بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده کشاورزی

گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی

عنوان

شناسایی ژنوتیپ‌های گردو با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

استاد راهنما

دکتر اصغر محمودی

استاد مشاور

دکتر عادل حسین‌پور

پژوهشگر

سیمین خالصی

بهمن ۱۳۸۹

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم

و

همسر مهربانم

نام خانوادگی دانشجو: خالصی نام: سیمین

عنوان پایان‌نامه: **شناسایی صوتی ژنوتیپ‌های گردو به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی**

استاد راهنما: دکتر اصغر محمودی

استاد مشاور: دکتر عادل حسین‌پور

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی کشاورزی گرایش: مکانیک ماشین‌های کشاورزی

دانشگاه: تبریز دانشکده: کشاورزی تاریخ فارغ‌التحصیلی: زمستان ۱۳۸۹ تعداد صفحه: ۹۲

کلید واژه‌ها: تبدیل فوریه سریع، تجزیه به مولفه‌های اصلی، گردو، شبکه عصبی مصنوعی، صوت.

چکیده:

گونه‌های مختلف گردو که در رویشگاه‌های وسیعی در دنیا و ایران به طور طبیعی روییده و کاشته می‌شوند، جزو درختان چندمنظوره بوده و از نظر اقتصادی بسیار پراهمیت محسوب می‌شوند. کشور ایران قسمتی از رویشگاه‌های وسیع گردو را شامل می‌شود، به‌طوری که در برخی از کشورها گردو را با نام "گردوی ایرانی" نام می‌برند. اما امروزه تجارت گردو در ایران در بین کشورهای تولید کننده اندک می‌باشد. گونه‌ها، واریته‌ها و نژادهای گردوی ایران از نظر گسترش‌گاه، کیفیت میوه و کمیت مواد تشکیل دهنده مغز آن مورد بررسی قرار نگرفته است و ارقام موجود، در واقع ارقام بومی هستند. بررسی گردوهای ایران که یک منبع غنی ژنتیکی به شمار می‌آیند، میدان کار وسیعی در برابر علوم باغبانی و تشخیص و شناسایی گردو، طبقه‌بندی و بسته‌بندی آن می‌گشاید و ایران می‌تواند یکی از مهم‌ترین صادرکنندگان گردو باشد.

در این تحقیق یک سیستم هوشمند مبتنی بر صوت طراحی گردید و امکان استفاده از آزمون پاسخ آکوستیک برای تشخیص دسته‌هایی از گردو که بر مبنای خواص فیزیکی دسته‌بندی شده بودند، مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور حدود ۳۰ کیلوگرم مخلوط گردو از ارقام بازار تهیه شد. گردوها به صورت تکی روی یک نبشی قرار گرفته و به صفحه برخورد هدایت شدند. صدای حاصل از ضربات نمونه‌ها ضبط شده و با پردازش آن در دو حوزهٔ زمان و فرکانس، صفات مربوط به هریک از دسته‌ها استخراج گردید. برای افزایش سرعت شناسایی و انعطاف سیستم، از شبکهٔ عصبی چندلایه به‌عنوان واحد تصمیم‌گیرنده استفاده شد. سپس صفات مطلوب انتخاب، و به عنوان بردار ورودی شبکهٔ عصبی مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌های مختلفی از شبکه‌های عصبی با معیار میانگین مربعات خطا، نرخ شناسایی صحیح و ضریب همبستگی مورد ارزیابی قرار گرفت و مدل بهینه با ساختار ۴-۲۰-۸۸ برای شناسایی دسته‌های گردوها انتخاب گردید. در نهایت، سیستم قادر بود چهار دسته گردو به نام‌های سنگی، کاغذی۱، کاغذی۲ و کندلر را با نرخ تشخیص صحیح ۹۶/۹۷، ۹۰/۵۰، ۸۶/۲۸ و ۸۹/۲۰ و میانگین مربعات خطای ۰/۰۱۷، ۰/۰۶۸، ۰/۰۶۱ و ۰/۰۴۰ و ضریب همبستگی ۰/۹۵، ۰/۸۱، ۰/۸۳، ۰/۸۹ تشخیص دهد.

همچنین به‌عنوان یک هدف جنبی، سعی شد تا به روش غیرمخرب آکوستیک، مدل هوشمندی برای پیش‌بینی چگالی گردو که معرف کیفیت مغز آن است، ارائه شود. در این راستا، پس از تعیین چگالی، گردوها با سقوط روی صفحه فولادی مورد آزمایش قرار گرفته و صدای حاصل از برخورد، برای پردازش بعدی به کامپیوتر منتقل گردید. صفات موثر، از آنالیز سیگنال حاصل از ضربه در حوزه زمان و فرکانس استخراج شد. در مجموع ۶۲ ویژگی با استفاده از روش آماری تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) انتخاب و پس از نرمال شدن به عنوان ورودی به شبکه‌عصبی داده شد. مدل‌های مختلف شبکه‌عصبی، هر کدام با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه پنهان آموزش داده شد. درنهایت مدل بهینه بر مبنای ضریب همبستگی (r) و میانگین مربعات خطا (MSE) با ۶۲ ورودی و ۲۶ نرون در لایه پنهان انتخاب گردید. MSE مدل انتخابی برای تعیین چگالی گردو برابر ۰/۰۰۷ و ضریب همبستگی آن (r) معادل ۰/۸۱ می‌باشد.

