم‌های بازشناسی الگو است که در سال‌های اخیر محققین زیادی به آن پرداخته‌اند. برای آنکه ترکیب نتایج طبقه‌بندها مفید واقع شود باید طبقه‌بندهای پایه ضمن برخورداری از کارایی قابل قبول، با یکدیگر متفاوت بوده و قاعده ترکیب مناسبی برای تلفیق نتایج آن‌ها بکار گرفته شود. قاعده ترکیب باید به گونه‌ای انتخاب شود که طبقه‌بندها نقاط ضعف یکدیگر را بپوشانند.

دو دیدگاه در مورد این زمینه عبارت‌اند از:

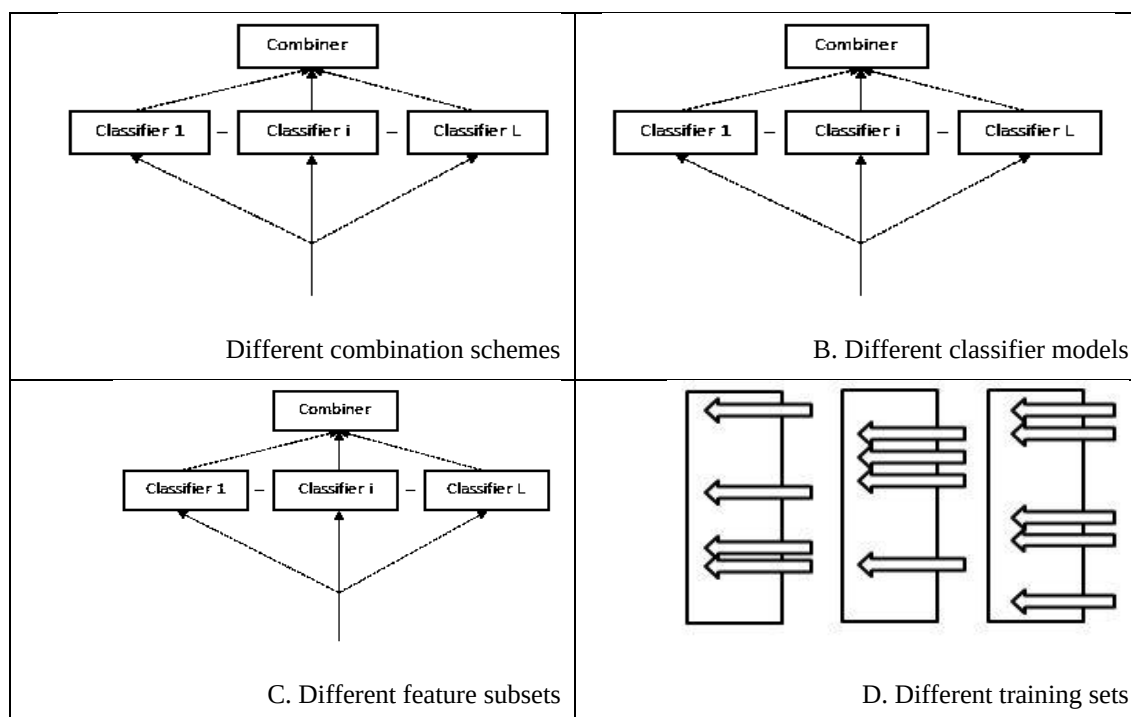
دیدگاه اول: هر طبقه‌بند تا حد خاصی قادر به تصمیم‌گیری صحیح است و هیچ طبقه‌بندی قادر به تشخیص صحیح همه الگوها در تمام شرایط نیست. معمولاً برای یک کاربرد خاص، یک طبقه‌بند به تنهایی نرخ بازشناسی مورد نیاز را برآورده نمی‌کند و برای رسیدن به نرخ بازشناسی مورد نظر به

ترکیب چند طبقه‌بند نیاز است.

دیدگاه دوم: در بسیاری از موارد استفاده از برخی تبدیل‌ها، منجر به پیدایش یک بردار ویژگی بزرگ می‌شود. تحلیل بردارهای ویژگی بزرگ توسط یک طبقه‌بند، زمان پردازش را طولانی می‌کند که این موضوع در سیستم‌های بلادرنگ تشخیص عیب، مشکل ایجاد می‌کند. ترکیب طبقه‌بندها، این امکان را فراهم می‌آورد که بردارهای ویژگی با ابعاد بزرگ به بردارهای کوچک‌تری تقسیم‌شده و توسط طبقه‌بندهای کوچک‌تر و ساده‌تر به صورت همزمان پردازش شوند. طبقه‌بندی نهایی با ترکیب نتایج این طبقه‌بندها صورت می‌گیرد.

