دانشگاه صنعت آب و برق(عباسپور)

دانشکده‌ی انرژی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

عنوان:

تعیین خواصّ مکانیکی صفحات کامپوزیتی با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به کمک آنالیز مودال

تحقیق و تنظیم:

احسان فرجام‌پور

اساتید راهنما:

دکتر پدرام صفرپور

دکتر مهدی تاجداری

به نام خدا

چکیده

تلاش این تحقیق بر این است که یک روش غیر مستقیم و در عین حال غیر مخرّب برای تعیین ضرایب الاستیسیته‌ی مواد کامپوزیتی ارائه‌دهد. روش محاسبه برپایه‌ی بهبودسازی ضرایب، طی یک روند بهینه‌سازی می‌باشد. تابع هدفی که برای این منظور انتخاب شده‌است، اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی تحلیلی و فرکانس‌های تجربی متناظر می‌باشد، که در آن فرکانس‌های تحلیلی به کمک روش ریلی- ریتز با استفاده‌از توابع شکل تیرها و مقادیر تجربی از طریق تست‌های مودال به‌دست می‌آیند.

در روش پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک (GA) برای حلّ مسأله‌ی بهینه‌سازی استفاده‌شده‌است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی صفحات کامپوزیتی مستطیل شکل ارتوتروپیک ویژه با الیاف یک جهته و با شرایط مرزی کاملاً آزاد(FF-FF) انتخاب شده‌است. نتایج به‌دست‌آمده به‌وسیله‌ی روش ارائه‌شده با نتایج تحقیق‌های مشابه برای دو نوع خاص گرافیت-اپوکسی و کربن-اپوکسی مقایسه شده‌است. لازم به ذکر است که از دو کد متفاوت برای اجرای روش ریلی-ریتز و متّصل کردن این مدل با الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار Matlab استفاده‌شده‌است.

به منظور بررسی حساسیت ضرایب الاستیسیته نسبت به تغییر فرکانس‌های طبیعی به تحلیل حساسیت این دو سری متغیّر نسبت به هم پرداخته‌شده‌است و نهایتاً با مشخّص کردن منابع خطا، پیشنهاداتی برای بهبود روش ارائه‌شده‌است.

فهرست مندرجات

فصل اوّل: مقدّمه..... ۱

۱-۱- سرآغاز..... ۲

۱-۲- تاریخچه..... ۳

فصل دوم: معادلات حاکم و روش تحقیق..... ۷

۲-۱- معادلات یک صفحه‌ی لایه‌ای ناهمسانگرد..... ۸

۲-۱-۱- روابط بین جابجایی و کرنش..... ۸

۲-۱-۲- معادلات حرکت..... ۹

۲-۱-۳- معادلات اساسی (**Constitutive Equations**)..... ۱۳

۲-۱-۴- معادلات حرکت با استفاده از عبارات تغییر مکان..... ۱۴

۲-۲- فرمولاسیون انرژی برای معادلات حاکم..... ۱۷

۲-۲-۱- انرژی کرنش یک صفحه‌ی لمینت..... ۱۷

۲-۲-۲- انرژی جنبشی یک صفحه‌ی لایه‌ای..... ۱۹

۲-۳- روش ریلی- ریتز..... ۲۰

۲-۴- ارتعاش آزاد صفحات مستطیل شکل با تکیه‌گاه‌های ساده..... ۲۲

۲-۵- ارتعاش آزاد صفحات مستطیل شکل با لبه‌هایی با تکیه‌گاه ساده یا کلمپ..... ۲۴

۲-۶- ارتعاش آزاد صفحات مستطیل شکل ارتوتروپیک ویژه با تکیه‌گاه‌های آزاد..... ۲۹

۲-۶-۱- توابع شکل مشخّصه‌ی تیر با شرایط تکیه‌گاهی هر دو انتها آزاد..... ۲۹

۲-۶-۱-۱- فرکانس ها و مودهای طبیعی ارتعاش خمشی میله..... ۲۹

۲-۶-۱-۲- حلّ معادله‌ی دیفرانسیل برای شرایط هر دو انتها آزاد..... ۳۰

۲-۶-۲- محاسبه‌ی فرکانس‌های طبیعی صفحه مستطیلی نازک لایه‌ای ارتوتروپ ویژه برای حالت کاملاً آزاد.....۳۵