فهرست

عنوان | شماره صفحه

فصل اول مقدمه

مقدمه ۲

فصل دوم بررسی منابع

۲-۱ گردو ۳

۲-۲ صوت ۵

۲-۲-۱ تراز شدت صوت ۵

۲-۲-۲ مزایای آزمون‌های صوتی ۶

۲-۳ سیگنال و پردازش سیگنال ۷

۲-۳-۱ سری فوریه ۹

۲-۳-۲ تبدیل فوریه ۱۰

۲-۳-۲-۱ تبدیل فوریه زمان گسسته DTFT ۱۱

۲-۳-۲-۲ تبدیل فوریه گسسته DFT ۱۱

۲-۳-۲-۳ تبدیل فوریه سریع FFT ۱۲

۲-۳-۳ نمایش تبدیل فوریه ۱۳

۲-۴ شبکه‌های عصبی مصنوعی ۱۴

۲-۴-۱ مقدمه ۱۴

۲-۴-۲ ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی ۱۶

۲-۴-۳ فرایند یادگیری ۱۷

۲-۴-۴ شبکه پرسپترون ۱۸

۲-۴-۵ شبکه عصبی پس انتشار ۱۹

۲-۴-۶ الگوریتم آموزش پس انتشار خطا ۱۹

۲-۵ الگوریتم‌های کاهش داده ۲۶

۲-۵-۱ تجزیه به مولفه‌های اصلی PCA ۲۶

۲-۵-۲ روش تجزیه به مولفه‌های اصلی ۲۷

۲-۶ مروری بر تحقیقات انجام یافته ۲۹

۲-۷ هدف ۳۹

فصل سوم مواد و روش‌ها

۳-۱ نمونه‌های مورد استفاده ۴۰

۳-۲ تعیین خصوصیات فیزیکی ۴۱

۳-۲-۱ اندازه‌گیری محتوای رطوبتی ۴۱

۳-۲-۲ اندازه‌گیری جرم و حجم ۴۱

۳-۲-۳ اندازه‌گیری قطر ۴۳

۳-۲-۴ اندازه‌گیری ضخامت پوسته ۴۳

۳-۳ سیستم آزمایشگاهی ۴۵

۳-۳-۱ سیستم صوتی ۴۵

۳-۳-۲ مکانیزم تشخیص ۴۸

۳-۴ مراحل آزمون ۵۰

۳-۴-۱ نمونه برداری ۵۰

۳-۴-۲ استخراج ویژگی‌ها ۵۱

۳-۴-۳ تجزیه به مولفه های اصلی PCA ۵۴

۳-۴-۴ ایجاد شبکه عصبی مصنوعی ۵۵

فصل چهارم نتایج و بحث

۴-۱ شناسایی دو دسته سنگی و کاغذی (طبقه بندی) ۵۸

۴-۱-۱ استخراج ویژگی‌ها ۵۹

۴-۱-۲ شبکه عصبی مصنوعی ۶۴

۴-۲ شناسایی سه دسته سنگی و کاغذی و کندلر (طبقه بندی) ۶۶

۴-۲-۱ استخراج ویژگی ۶۶

۴-۲-۲ شبکه عصبی مصنوعی ۷۱

۴-۳ شناسایی چهار دسته سنگی و کاغذی۱ و کاغذی۲ و کندلر (طبقه بندی) ۷۴

۴-۳-۱ استخراج ویژگی‌ها ۷۴

۴-۳-۲ شبکه عصبی مصنوعی ۷۹

۴-۴ شناسایی چگالی گردو (پیش‌بینی)..... ۸۱

۴-۴-۱ استخراج ویژگی‌ها..... ۸۲

۴-۴-۲ شبکه عصبی مصنوعی..... ۸۵

فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۵-۱ نتیجه‌گیری..... ۸۷

۵-۲ پیشنهاد..... ۸۸

منابع..... ۸۹

عنوان جدول ها

	عنوان	شماره صفحه
جدول ۳-۱	مقایسه مقادیر به دست‌آمده برای حجم واقعی و تئوری	۴۳
جدول ۳-۲	برخی خصوصیات فیزیکی انواع گردوهای مورد استفاده	۴۴
جدول ۴-۱	عملکرد سیستم برای زیرمجموعه‌ای از صفات موثر.	۶۳
جدول ۴-۲	ساختار شبکهٔ بهینه برای ۲۲ نرون	۶۵
جدول ۴-۳	عملکرد شبکهٔ بهینه	۶۵
جدول ۴-۴	میزان جداسازی صحیح دو دسته گردوی مورد آزمون توسط شبکهٔ MLP با ساختار ۲-۱۸-۴۷	۶۶
جدول ۴-۵	عملکرد سیستم برای زیرمجموعه‌ای از صفت موثر	۷۰
جدول ۴-۶	ساختار شبکهٔ بهینه برای نرون‌های پیشنهادی	۷۲
جدول ۴-۷	عملکرد شبکهٔ بهینه	۷۳
جدول ۴-۸	میزان جداسازی صحیح سه دسته گردوی مورد آزمون توسط شبکهٔ MLP با ساختار۳-۱۸-۷۷	۷۳
جدول ۴-۹	عملکرد سیستم برای زیرمجموعه‌ای از صفات موثر	۷۸
جدول ۴-۱۰	ساختار شبکهٔ بهینه برای نرون‌های پیشنهادی	۸۰
جدول ۴-۱۱	عملکرد شبکهٔ بهینه	۸۰
جدول ۴-۱۲	میزان جداسازی صحیح چهار دسته گردوی مورد آزمون توسط شبکهٔ MLP با ساختار۳-۲۰-۷۷	۸۰
جدول ۴-۱۳	عملکرد سیستم برای زیرمجموعه‌ای از صفات موثر	۸۴
جدول ۴-۱۴	ساختار شبکهٔ بهینه برای نرون‌های پیشنهادی	۸۵

فهرست شکل ها

	عنوان	شماره صفحه
شکل۲-۱	تقارن تبدیل فوریهٔ گسسته	۱۲
شکل۲-۲	نمایی از یک نرون طبیعی	۱۵
شکل۲-۳	مدل نرون تک ورودی	۱۶
شکل۲-۴	ساختار یک شبکهٔ عصبی پس‌انتشار با یک لایهٔ مخفی	۲۰
شکل۲-۵	تابع سیگموئید دودویی با دامنه (۱و۰)	۲۲
شکل۲-۶	تابع سیگموئید دو قطبی، دامنهٔ (۱و۱-)	۲۳
شکل۲-۷	شماتیک ماشین درجه‌بندی مکانیکی اندازه گردو (نمای جانبی	۲۹
شکل۲-۸	شماتیک گردوشکن ساخته شده توسط برقعی و همکاران (۲۰۰۰)	۳۰
شکل۲-۹	نمای گردوشکن شریفیان وهمکاران (۲۰۰۸)	۳۲
شکل۲-۱۰	شماتیک سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در بررسی کیفی هندوانه دیزما و همکاران (۲۰۰۴)	۳۴
شکل۲-۱۱	شماتیک سیستم تشخیص و جداسازی امید و همکاران (۲۰۱۰)	۳۷
شکل ۳-۱	قطرهای اصلی گردو	۴۱
شکل ۳-۲	اندازه‌گیری حجم گردو با روش ترازوی کفه‌ای	۴۲
شکل ۳-۳	شکست گردو در جهت طولی، ضخامت غیریکنواخت پوسته	۴۴
شکل ۳-۴	شکست گردو روی خط استوا، ضخامت یکنواخت پوسته	۴۴
شکل ۳-۵	چهار دسته گردوی مورد مطالعه	۴۴
شکل ۳-۶	شماتیک سیستم مورد استفاده برای شناسایی دسته‌های گردو	۴۵
شکل ۳-۷	صفحه فولادی و نبشی برای میرا کردن موج	۴۶
شکل ۳-۸	میکروفن و محل استقرار آن در محفظه آکوستیک دو جداره	۴۷
شکل ۳-۹	قرارگیری صفحه فلزی به‌منظور پخش یکنواخت نیروی کشیدگی مهره‌ها در صفحه برخورد...	۴۷
شکل ۳-۱۰	مراحل استخراج صفات مناسب و استفاده از آنها جهت شناسایی دسته‌های گردو	۴۸
شکل ۳-۱۱	سیگنال‌های صوتی حاصل از ضربه برای یک نمونه گردو	۵۱
شکل ۳-۱۲	منحنی اندازهٔ FFT درحوزهٔ فرکانس	۵۳
شکل۳-۱۳	منحنی فاز FFT درحوزهٔ فرکانس	۵۳
شکل۳-۱۴	منحنی چگالی طیف توان در حوزهٔ فرکانس	۵۳
شکل ۳-۱۵	مدل شبکهٔ ANN در نرم‌افزار نروسلوشن	۵۵
شکل ۳-۱۶	نمایی از محیط NeuroSolutions for Excel و مراحل آموزش ANN	۵۶
شکل ۴-۱	سیگنال‌های صوتی حاصل از ضربه برای دو دسته سنگی و کاغذی	۵۹