۱.۷.۴ رویکردهای ترکیب طبقه‌بندها

شکل ۴-۱۲ چهار راهکار مختلف را برای طراحی یک سیستم ترکیب طبقه‌بندها نشان می‌دهد. در **رویکرد اول** فرض بر این است که طبقه‌بندهای $D_1, D_2, \dots, D_L$ موجود می‌باشد (که قبلاً آموزش داده‌شده‌اند) و مسئله یافتن و آموزش (در صورت نیاز) مدلی برای ترکیب آن‌ها می‌باشد. در **رویکرد دوم** هر نوع طبقه‌بند می‌تواند به عنوان عضوی از گروه مطرح شود؛ بنابراین D می‌تواند هم‌جنس باشد یا به عبارت دیگر از طبقه‌بندهایی با مدل یکسان ولی ساختار و پارامترهای متفاوت تشکیل شده باشد (همانند شبکه عصبی چندلایه MLP). همچنین می‌توان طبقه‌بندهای ناهم‌جنسی را طراحی کرد. در **رویکرد سوم** طبقه‌بند بر روی زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها بنا می‌شود. این نگاه زمانی مناسب است که تعداد ویژگی‌ها بسیار زیاد باشد و هر گروه از ویژگی‌ها از منبع مختلفی و یا زیرسیستم پیش‌پردازشی متفاوتی استخراج شده باشد.



شکل ۴-۱۳: رویکردهای مختلف برای ایجاد گوناگونی لازم در ترکیب طبقه‌بندها

در رویکرد چهارم بیشتر محققین بر این باورند تغییرات بر روی داده‌های آموزش قوی‌ترین روش می‌باشد. چراکه منجر به بیشترین گوناگونی در طبقه‌بندها می‌گردد. به‌طوری‌که هیچ‌کدام از روش‌های قبل قادر به انجام آن نیستند. گوناگونی در طبقه‌بندها همان‌طور که قبلاً گفته شد بدین معنی است که خطای طبقه‌بندی هرکدام از طبقه‌بندها با دیگری متفاوت است؛ درحالی‌که همه آن‌ها از دقت کلی خوبی برخوردار هستند. برای ایجاد طبقه‌بندهای پایه با مجموعه‌های یادگیری متفاوت، روش‌های تقسیم فضای ویژگی بین طبقه‌بندهای پایه، افزودن نویز به داده‌های ورودی، انجام تبدیلات غیرخطی بر روی بردارهای ویژگی و ... پیشنهاد شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده برای ترکیب خروجی‌های طبقه‌بندهای KNN، شبکه عصبی و SVM با استفاده از انتگرال‌های فازی سوگنو به‌صورت جدول ۴-۱۳: نتایج طبقه‌بندی با انتگرال فازی سوگنو است.

جدول ۴-۱۳: نتایج طبقه‌بندی با انتگرال فازی سوگنو

	معیوب	سالم	مجموع
معیوب	۱۵۲	۰	۱۵۲
سالم	۲	۹۲	۹۴
مجموع	۱۵۴	۹۲	۲۴۶

با توجه به ماتریس ارائه‌شده، دقت برابر با ۹۹,۱۹٪ می‌باشد؛ که علاوه بر اینکه از نتایج طبقه‌بندی‌های پایه بالاتر است، قابلیت اطمینان به این جواب با توجه به اینکه از نتایج چند طبقه‌بند مختلف استفاده می‌کند، بالاتر است. مشکل اساسی ترکیب‌کننده انتگرال فازی این است که چگالی فازی g برای طبقه‌بندها معلوم نیست. روش بیان‌شده در فوق، یعنی استفاده از نرخ بازشناسی روی نمونه‌های آموزشی برای تعیین چگالی فازی، یکی از راهکارهای غلبه بر این مشکل است. همچنین در این پایان‌نامه به‌منظور رسیدن به مقادیر چگالی‌های فازی بهینه‌شده، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده‌شده است که نتایج تا حد قابل قبولی افزایش‌یافته است.