۲-۷- بیان روند کار Gibson و Deobald[۱] در تعیین ضرایب الاستیسیته‌ی صفحات ارتوتروپیک با استفاده از آنالیز مودال و روش ریلی-ریتز.....۳۹

۲-۷-۱- مقدّمه.....۳۹

۲-۷-۲- مدل ارتعاشی صفحه.....۴۰

فصل سوم: الگوریتم ژنتیک.....۴۵

۳-۱- مقدّمه.....۴۶

۳-۱-۱- تاریخچه‌ی الگوریتم ژنتیک.....۴۶

۳-۱-۲- پیش‌زمینه‌ی بیولوژیکی ژن‌ها و کروموزوم‌ها.....۴۸

۳-۲- ساختار الگوریتم ژنتیک.....۴۸

۳-۲-۱- ساختار کروموزومی الگوریتم.....۴۸

۳-۲-۲- اپراتورهای الگوریتم ژنتیک.....۴۹

۳-۲-۲-۱- اپراتور های مرحله اوّل(Seeding) ۵۰

۳-۲-۲-۲- اپراتور انتخاب یا تولید مثل(Selection or Reproduction) ۵۰

۳-۲-۲-۳- اپراتور همگذری، جفت‌گیری یا ادغام(Crossover) ۵۳

۳-۲-۲-۴- اپراتور جهش یا موتاسیون (Mutation) ۵۶

۳-۲-۲-۵- نخبه گرایی (Elitism) ۵۷

۳-۲-۳- شرط توقف الگوریتم.....۵۷

۳-۲-۴- معیار همگرایی.....۵۷

۳-۲-۵- روش پنالتی.....۵۸

۳-۲-۶- بهینه سازی چندمنظوره(Multi-objective optimization) ۵۸

۳-۳- جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار Matlab..... ۵۹

۳-۴- ساختار بهینه‌سازی این تحقیق..... ۶۴

۳-۴-۱- ساختار مسأله‌ی بهینه‌سازی..... ۶۴

۳-۴-۲- ساختار روش بهینه‌سازی(الگوریتم ژنتیک) ۶۵

فصل چهارم: نتایج و بحث..... ۶۶

۴-۱- مقدّمه..... ۶۷

۴-۲- مقایسه‌ی نتایج مقاله‌ی Gibson و Deobald [۱] با نتایج این تحقیق..... ۶۷

۴-۲-۱- محاسبه‌ی فرکانس‌های طبیعی صفحه‌ی گرافیت- اپوکسی با شرایط کاملاً آزاد..... ۶۷

۴-۲-۲- محاسبه‌ی ضرایب الاستیسیته‌ی صفحه‌ی گرافیت-اپوکسی با شرایط کاملاً آزاد به روش الگوریتم ژنتیک..... ۷۱

۴-۳- محاسبه‌ی ضرایب الاستیسیته‌ی صفحه‌ی کربن-اپوکسی با شرایط کاملاً آزاد به روش الگوریتم ژنتیک..... ۷۶

۴-۴- بررسی حساسیت مسأله..... ۸۰

۴-۵- منابع خطا..... ۸۵

۴-۶- نتیجه‌گیری..... ۸۶

۴-۷- پیشنهادات..... ۸۶

منابع و مآخذ..... ۸۷

پیوست۱: فهرست علائم..... ۸۹

پیوست۲: کدهای نرم افزارMatlab ۹۱

پیوست۳: مثال هایی از بهینه سازی به کمک جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار Matlab..... ۹۶

فهرست جداول

۲-۱ ضرایب α_1، α_2 و α_3 مورد نیاز برای محاسبه‌ی فرکانس‌های طبیعی ترکیب‌های تکیه‌گاه ساده و کلمپ ۲۸