شکل ۴-۲ منحنی اندازه FFT به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای دو دسته گردو ۶۰
شکل ۴-۳ منحنی فاز FFT به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای دو دسته گردو ۶۰
شکل ۴-۴ منحنی چگالی طیف توان به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای دو دسته گردو ۶۰
شکل ۴-۵ تاثیر متقابل میزان واریانس ویژگی‌های حذف شده و تعداد مولفه‌های اصلی باقیمانده ۶۲
شکل ۴-۶ توپولوژی شبکهٔ ANN سیستم شناسایی دو دسته گردو ۶۴
شکل ۴-۷ تعیین تعداد نرون‌های لایه میانی برای شبکه بهینه ۶۴
شکل ۴-۸ منحنی یادگیری شبکه با الگوی آموزشی (GDM) برای ۱۰۰۰ اپاک ۶۵
شکل ۴-۹ سیگنال‌های صوتی حاصل از ضربه برای سه دسته گردو ۶۷
شکل ۴-۱۰ منحنی اندازه FFT به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای دو دسته گردو ۶۸
شکل ۴-۱۱ منحنی فاز FFT به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای دو دسته گردو ۶۸
شکل ۴-۱۲ منحنی چگالی طیف توان به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای دو دسته گردو ۶۸
شکل ۴-۱۳ تاثیر متقابل میزان واریانس ویژگی‌های حذف شده و تعداد مولفه‌های اصلی باقیمانده ۶۹
شکل ۴-۱۴ توپولوژی شبکه ANN سیستم شناسایی سه دسته گردو ۷۱
شکل ۴-۱۵ تعیین تعداد نرون‌های لایه میانی برای شبکه بهینه ۷۲
شکل ۴-۱۶ منحنی یادگیری شبکه با الگوی آموزشی GDM برای ۱۰۰۰ اپاک ۷۳
شکل ۴-۱۷ سیگنال‌های صوتی حاصل از ضربه برای چهار دسته گردو ۷۴
شکل ۴-۱۸ منحنی اندازه FFT به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای چهار دسته گردو ۷۶
شکل ۴-۱۹ منحنی فاز FFT به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای چهار دسته گردو ۷۶
شکل ۴-۲۰ منحنی چگالی طیف توان به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای چهار دسته گردو ۷۶
شکل ۴-۲۱ تاثیر متقابل میزان واریانس ویژگی‌های حذف شده و تعداد مولفه‌های اصلی باقیمانده ۷۷
شکل ۴-۲۲ توپولوژی شبکه ANN سیستم شناسایی چهار دسته گردو ۷۹
شکل ۴-۲۳ تعیین تعداد نرون‌های لایه میانی برای شبکه بهینه ۷۹
شکل ۴-۲۴ منحنی یادگیری شبکه با الگوی آموزشی GDM برای ۱۰۰۰ اپاک ۸۰
شکل ۴-۲۵ سیگنال‌های صوتی حاصل از ضربه برای چگالی کم، متوسط و زیاد ۸۱
شکل ۴-۲۶ منحنی اندازه FFT به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای سه چگالی مختلف ۸۳
شکل ۴-۲۷ منحنی فاز FFT به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای سه چگالی مختلف ۸۳
شکل ۴-۲۸ منحنی چگالی طیف توان به طول ۱۰۲۴ در حوزهٔ فرکانس برای سه چگالی مختلف ۸۳
شکل ۴-۲۹ تعیین تعداد نرون‌های لایه میانی برای شبکه بهینه ۸۵
شکل ۴-۳۰ منحنی یادگیری شبکه با الگوی آموزشی GDM برای ۱۰۰۰ اپاک ۸۶
شکل ۴-۳۱ مقایسه مقدار واقعی و خروجی شبکه در آزمون ۸۶

فصل اول

مقدمه

گونه‌های مختلف گردو که در رویشگاه‌های وسیعی در دنیا و ایران به طور طبیعی روییده و کاشته می‌شوند، جزو درختان چندمنظوره بوده و از نظر اقتصادی بسیار پراهمیت محسوب می‌شوند. درختان گردو از نظر تجاری برای حصول میوه گردو و نیز کیفیت بالای الوار چوب آن کاشته می‌شوند. گردو یکی از مهم‌ترین میوه‌های آجیلی[1] می‌باشد و اصلی‌ترین مزایای مغز گردو شامل کاهش‌دهنده کلسترول، کاهنده التهاب و سوزش و بهبودبخش اعمال شریانی است. مغز گردو طعم بسیار مطبوعی دارد که در شیرینی‌سازی، تهیه بعضی از غذاهای ایرانی و استخراج روغن خوراکی از آن استفاده می‌گردد. از پوست سبز گردو برای رنگرزی، دباغی و استخراج بعضی از مواد شیمیایی در داروسازی استفاده می‌شود. برگ گردو نیز مصارف داروئی فراوان دارد (ابراهیمی و همکاران، ۲۰۰۹).