بعد از استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO (به‌منظور بهینه‌سازی مقادیر چگالی‌های فازی ارائه‌شده در شبیه‌سازی قبل) نتایج طبقه‌بندی به‌صورت زیر بهبودیافته است که بسیار قبول است.

جدول ۴-۱۴: نتایج طبقه‌بندی با انتگرال فازی سوگنو بهینه‌شده

	معیوب	سالم	مجموع
معیوب	۱۵۴	۰	۱۵۴
سالم	۰	۹۲	۹۲
مجموع	۱۵۴	۹۲	۲۴۶

خروجی الگوریتم بهینه‌سازی به‌صورت زیر می‌باشد.

جدول ۴-۱۵: مقادیر بهینه شده چگالی‌های فازی

طبقه‌بند	g_{SVM}	g_{KNN}	g_{MLP}
چگالی فازی	۰/۳۰۵۸	۰/۷۷۲۵	۰/۸۷۹۴

در واقع با استفاده از این روش دقت طبقه‌بندی نمونه‌های سالم و معیوب به ۱۰۰٪ افزایش یافته است؛ و

نیز درصد اطمینان به نتایج بیشتر شده است.

انتخاب سه طبقه‌بند پایه، از این جهت بوده است که نتایج طبقه‌بندی‌های KNN، شبکه عصبی و SVM دارای گوناگونی زیادی است و در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، همواره ترکیب نتایج روی آن‌ها منجر به بهبود نتایج می‌شود. علت این امر را می‌توان تفاوت در ساختار طبقه‌بندی و نحوه آموزش طبقه‌بند دانست.

فصل پنجم

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۱.۵ جمع‌بندی

یکی از مشکلات کنترل کیفیت در کارخانه‌های تولید کاشی و سرامیک وجود عیوب داخلی در محصولات است. یکی از این عیوب لایه‌ای شدن است که از ظاهر کاشی قابل‌شناسایی نبوده و تنها راه شناسایی آن در انتهای خط تولید است که با استفاده از صدای ناشی از ایجاد ضربه به سطح آن می‌توان آن را شناسایی کرد البته نیاز به مهارت و دقت بالایی دارد. وجود این عیب در محصول باعث کاهش شدید کیفیت محصولات تولیدی می‌شود. در پژوهش ارائه‌شده روشی ارائه شد تا بتوان وجود این عیب را در همان ابتدایی‌ترین مرحله تولید یعنی در مرحله پرس آن را تشخیص داد. در این مرحله با توجه به اینکه هنوز هزینه‌ای روی محصول انجام نگرفته و محصول به راحتی قابل برگشت دادن به چرخه تولید است توجیه اقتصادی زیادی دارد. گرچه این عیب همیشه در خط تولید وجود ندارد ولی در صورت وجود با توجه به مشخص نبودن آن و تشخیص در انتهای خط تولید می‌تواند هزینه‌های زیادی را به کارخانه تحمیل کند.

برای تهیه مجموعه داده موردنیاز جهت آموزش طبقه‌بندها با توجه به اینکه این کار در این مرحله از تولید، مشابهی نداشت اقدام به تهیه آن در آزمایشگاه شد. برای این منظور روشی با استفاده از دستگاه آزمون فراصوت بتن پیشنهاد شد و برای رسیدن به مجموعه داده مناسب در آن تغییراتی داده شد. در ادامه به استخراج ویژگی از نمونه‌ها پرداخته شد. با توجه به تغییرات فرکانس در نمونه‌های سالم و معیوب با استفاده از اعمال تبدیل فوریه بر سیگنال و تقسیم‌بندی اطلاعات حاصل درصد خوبی در بازشناسی حاصل شد. سپس به تعیین محدوده زمانی مناسب سیگنال پرداختیم و برای این منظور از پنجره‌ای با عرض متغیر که روی سیگنال حرکت می‌کرد، ویژگی‌ها استخراج شد و با این روش اطلاعات غیرضروری حذف شد و تا حدودی نتایج را بهبود بخشید.

با استفاده از استخراج ویژگی با بسته موزون نیز به دلیل آنکه اطلاعاتی را دور نمی‌ریخت در بهبود نتایج تأثیر خوبی داشت. به‌ویژه با استفاده از طبقه‌بند MLP، چرا که این طبقه‌بند به بردار ورودی زیاد حساس

نیست و به راحتی می‌تواند اثر ویژگی‌های غیرمفید را با کاهش وزن آن‌ها جبران کند.