۲-۲ مقادیر ویژه‌ی سه مد اوّل ده نوع تیر با شرایط مرزی متفاوت..... ۳۴

۲-۳ خواص و ابعاد شش صفحه‌ی مربعی شکل آلومینیومی و گرافیت- اپوکسی..... ۴۰

۲-۴ فرکانس‌های طبیعی صفحات آلومینیومی..... ۴۱

۲-۵ فرکانس‌های طبیعی صفحات گرافیت- اپوکسی..... ۴۲

۲-۶ ضرایب الاستیسیته‌ی صفحات آلومینیومی..... ۴۳

۲-۷ ضرایب الاستیسیته‌ی صفحات گرافیت- اپوکسی..... ۴۴

۳-۱ تنظیمات الگوریتم ژنتیک در این تحقیق..... ۶۵

۴-۱ مقایسه‌ی فرکانس‌های تجربی و فرکانس‌های تحلیلی این تحقیق و تحقیق**Gibson**[۱]..... ۶۹

۴-۲ مقایسه‌ی مقادیر λ_i محاسبه شده از روش تقریبی و روش دقیق..... ۷۰

۴-۳ ضرایب الاستیسیته محاسبه‌شده به کمک الگوریتم ژنتیک به همراه نتایج تحقیق **Gibson**[۱]..... ۷۲

۴-۴ اپراتورها و پارامترهای قابل تنظیم الگوریتم ژنتیک..... ۷۲

۴-۵ ابعاد و خواص صفحه‌ی کربن-اپوکسی..... ۷۶

۴-۶ مقایسه‌ی فرکانس‌های محاسبه شده به کمک روش ریلی-ریتز و مقادیر تجربی ارائه‌شده در مرجع [۱۵]..... ۷۷

۴-۷ ضرایب الاستیسیته محاسبه‌شده به کمک الگوریتم ژنتیک به همراه نتایج تست کشش[۱۵]..... ۷۸