کشور ایران قسمتی از رویشگاه‌های وسیع گردو را شامل می‌شود، به طوری که در برخی از کشورها گردو را با نام "گردوی ایرانی"[2] نام می‌برند و به احتمال قوی بذر آن در زمان‌های گذشته از ایران به برخی از کشورهای دیگر برده شده است (طباطبایی و همکاران،۱۳۷۷). ایران یکی از مهم‌ترین کشورهایی است که درختان گردوی بذری و خودرو هنوز در جنگل‌های آن (شمال و غرب) موجود است. تکثیر درختان کهنسال به روش بذری در بسیاری از مناطق اکولوژی ایران، از جنگل‌های کاسپین در شمال تا منطقه کرمان، فارس و ایذه در جنوب نشان از تاریخ طولانی کشت این گونه و تنوع ژنتیکی بالای آن در کشور دارد (دسالوادور، ۱۹۸۸). گردوهایی که در نقاط مختلف گردوخیز ایران وجود دارد از گونه گردوی معمولی[3] هستند. واریته‌ها، نژادها و ارقام این گردوها از نظر گیاه‌شناسی هنوز کاملا مشخص نیست و ارقامی مانند گردوی کاغذی، گردوی سنگی، گردوی سوزنی، گردوی خوشه‌ای، گردوی بادامی، گردوی قزوین و طالقان و گردوی جنوب البرز در واقع ارقام بومی هستند که اکثرا نام محل را به روی آن‌ها گذاشته‌اند. ولی ویژگی‌های گیاه‌شناسی آن‌ها مبهم بوده و برای اهالی هریک از کشت‌گاه‌ها و مراکز گردوخیز مشخص نمی‌باشد (طباطبایی و همکاران،۱۳۷۷).

امروزه تجارت گردو در ایران در بین کشورهای تولید کننده اندک می‌باشد. گردوی ایران از نظر گسترش‌گاه، کیفیت میوه و کمیت مواد تشکیل‌دهنده مغز آن مورد بررسی قرار نگرفته است و بررسی این منبع غنی ژنتیکی، میدان کار وسیعی در برابر علم باغبانی و علم تشخیص و شناسایی گردو، طبقه‌بندی و بسته‌بندی آن می‌گشاید و ایران می‌تواند یکی از مهم‌ترین صادرکنندگان گردو باشد. براساس اطلاعات سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی در سال

[1] Nuts
[2] Persian Walnut
[3] Regia juglans L.

۲۰۰۸، ایران از نظر سطح زیر کشت گردو مقام چهارم را پس از چین، امریکا و ترکیه دارد (فائو[1]، ۲۰۰۸)، اما بازار جهانی قابل ملاحظه‌ای برای گردوی ایرانی وجود ندارد. یکی از دلایل پایین بودن ارزش صادراتی گردوهای ایرانی وجود غیریکنواختی زیاد در محصول عرضه‌شده می‌باشد که خود ناشی از کاشت نهال‌های بذری، استفاده از ارقام مختلف در احداث باغات قدیمی گردو و عدم احداث باغات جدید با استفاده از ارقام اصلاح‌شده و مقاوم می‌باشد. زیرا چنانچه ارقام گردو را به‌صورت بذری تکثیر کنند، از یکدیگر متفاوت خواهند بود و ممکن است دورگ و ناخالص شوند. تکثیر گردو با این روش در گذشته به علت دشواری پیوند یا در کل ازدیاد غیرجنسی، سخت ریشه‌زایی، گیرایی پایین پیوند و بزرگ بودن درختان گردو در سنین بالا صورت گرفته است که مدیریت مطلوب باغ را با مشکل جدی روبرو نموده و ضمن ایجاد تنوع ژنتیکی عظیم و ایجاد محدودیت‌های جدی در امر صادرات، خلا بزرگی را برای توسعه برنامه‌های اصلاحی فراهم کرده است (طباطبایی و همکاران،۱۳۷۷). علم باغبانی نیز اقدامی در جهت احداث باغات با ژنوتیپ‌های برتر و ژن‌های اصلاح‌شده صورت نداده است، اما امروزه تولید پایه‌های رویشی و یا تولید ارقام خود–ریشه بر مبنای گردوی ایرانی مورد توجه اصلاح‌گران گردو قرار دارد که باید تعدادی از واریته‌ها و ارقام بسیار پرمحصول و مرغوب گردو و نیز گونه‌های زودرس و مقاوم را با ویژگی‌های مشخص، انتخاب و تثبیت نموده و معرفی کنند. با توجه به گسترش زیاد سطح زیرکشت این گونه در کشور و طول عمر زیاد باغات گردو، دستیابی به راه‌حل‌هایی برای درجه‌بندی محصول و رفع غیریکنواختی آن، باعث افزایش قابل توجهی در ارزش اقتصادی و درآمد حاصل از صادرات این محصول خواهد شد.

در باغات گردوی ایران، گردوها پس از چیده شدن، بدون در نظر گرفتن نوع و رقم مخلوط شده و به بازار عرضه می‌گردند. به منظور رقابت در بازارهای جهانی باید گردوهایی جداسازی شده، طبقه‌بندی شده و با بسته‌بندی مناسب عرضه گردند، همچنین برای بهبود کیفیت دستگاه‌های جداکننده پوست سبز گردو، گردوشکن‌ها و جداسازهای مغز از پوست سخت نیز لازم است گردوهای تغذیه شده از لحاظ جنس و رقم، شکل ظاهری، درشتی، ضخامت پوست، حجم مغز و نسبت آن به پوست و سایر ویژگی‌ها دارای یکنواختی نسبی باشند. بنابراین یکی از مراحل مهم در درجه‌بندی گردوها جداسازی ارقام و ژنوتیپ‌های گردو خواهد بود، که دربرگیرندهٔ اکثر این ویژگی‌ها است.

به‌علت نزدیکی خواص فیزیکی و مورفولوژیکی گردو، جداسازی با بازده بالا بوسیله سیستم‌های مکانیکی نمی‌تواند صورت گیرد. بازرسی و جداسازی دستی نیز دشوار بوده و نتایج مطلوبی در بر نخواهد داشت. روش‌های سنتی آماری برای مدل‌کردن سیستم‌ها اغلب غیر قابل مدیریت هستند و یا اگر سیستم اصلی بصورت غیرخطی باشد، یا متغیرهای اندازه‌گیری شده متعدد بصورت همزمان موردنظر باشد، قابل اجرا نمی‌باشد. سیستمی که بدون اشکالات موجود در سیستم‌های سنتی باشد کاربرد سیستم طبقه‌بندی قابل آموزش اتوماتیک همچون شبکه‌های عصبی است. با توجه به اهمیت زیادی که جداسازی گونه‌های مختلف گردو از لحاظ اقتصادی، کیفی، بازارپسندی و صادرات محصول دارند و نیز دشواری جداسازی دستی و دقت پایین آن، در این تحقیق نتایج حاصل از کاربرد تکنیک غیرمخرب آکوستیک و شبکه‌عصبی برای جداسازی دسته‌های گردو ارائه شده است.