با توجه به اینکه از همان ابتدا به منظور اطمینان از انتخاب طبقه‌بند مناسب و استفاده از ترکیب اطلاعات در صورت لزوم، از چند طبقه‌بند استفاده شد در انتها با اعمال ترکیب اطلاعات درصد بازشناسی را به مقدار بسیار خوبی افزایش دادیم. در این پژوهش درصد بازشناسی تا ۱۰۰ افزایش یافت که این نتیجه به دلیل پایین بودن تعداد نمونه‌ها و همچنین تهیه نمونه از یک کارخانه، یک خط تولید و یک طرح خاص از کاشی بوده است قطعاً با ایجاد تنوع در نمونه‌های اولیه و بالا بردن تعداد آن‌ها می‌توان به نتایج مطمئن‌تری دست یافت.

۲.۵ پیشنهادها

- ۱- در این پژوهش از دستگاه آزمون فراصوت بتن با فرستنده و گیرنده تماسی استفاده شد که می‌توان با استفاده از فرستنده و گیرنده‌های غیر تماسی مشکلات ناشی از عدم اتصال مناسب را کاهش داد.
- ۲- در صورت استفاده از دستگاه‌های دقیق و حذف نامعینی زمان عبور امواج، از طریق بررسی همزمان فرکانس و زمان عبور امواج می‌توان علاوه بر تشخیص بهتر عیب لایه‌ای به بررسی مشخصات داخلی کاشی نظیر چگالی و استحکام نیز دست یافت.
- ۳- با قرار دادن چند حس‌گر به صورت آرایه‌ای و مقایسه سیگنال‌های نقاط مختلف با یکدیگر علاوه بر بالا بردن سرعت، که نیاز پیاده‌سازی در خط تولید است؛ می‌توان با حذف آموزش به تشخیص عیب و تعیین تغییرات چگالی پرداخت. با این کار می‌توان عیوب دیگر نظیر انحنای سطح و ترک را نیز که در مراحل بعد به وجود می‌آید تشخیص داد.
- ۴- به دلیل حرارتی که بیس‌کوئیت پس از خروج از خشک‌کن دارد (حدود ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)؛ می‌توان با استفاده از دوربین‌های حساس به دما و تجزیه و تحلیل تصویر تهیه شده به تشخیص عیب لایه‌ای پرداخت.

- [1] Amorós, J., Orts, M., García-Ten, J., Gozalbo, A., & Sánchez, E. (2007). Effect of the green porous texture on porcelain tile properties. *Journal of the European Ceramic society*, 27(5), 2295-2301.
- [2] Nassetti, G., & Palmonari, C. (1997). DECORATION OF PORCELAIN STONEWARE TILES. *Ceram. Acta*, 9(5), 15-21.
- [3] Bendanti, F. (2004). DIE EVOLUTION FOR MORE FLEXIBLE LINES. *Ceramic World Review*, 14(57), 94-96.
- [4] Celik, H. (2011). Effect of spray-dried powder granularity on porcelain tile properties. *Journal of Ceramic Processing Research*, 12(4), 483-487.
- [5] Sari-Sarraf, H., & Goddard Jr, J. S. (1999). Vision system for on-loom fabric inspection. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 35(6), 1252-1259.
- [6] Desoli, G., Fioravanti, S., Fioravanti, R., & Corso, D. (1993). *A system for automated visual inspection of ceramic tiles*. Paper presented at the Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993. Proceedings of the IECON'93., International Conference on.
- [7] Smith, M. L., & Stamp, R. J. (2000). Automated inspection of textured ceramic tiles. *Computers in Industry*, 43(1), 73-82.
- [8] Mak, K. L., & Peng, P. (2008). An automated inspection system for textile fabrics based on Gabor filters. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(3), 359-369.
- [9] Rimac-Drlje, S., Keller, A., & Hocenski, Z. (2005, 20-23 June 2005). *Neural network based detection of defects in texture surfaces*. Paper presented at the Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005. Proceedings of the IEEE International Symposium on.
- [10] Chen, P., & Sun, Z. (1991). A review of non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 49, 85-98.
- [11] Hoła, J., & Schabowicz, K. (2010). State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures—anticipated development trends. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10(3), 5-18.
- [12] Pietroni, P., & Revel, G. LASER ULTRASONICS FOR QUALITY CONTROL IN THE CERAMIC INDUSTRY. Application to bulk density measurement.
- [13] Amoros, J., Mallol, G., Llorens, D., Boix, J., Arnau, J., Feliu, C., . . . Gargallo, J. (2010). Study of the pressing operation of large-sized tiles using X-ray absorption.