۴-۸ اپراتورها و پارامترهای قابل تنظیم الگوریتم ژنتیک..... ۷۸

۴-۹ مقدار واقعی و رنج تغییر ضرایب برای بررسی حساسیت ضرایب..... ۸۰

فهرست اشکال

۲-۱ برآیند تنش‌ها..... ۱۰

۲-۲ برآیند ممان‌ها و تنش‌های برشی عرضی..... ۱۰

۲-۳ تیر دو سر آزاد..... ۳۲

۲-۴ مد اوّل تیر دو سر آزاد..... ۳۲

۲-۵ مد دوم تیر دو سر آزاد..... ۳۲

۲-۶ مد سوم تیر دو سر آزاد..... ۳۲

۲-۷ مد چهارم تیر دو سر آزاد..... ۳۳

۳-۱ نمای کلّی الگوریتم ژنتیک..... ۴۷

۳-۲ تعدادی از ژن‌های سازنده‌ی کروموزوم..... ۴۸

۳-۳ نمایش کروموزوم اعداد در GA..... ۴۹

۳-۴ احتمالات چرخ رولت..... ۵۲

۳-۵ ادغام تک نقطه‌ای..... ۵۴

۳-۶ ادغام دو نقطه‌ای..... ۵۴

۳-۶ ادغام چند نقطه ای برای تعداد زوج..... ۵۵

۳-۸ ادغام چند نقطه ای برای تعداد فرد..... ۵۵

۳-۹ ادغام یکنواخت..... ۵۵

۳-۱۰ نمای کلّی جعبه ابزار..... ۶۰

۳-۱۱ شرایط توقّف الگوریتم..... ۶۱

۳-۱۲ نمونه‌ای از نمایش همگرایی در الگوریتم ژنتیک..... ۶۲

۳-۱۳ شرایط تولید جمعیت اوّلیه..... ۶۳

۴-۱ همگرایی الگوریتم ژنتیک برای ترکیب مد ۷،۶،۵،۱ ..... ۷۳

۴-۲ همگرایی الگوریتم ژنتیک برای ترکیب مد ۸،۶،۵،۱ ..... ۷۴

۴-۳ همگرایی الگوریتم ژنتیک برای ترکیب مد ۸،۷،۶،۱ ..... ۷۴

۴-۴ همگرایی الگوریتم ژنتیک برای ترکیب مد ۸،۷،۶،۵ ..... ۷۵

۴-۵ همگرایی الگوریتم ژنتیک برای جستجوی۱ ..... ۷۸

۴-۶ همگرایی الگوریتم ژنتیک برای جستجوی۲ ..... ۷۹

۴-۷ همگرایی الگوریتم ژنتیک برای جستجوی۳ ..... ۷۹

شکل۴-۸ حساسیت Ex نسبت به فرکانس مد۱ ..... ۸۱

شکل۴-۹ حساسیت Ex نسبت به فرکانس مد۵ ..... ۸۱

شکل۴-۱۰ حساسیت Ex نسبت به فرکانس مد۶ ..... ۸۱

شکل۴-۱۱ حساسیت Ex نسبت به فرکانس مد۷ ..... ۸۱

شکل۴-۱۲ حساسیت Ex نسبت به فرکانس مد۸ ..... ۸۱

شکل۴-۱۳ حساسیت Ey نسبت به فرکانس مد۱ ..... ۸۲

شکل۴-۱۴ حساسیت Ey نسبت به فرکانس مد۵ ..... ۸۲

شکل۴-۱۵ حساسیت Ey نسبت به فرکانس مد۶ ..... ۸۲

شکل۴-۱۶ حساسیت Ey نسبت به فرکانس مد۷ ..... ۸۲

شکل۴-۱۷ حساسیت Ey نسبت به فرکانس مد۸ ..... ۸۲

شکل۴-۱۸ حساسیت Gxy نسبت به فرکانس مد۱ ..... ۸۳

شکل۴-۱۹ حساسیت Gxy نسبت به فرکانس مد۵ ..... ۸۳

شکل۴-۲۰ حساسیت Gxy نسبت به فرکانس مد۶ ..... ۸۳
شکل۴-۲۱ حساسیت Gxy نسبت به فرکانس مد۷ ..... ۸۳
شکل۴-۲۲ حساسیت Gxy نسبت به فرکانس مد۸ ..... ۸۳
شکل۴-۲۳ حساسیت vxy نسبت به فرکانس مد۱ ..... ۸۴
شکل۴-۲۴ حساسیت vxy نسبت به فرکانس مد۵ ..... ۸۴
شکل۴-۲۵ حساسیت vxy نسبت به فرکانس مد۶ ..... ۸۴
شکل۴-۲۶ حساسیت vxy نسبت به فرکانس مد۷ ..... ۸۴
شکل۴-۲۷ حساسیت vxy نسبت به فرکانس مد۸ ..... ۸۴

فصل اوّل

مقدّمه

۱-۱- سرآغاز

ضرایب الاستیسیته مواد کامپوزیتی به عوامل مختلفی از جمله شکل لایه‌ها، مواد سازنده‌ی آن، روش ساخت و غیره بستگی دارد. از این رو این غیر ممکن است که این خواص را به صورت استاندارد در جداولی ارائه کرد. اگر از تست‌های مرسوم استفاده شود، تعیین خواص مواد پیچیده از جمله صفحات کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف از جمله مشکلات جدّی موجود می‌باشد. در دهه‌ی اخیر، در بیشتر تحقیق‌های انجام شده درباره‌ی این موضوع، تمام سعی بر پیش‌بینی خواصّ مکانیکی ساختارهای کامپوزیتی لایه‌ای با فرض‌های مختلف متمرکز شده‌است. اخیراً روش‌های غیر مخرّب برای تعیین ضرایب الاستیسیته‌ی ساختارهای کامپوزیتی برپایه‌ی نتایج تست‌های مودال، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنین روش‌هایی در واقع از نوع مسائل معکوس می‌باشند به این معنی که پارامترهای موجود در مدل به گونه‌ای بهبود یابند که نهایتاً پاسخ فرکانس‌های تحلیلی به طور رضایت‌بخشی بر مقادیر تجربی منطبق شود و در طی این همگرایی ضرایب الاستیسیته محاسبه‌شود. در این تحقیق سعی برآن است که یک روش جدید از نوع غیر مخرّب برای تعیین خواصّ مواد کامپوزیتی ارائه‌شود.