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations

فصل دوم

بررسی منابع

۲-۱ گردو

طبق بررسی‌های دیرین‌شناسی گیاهی، گونه‌های مختلف گردو از زمان‌های بسیار قدیم به‌ویژه از دوران سوم زمین‌شناسی در روی کرهٔ زمین وجود داشته‌است. از جنس گردو[1] تا کنون حدود ۲۰ گونه، واریته، نژاد و رقم نام برده شده است که در سطح جهانی در خاورمیانه، یونان، ترکیه، کشورهای اروپای شرقی و امریکا؛ و در داخل ایران در آذربایجان، همدان، کردستان، مناطق شمال، کرمان و جاهایی‌که امکان آبیاری در آن‌ها وجود دارد می‌روید، که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

گردوی کاغذی؛ درختان این گردو که احتمالا واریته و ارقام آن‌هم یکنواخت نیست، در اکثر نقاط ایران می‌روید. هرچند این رقم از نظر ارثی خالص و دارای ویژگی‌های ثابت نیست، ولی می‌توان گفت که از نظر بازارپسندی دارای ویژگی‌های ممتازی است. شکل میوه آن کم‌وبیش گرد، یا کمی کشیده و نوک‌تیز، یا پخ؛ و دارای پوست نازک خارجی به رنگ شکلاتی کم‌رنگ، دارای مغز سفیدوپر و سالم و بازارپسند است. درخت آن نیز در شرایط مساعد به‌خوبی و با گسترش کافی می‌روید و میزان باردهی آن متوسط است. این رقم بهترین و پرارزش‌ترین گردوی آجیلی را تشکیل می‌دهد.

گردوی سنگی؛ این رقم نیز در اکثر نقاط گردوخیز ایران وجود دارد. پوست چوبی دانه آن سفت، سخت، ضخیم، چین‌دار، محکم و خاکستری مایل به قهوه‌ای یا زرد رنگ با شیارهای نسبتا عمیق در روی پوست چوبی می‌باشد و به راحتی از ارقام دیگر گردو بازشناخته می‌شود. شکل میوه آن در رویش‌گاه‌های مختلف متفاوت و کم‌وبیش بیضی و نوک‌تیز و قابلیت انبارداری آن زیاد است. این رقم نیز از نظر ارثی ناخالص و دورگه است که میوه آن انواع و اقسام اشکال، درشتی و ترکیب را نشان می‌دهد.

گردوی سوزنی؛ این رقم از ارقام خودرو و دانه‌زاد گردو در ایران می‌باشد که بسیار آمیخته، دورگ و اصلاح‌نشده است. دانه آن کوچک با پوست سخت و ضخیم و حجم مغز آن کم و خارج کردن مغز آن بسیار مشکل است و اغلب بوسیله سوراخ کردن با میخ، درفش، جوالدوز و سوزن مغز آن‌را بیرون می‌آورند. به همین دلیل "گردوی سوزنی" نام‌گرفته است. مزه دانه آن گس و نامطبوع و ظاهرا میزان درصد روغن آن کم است.

[1] Juglans

گردوی خوشه‌ای؛ در نقاط مختلفی از ایران، ارقام جالبی از این گردو کاشته شده‌است که میوه‌های آن به‌صورت خوشه‌ای ظاهر می‌شود. میوه‌ها در این رقم علاوه بر انتهای شاخه‌ها، به‌صورت جانبی نیز ظاهر می‌گردد. تعداد میوه در هر خوشه ۵ تا ۲٤ عدد می‌باشد. میوه‌های آن نسبتا کوچک ولی به‌صورت مجتمع در روی یک خوشه، با شکل گرد مایل به بیضی و مغز پروسالم هستند و زود به‌بار نشستن آن بسیار جالب است (طباطبایی و همکاران،۱۳۷۷).

گردوی کندلر[1]؛ در اکثر کشورهای بیگانه که در نیم‌کره شمالی قرار دارند، کشت‌وکار گردو متداول است، چنانچه باغبانان این کشورها توانسته‌اند تعدادی از واریته‌ها و ارقام بسیار پرمحصول و مرغوب گردو را با ویژگی‌های معین یافته و تثبیت نموده و معرفی نمایند. یکی از انواع این گردوها که در کشور ما نیز موجود است، دارای میوه گرد، مغز نسبتا پر، پوست استخوانی با ضخامت نسبتا زیاد، دارای شکل تخم‌مرغی و نوک تیز و مغز آن مغذی، شیرین و دارای چربی زیاد است. این گردو چربی خاصی در پوست سخت دارد و از یک رقم اصلاح‌شده و مشخص بدست می‌آید.

بذر گردوهای تکثیرشده در نهالستان‌های سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور از منابع داخلی و از بذور آمیخته و درختان دورگ طبیعی در کشور بدست آمده است که این گردوها هنوز از نظر ویژگی‌های ژنتیکی، ارثی، تولیدی و نیز کیفیت و کمیت مواد ترکیبی میوه آن‌ها مورد بررسی قرار نگرفته‌است. لذا انتخاب یک واریته مناسب برای کاشت در هر منطقه از کشور، کار آسانی نیست. در کشورهای پیشرفته، اقدام به انتخاب و دورگ‌گیری واریته‌های مرغوب گردیده است. ولی از آنجایی‌که گردو یک درخت یک‌پایه بوده و قادر است از گرده درختان دیگر گردو نیز بارور شود، همیشه در طبیعت دورگ‌های طبیعی گردو فراوان هستند. درحال‌حاضر در گوشه کنار و نقاط مختلف کشور ما که یکی از رویش‌گاه‌های بسیار قدیمی گردو در جهان به‌شمار می‌رود، انواع و اقسام واریته‌های جالب با میوه‌های درشت و پوست کاغذی و بازارپسند و پرمغز وجود دارد که بصورت مخلوط با سایر گونه‌ها وارد بازار می‌شود. بنابراین، طراحی وسیله‌ای که بتواند میوه این انواع را از یکدیگر تشخیص داده و جدا کند، بسیار مفید و ارزنده خواهد بود. یک‌دست شدن گردو باعث اطمینان در تعیین قیمت گردوی بازار نیز می‌گردد. درجه‌بندی اولیه گردو، کمک شایانی به طبقه‌بندی‌های جزئی‌تر و بسته‌بندی دقیق‌تر و مشخص‌تر آن می‌نماید و ایران می‌تواند یکی از مهم‌ترین صادرکنندگان گردو باشد.