- [14] Packman, P., Pearson, H., Owens, J., & Young, G. (1969). Definition of fatigue cracks through nondestructive testing. *Journal Materials*.
- [15] Ohtsu, M. (1996). The history and development of acoustic emission in concrete engineering. *Magazine of concrete research*, 48(177), 321-330.
- [16] Bueno, S., Hernandez, M., Sanchez, T., Anaya, J., & Baudin, C. (2008). Non-destructive characterisation of alumina/aluminium titanate composites using a micromechanical model and ultrasonic determinations: Part I. Evaluation of the effective elastic constants of aluminium titanate. *Ceramics International*, 34(1), 181-188.
- [17] Aggelis, D., & Philippidis, T. (2004). Ultrasonic wave dispersion and attenuation in fresh mortar. *NDT & E International*, 37(8), 617-631.
- [18] Kulokas, M., Kazys, R., & Mazeika, L. (2011). Non-destructive evaluation of green ceramic body density by ultrasonic technique. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 111(5), 71-76.
- [19] KURAMA, S., & EREN, E. (2012). Characterization of Mechanical Properties of Porcelain Tile Using Ultrasonics. *Gazi University Journal of Science*, 25(3), 761-768.
- [20] Eren, E., & Kurama, S. (2013). Defect Detection in Porcelain Tiles Using Ultrasound *Nondestructive Testing of Materials and Structures* (pp. 381-386): Springer.
- [21] Kesharaju, M., & Nagarajah, R. (2014). Determination of Density Variation and Microstructure in Reaction-sintered SiC Ceramics Using Ultrasonic Time-of-Flight. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 11(2), 303-310.
- [22] Kesharaju, M., Nagarajah, R., Zhang, T., & Crouch, I. (2014). Ultrasonic sensor based defect detection and characterisation of ceramics. *Ultrasonics*, 54(1), 312-317.
- [23] Eren, E., Kurama, S., & Janssen, R. (2012). Ultrasonic characterization of defective porcelain tiles. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 51(4), 211-216.
- [24] Revel, G., Tomasini, E., Pandarese, G., & Cavuto, A. (2011). Non-Contact Measurements of the Apparent Density of Green Ceramics with Complex Shape.
- [25] Kulokas, M., Kazys, R., Mazeika, L., Sliteris, R., & Deksnys, V. (2012). Estimation of ultrasound velocity spatial distributions in green ceramic tiles. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 18(9), 67-70.
- [26] Romagnoli, M., Burani, M., Tari, G., & Ferreira, J. M. (2007). A non-destructive method to assess delamination of ceramic tiles. *Journal of the European Ceramic society*, 27(2), 1631-1636.

Abstract

Automating fault detection in a manufacturing process is an important step to improve quality, reduce manpower and promote customer satisfaction. In Tile factories, an essential fault, which sometimes cannot be detected by human, is the lamination fault, which is due to the remained air within the tile. More quickly finding this fault, the cost will be less. In this thesis an intelligent method based on ultrasonic waves is proposed which can detect the fault before firing up the tile. At first, we prepared a dataset of 546 ultrasound waves of healthy and damaged tiles using an ultrasound transmitter and receiver. Then we used Fast Fourier Transform and Wavelet for feature extraction. Several classifiers including MLP, KNN, SVM, LVQ and Bayesian are tested to classify healthy and damaged tiles. MLP achieved 97% accuracy which is the best results among the selected classifiers. At the end, Sugeno Integral is used for classifier combination, which improved the classification accuracy up to 100%.

Keywords:

Tile and ceramic, Ultrasonic, Lamination, Classification, Sugeno Integral



Shahrood University
Faculty of Mechanical Engineering

A new Method for Detecting Layering Defect in Tiles using Ultrasound

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science (M.Sc.)
In Mechanical Engineering, Mechatronics

Mohamadali Akbarian torkabad

Supervisors:

Dr. Alireza Ahmadifard, Dr. Hossein Khosravi

Advisor:

Dr. Amir Jalali

2013