نسبت وزن مغز به وزن پوسته عامل تعیین‌کننده‌ای برای کیفیت گردو محسوب می‌شود که می‌توان آن را به چگالی (جرم ویژه) گردو نسبت داد. کیفیت مغز گردو در تعیین قیمت و مورد مصرف موثر می‌باشد. ضمن اینکه گردوهایی که دارای مغز چروکیده یا سیاه هستند، ممکن است دارای نوعی قارچ باشند که عامل بیماری است. تشخیص کیفیت مغز گردو و تعیین نسبت وزن مغز به پوسته، که بیانگر مقدار مغز موجود است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در حال حاضر، تنها راه تعیین کیفیت مغز و قیمت‌گذاری گردو، شکستن آن است. این عمل به روش دستی صورت می‌گیرد و کاری طاقت‌فرسا و طولانی است که هزینه کارگری زیادی را به کشاورزان تحمیل می‌نماید. اگر به روشی غیرمخرب، بتوان کیفیت مغز گردو را از لحاظ توخالی و پوک بودن، داشتن مغز سیاه و چروکیده، قهوه‌ای و کمی چروکیده و یا توپر و درخشنده تعیین کرد، باعث افزایش بازده دستگاه‌های گردوشکن و اطمینان در تعیین قیمت گردو می‌گردد.

[1] Chandler

۲-۲ صوت

امواج صوتی از نوع موج‌های مکانیکی هستند که در اثر ارتعاش اجسام کشسان تولید می‌شوند و در گازها، مایعات و جامدات منتشر می‌شوند. هرگاه امواج کشسان با فرکانس‌هایی بین ١٦ تا ٢٠٠٠٠ هرتز در هوا مرتعش شوند، توسط گوش انسان قابل تشخیص هستند. امواج صوتی در برخورد با پرده گوش، آن‌را مرتعش می‌کنند و احساس شنیدن به‌جود می‌آید. گوش فقط می‌تواند صداهایی را بشنود که شدت آن‌ها در محدوده معینی قرار دارد. در خارج از این حدود، دیگر صوت قابل شنیدن نیست. اگر صدایی خیلی ضعیف باشد، شنیده نمی‌شود و اگر خیلی قوی باشد، خارج از حد شنوایی بوده و باعث ناراحتی و حتی درد هم می‌شود. امواج کشسان با فرکانس‌های بالاتر از ٢٠٠٠٠ هرتز را امواج فراصوت[1] و امواج کشسان با فرکانس‌های پایین‌تر از ٢٠ هرتز را امواج فروصوتی[2] می‌نامند (اسماعیل بیگی و برکشلی، ١٣٨٢).

همه انواع امواج صوتی حامل انرژی مکانیکی به‌نام انرژی صوتی هستند که از انرژی مکانیکی منبع ارتعاش تولید شده‌اند. برای انتقال انرژی مکانیکی از منبع ارتعاش به گوش انسان یا هر گیرنده دیگر وجود یک محیط الاستیک ضروری می‌باشد. سرعت انتشار امواج صوتی به خاصیت الاستیک محیط انتشار بستگی دارد و در گازها نیز خاصیت الاستیک به خواص ترمودینامیکی وابسته است. به‌طور کلی امواج صوتی در مایعات و جامدات سریعتر از گازها منتشر می‌شوند. محیطی که صوت در آن منتشر می‌شود کم و بیش انرژی صوتی را جذب می‌کند و آن‌را به گرما تبدیل می‌کند. محیط‌هایی که جاذب خوبی هستند انرژی صوتی را در خود جذب کرده و آن‌را خفه می‌کنند. توانایی جذب یک محیط برای امواج صوتی انتخابی است، یعنی میزان انرژی جذب شده در واحد زمان و در ضخامت معین به فرکانس صوت بستگی دارد و هرچه فرکانس صوت بیشتر باشد، بیشتر جذب می‌شود.

بلندای صوتی به دو عامل شدت صوت و حساسیت گوش ارتباط دارد. شدت صوت[3] برابر است با مقدار انرژی که توسط امواج صوتی در واحد زمان از واحد سطح عمود بر راستای انتشار صوت عبور می‌کند. واحد شدت صوتی در سیستم استاندارد متریک[4]، وات بر متر مربع (W/m^2) می‌باشد. شدت صوت به انرژی صوتی که توسط امواج صوتی منتشر می‌شود بستگی دارد، و در نتیجه با مجذور دامنه و مجذور فرکانس متناسب است.

گوش انسان در حالت طبیعی به فرکانس‌های بین ٢٠٠٠ تا ٤٠٠٠ حساس‌تر است، یعنی شدت لازم برای شنیدن فرکانس‌های دو حد شنوایی ٢٠ هرتز و ٢٠ کیلوهرتز به‌مراتب بیشتر از شدتی است که برای شنیدن فرکانس‌های از ٢٠٠٠ تا ٤٠٠٠ هرتز لازم است.

۲-۲-۱ تراز شدت صوت

انسان می‌تواند اصواتی را که شدت آن‌ها در گستره 10^{-12} تا ١ وات بر مترمربع است، بدون احساس درد و ایجاد خطر برای گوش بشنود. شدت صوت 10^{-12} وات بر مترمربع را "آستانه شنوایی" وشدت ١ وات بر مترمربع را "آستانه

[1] Ultrasound
[2] Infrasound
[3] Sound intensity
[4] SI

احساس" یا آستانه دردناکی می‌گویند. برای تعیین شدت یک صوت، معمولا شدت آن‌را نسبت به شدت یک صوت معلوم می‌سنجند. برای این‌که نسبت این دو شدت عدد بزرگی نشود معمولا به‌جای خود نسبت، لگاریتم آن‌را حساب می‌کنند. تراز شدت یک صوت، لگاریتم نسبت شدت آن صوت به شدت صوت سطح مبنا است. تراز شدت را با β نشان می‌دهند و واحد آن B (بل) یا dB (دسی‌بل) است. شدت نسبی احساس صوت برحسب دسی‌بل از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$\beta = ۱۰ \log(I/I_o) \qquad (۱-۲)$$

در این رابطه I_o شدت صوت سطح مبنا یا آستانه شنوایی برای فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و گوش سالم است. مقدار شدت صوت سطح مبنا برابر $۱۰^{-۱۲}$ وات بر مترمربع بوده و تراز شدت صوت سطح مبنا برابر صفر است. تراز شدت آستانه دردناکی گوش انسان برابر ۱۲۰ دسی‌بل است (گلستانیان، ۱۳۶۹).

۲-۲-۲ مزایای آزمون‌های صوتی

سادگی نسبی، ارزانی و سرعت بالای ارتعاش‌سنجی باعث گردیده که آزمون‌های صوتی به‌عنوان یک روش قابل اعتماد در اکثر علوم مهندسی مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به اینکه بازرسی، طبقه‌بندی و جداسازی محصولات کشاورزی غالبا به‌صورت بلادرنگ[1] انجام می‌گیرد، زمان لازم برای دریافت و پردازش داده‌ها، طبقه‌بندی محصولات و راه‌اندازی مکانیزم جداساز بسیار محدود است. آزمون‌های آکوستیک با سرعت بالایی که دارند، در علوم کشاورزی جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. هدف دیگری که در مورد درجه‌بندی محصولات کشاورزی مهم است، غیر مخرب بودن فرایند تشخیص است، که آزمون‌های صوتی این هدف را به خوبی پوشش می‌دهند. همچنین روش‌های آزمون آکوستیکی اصول‌کاری آسانی دارند و سازگاری سریعی با تغییرات یک نوع محصول و محصول جدید دیگر ایجاد می‌کنند. بنابراین گرایش به سمت استفاده از روش‌های صوتی بیش از گذشته مورد توجه محققین و صنعتگران رشته‌های کشاورزی می‌باشد.

در علوم کشاورزی آزمون‌های آکوستیکی برای درجه‌بندی محصولات، تعیین رسیدگی و سفتی میوه‌ها، تعیین برخی خصوصیات فیزیکی محصولات و گاها تعیین برخی عیوب ممکن در محصولات باغی و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شرط اولیه استفاده از این روش آن‌است که باید عیب و یا تفاوت‌ها با استفاده از رفتار ارتعاشی محصول قابل شناسایی باشد. مواد مختلف در هنگام برخورد با یکدیگر امواجی تولید می‌کنند که فرکانس، دامنه و شدت صوتی آن به عوامل مهمی از جمله سرعت برخورد، جنس، حجم و جرم مواد بستگی دارد. بنابراین با اندازه‌گیری خصوصیات امواج صوتی و فراصوتی می‌توان به برخی از خصوصیات مواد و یا حداقل به تفاوت‌های آن‌ها پی‌برد. اکثر سیستم‌های آکوستیکی بدین‌سان عمل می‌کنند که با استفاده از یک پیستون ضربه‌ای آرام به محصول وارد می‌کنند، صدای حاصله ضبط شده و با پردازش سیگنال حاصل، ویژگی‌هایی از سیگنال که مرتبط با خصوصیات

[1] Real-time

موردنظر محصول باشند استخراج می‌شود. با بررسی و مطالعه روی ویژگی‌های بدست آمده می‌توان به بسیاری از خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی و غذایی از جمله سفتی، ترک، رسیدگی، آسیب‌دیدگی و .... پی‌برد. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که پردازش در حوزهٔ فرکانس، اطلاعات و خصوصیات بیشتری از محصولات کشاورزی را در اختیار محققین قرار می‌دهد.

۲-۳ سیگنال و پردازش سیگنال

سیگنال‌ها توابعی از یک یا چند متغیر مستقل هستند که اطلاعاتی در مورد رفتار یا طبیعت یک پدیده را در بردارند. تغییرات زمانی ولتاژهای یک منبع یا خازن، تغییرات زمانی نیروی اعمالی به یک نیروسنج و صدای ضبط شده توسط میکروفن نمونه‌هایی از سیگنال می‌باشند. در بسیاری از وسایل صوتی، میکروفن تغییرات فشار آکوستیکی را حس کرده و آن‌را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. بیان ریاضی سیگنال، تابعی از یک یا چند متغیر مستقل است. مثلا برای نمایش ریاضی سیگنال صدا تابعی به‌کار می‌رود که فشار آکوستیکی را برحسب زمان نشان دهد و برای بیان ریاضی تصویر، تابعی به‌کار می‌رود که روشنایی را برحسب دو متغیر فضایی نشان می‌دهد.

سیگنال‌های تک متغیره به دو گروه سیگنال‌های پیوسته در زمان و سیگنال‌های گسسته در زمان تقسیم می‌شوند. در سیگنال‌های پیوسته در زمان، متغیر مستقل پیوسته است و برای تمامی مقادیر پیوستهٔ متغیر مستقل تعریف می شود. سیگنال‌های گسسته در زمان فقط برای زمان‌های خاصی که به‌صورت گسسته از هم قرار دارند تعریف می‌شوند. سیگنال‌های گسسته در زمان $(x[n])$ می‌توانند نمایشگر پدیده‌ای باشند که متغیر مستقل آن ذاتا گسسته است که سیگنال‌های آماری مثال‌هایی از این نوع هستند. دستهٔ مهم از سیگنال‌های گسسته در زمان، سیگنال‌هایی هستند که از نمونه‌برداری سیگنال‌های پیوسته در زمان حاصل شده‌اند. در این حالت سیگنال $x[n]$، نمونه‌های متوالی پدیده‌ای است که متغیر مستقل آن پیوسته است. در سیگنال زمان گسسته، $x[n]$ تنها برای مقادیر صحیح n تعریف می‌شود، با توجه به این‌که سیگنال‌های صوتی به‌کاررفته در این تحقیق از نوع سیگنال گسسته می‌باشند، فقط اصول و تعارف این نوع سیگنال مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

سیگنال زمان گسستهٔ متناوب: سیگنال زمان گسستهٔ $x[n]$ را متناوب با دوره تناوب N می‌نامند، اگر به‌ازای تمام مقادیر n داشته باشیم:

$$x[n]= x[n+N] \qquad (۲-۲)$$

انرژی سیگنال: انرژی کل سیگنال گسسته در زمان $x[n]$ در فاصله زمانی $n_1 \le n \le n_2$ به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$E = \sum_{n_1}^{n_2} x^2\,[n] \qquad (۳-۲)$$

سیگنال زوج و فرد: سیگنال $x[n]$ را زوج می‌گویند اگر انعکاس آن نسبت به مبدا یکسان باشد. سیگنال $x[n]$ را فرد می‌گویند، اگر انعکاس آن نسبت به مبدا وارون باشد.

$$x[n]= x[-n] \qquad \text{(۲-۴) سیگنال زوج}$$

$$x[n]=- x[-n] \qquad \text{(۲-۵) سیگنال فرد}$$

سیگنال‌های نمایی مختلط و سینوسی گسسته در زمان: همان‌طوری که در قسمت بعدی اشاره می‌شود، دستهٔ بزرگی از سیگنال‌های گسسته در زمان توسط رابطهٔ خطی بین سیگنال‌های نمایی و یا سیگنال‌های سینوسی بیان می‌شوند.

$$x[n] = e^{j\omega_0 n} \qquad \text{(۲-۶) سیگنال نمایی}$$

$$x[n] = Acos(w_0 n + \psi) \qquad \text{(۲-۷) سیگنال سینوسی}$$

توابع فوق دارای خواص منحصر به‌فرد زیر هستند که آن‌ها را از سایر توابع متمایز می‌کند:

۱- سیگنال‌های مفید متعددی براساس این سیگنال‌ها ساخته می‌شوند.

۲- پاسخ سیستم‌های LTI[1] به این سیگنال‌ها ساختار بسیار ساده دارند.

۳- این سیگنال‌ها نسبت به فرکانس، دارای دوره تناوب 2π هستند.

مثلا برای تابع نمایی رابطه (۲-۶) داریم:

$$e^{j(\omega_0+2\pi)n} = e^{j2\pi n}e^{j\omega_0 n} = e^{j\omega_0 n} \qquad \text{(۲-۸)}$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که با افزایش ω_0 در فاصله صفر تا π آهنگ نوسان زیاد می‌شود، ولی در فاصله π تا 2π با وجود افزایش ω_0 آهنگ نوسان کاهش می‌یابد.

ضربهٔ واحد: ضربهٔ واحد یا نمونهٔ واحد یکی از ساده‌ترین و در عین حال پرکاربردترین سیگنال‌های گسسته می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\delta[n] = \begin{cases} 0 & n \neq 0 \\ 1 & n = 0 \end{cases} \qquad \text{(۲-۹)}$$

[1] Linear Time Invariant

سیگنال ضربهٔ واحد از آن‌جا اهمیت پیدا می‌کند که بسیاری از سیگنال‌ها را با ترکیب خطی سیگنال ضربه واحد جابه‌جا شده در واحد زمان یعنی $\delta[n-k]$ توصیف می‌کنند یعنی:

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k].\delta[n-k] \qquad (۱۰-۲)$$

پلهٔ واحد: پلهٔ واحد سیگنال گسسته‌ای است که با بیان ریاضی زیر تعریف می‌شود:

$$u[n] = \begin{cases} 0 & n < 0 \\ 1 & n \geq 0 \end{cases} \qquad (۱۱-۲)$$

بین ضربه و پله رابطهٔ نزدیکی وجود دارد:

$$\delta[n] = u[n] - u[n-1] \qquad (۱۲-۲)$$

$$u[n] = \sum_{m=-\infty}^{n} \delta[m] \qquad (۱۳-۲)$$

در تحلیل بسیاری از مسائل سیگنال و کنترل، اگر پاسخ سیستم به ضربهٔ واحد و یا پلهٔ واحد مشخص باشد، عملکرد سیستم و پاسخ آن به سیگنال‌های دیگر مشخص می‌شود (دیانی، ۱۳۸٦).

۲-۳-۱ سری فوریه

یک روش تحلیل مهندسی متداول، تبدیل مسائل پیچیده به مسائل ساده می‌باشد. سری فوریه یکی از این روش‌هاست که یک سیگنال پیچیده متناوب را با ترکیب خطی توابع ویژه (توابع نمایی مختلط) تقریب می‌زند. توابع نمایی مختلط دارای خواصی هستند که اولا با آن‌ها می‌توان تعداد بسیار زیادی از سیگنال‌های نامعلوم را تقریب زد و ثانیا پاسخ سیستم‌های کنترل به این توابع بسیار ساده و آسان است. با توجه به این‌که در تحقیق حاضر فقط از سیگنال‌های گسسته در زمان استفاده گردید، در تعریف و فرمول‌بندی‌های تبدیل فوریه، فقط این گروه از سیگنال‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

هرگاه سیگنال گسسته در زمان متناوب $x[n]$ دارای دوره تناوب N باشد، مقدار $\omega_0 = 2\pi/T$ را فرکانس پایه می‌نامند و نمایش تابع $x[n]$ به‌صورت زیر را نمایش سری فوریه می‌نامند.

$$x[n] = \sum a_k \, e^{jk\omega_0 n} \qquad (۱٤-۲)$$

در این رابطه جمله $k=0$ را جمله ثابت و $k=+n$ و $k=-n$ را هماهنگ n ام می‌نامند. ضرایب سری فوریه از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$a_k = \frac{1}{N}\sum x[n].e^{-jk\omega_0 n} \qquad (۱۵-۲)$$

ضرایب سری فوریهٔ زمان گسسته a_k را ضرایب طیفی $x[n]$ نیز می‌نامند. با توجه به این‌که سیگنال $e^{j\omega_0 n}$ با دورهٔ N متناوب است، تنها N ضریب فوریهٔ مستقل وجود دارد یعنی $a_k = a_{k+N}$.

در مسائل مهندسی کنترل، به‌جای این‌که پاسخ یک تابع را به‌صورت مستقیم در سیستم مورد بررسی قرار دهند، پاسخ هریک از مولفه‌های سیگنال را بررسی کرده و پاسخ کل را به‌صورت ترکیب خطی پاسخ‌های توابع ویژه در نظر می‌گیرند. سری فوریه علی‌رغم قابلیت‌های زیاد خود، محدود به توابع متناوب بوده و این در حالی‌است که اکثر سیگنال‌های ایجاد شده در حسگرها و سیستم‌های اندازه‌گیری، توابع غیر متناوب هستند. برای حل این مشکل، سیگنال نامتناوب را سیگنالی متناوب با دورهٔ تناوب بی‌نهایت فرض می‌کنند. با بزرگ‌تر شدن دورهٔ تناوب مولفه‌های فرکانسی حالت پیوسته به خود می‌گیرند و جمع سری فوریه به انتگرال فوریه (تبدیل فوریه) تبدیل می‌شود.

۲-۳-۲ تبدیل فوریه

تبدیل فوریه روشی است که مدل‌های ریاضی سیگنال‌ها و سیستم‌ها را در حوزهٔ فرکانسی نمایش می‌دهد. تبدیلات فوریه در تحلیل سیستم‌های خطی، مخابرات (میدان و پردازش سیگنال‌های دیجیتال صوتی و تصویری)، اپتیک، مدل‌سازی فرایندهای تصادفی، تئوری احتمالات و فیزیک کوانتوم به‌کار گرفته می‌شود. این تبدیل در اکثر زمینه‌های علمی به‌عنوان ابزاری ریاضی یا فیزیکی و برای تبدیل مساله به شکلی که به سادگی قابل حل باشد، به‌کار می‌رود. تبدیل فوریه در واقع ارتقاء یافته و حالت کاربردی سری فوریه می‌باشد. تبدیلات فوریه و انتقال سیگنال از حوزهٔ زمان به حوزهٔ فرکانس از این نظر اهمیت دارد که بسیاری از محاسبات مربوط به معادلات دیفرانسیل، معادلات تفاضلی وقتی به حوزهٔ فرکانس منتقل شوند، به عملیات جبری ساده تبدیل می‌گردند.