فصل اوّل در رابطه با تاریخچه تحقیقات صورت گرفته در سال‌های گذشته پیرامون محاسبه‌ی خواصّ مواد کامپوزیتی با استفاده از روش‌های غیر مخرّب و نیز با استفاده از فرکانس‌های طبیعی تجربی می‌باشد.

در فصل دوم به معادلات حاکم و روش تحقیق پرداخته می‌شود. در این فصل معادلات یک صفحه‌ی ناهمسانگرد شامل معادلات حرکت و معادلات اصلی به همراه معادلات انرژی شامل انرژی کرنشی و انرژی جنبشی استخراج شده‌اند. روش ریلی‌ریتز نیز بر پایه‌ی معادلات انرژی استخراج‌شده بیان می‌شود. معادلات مربوط به ارتعاشات صفحات مستطیل شکل ارتوتروپیک، با شرایط مرزی ساده و کلمپ و به کمک آن صفحات شامل تکیه‌گاه‌های آزاد، در ادامه به کمک روش ریلی -ریتز بازنویسی می‌شود. در نهایت تحقیقی که پایه‌ی اصلی این پروژه می‌باشد، در این بخش توضیح داده می‌شود.

فصل سوم پیرامون الگوریتم ژنتیک می‌باشد. ساختار اصلی این الگوریتم، اپراتورهای مورد استفاده در الگوریتم و انواع آن در این بخش بیان شده‌است. در انتهای این فصل به معرّفی جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار Matlab که در این تحقیق از آن استفاده‌شده، پرداخته می‌شود.

در فصل چهارم نتایج حاصل از این تحقیق در محاسبه‌ی فرکانس‌های طبیعی تحلیلی به کمک روش ریلی-ریتز به همراه نتایج حاصل از محاسبه‌ی ضرایب الاستیسیته‌ی دو نمونه‌ی متفاوت از صفحات مستطیل شکل ارتوتروپیک ویژه با شرایط مرزی کاملاً آزاد و مقایسه‌ی این نتایج با تحقیق‌های مشابه ارائه‌شده‌است و نهایتاً با ارائه‌ی یک تحلیل حساسیت به بیان منابع خطا پرداخته‌شده‌است.

۱-۲- تاریخچه

در سال ۱۹۸۷ Deobald & Gibson [۱] با استفاده از فرکانس‌های طبیعی اندازه گیری شده‌ی صفحات ارتوتروپ به تعیین چهار ثابت الاستیسیته ی صفحه پرداختند. در روش ارائه شده با استفاده از روش ریلی‌ریتز برای مدل کردن ارتعاشات صفحات مستطیل شکل ارتوتروپ و با در نظر گرفتن توابع فرضی صفحات با شرایط مرزی شامل آزاد و کلمپ، فرکانس‌های طبیعی محاسبه شده و این مقادیر توسط تحلیل اجزا محدود و آنالیز مودال برای صفحات آلومینیومی و گرافیت - اپوکسی مربعی شکل، بازبینی می‌شود. سپس مدل ارتعاشی صفحه به یک برنامه‌ی کامپیوتری که طراحی شده تا با استفاده از فرکانس‌های طبیعی اندازه گیری شده‌ی صفحات ارتوتروپ به تعیین چهار ثابت الاستیسیته‌ی صفحه بپردازد، متّصل می‌شود. فرکانس‌های طبیعی بوسیله‌ی یک روش آنی تحریک اندازه گیری شده تا بوسیله‌ی آن‌ها دو مدول یانگ، مدول برشی صفحه و ضریب پواسون برای هر صفحه اندازه گیری شود.

در سال۱۹۹۲Ayorinde و دیگر همکاران[۲]، نشان می‌دهند که چگونه چهار ضریب الاستیسیته مستقل (مدول طولی و عرضی یانگ، مدول برشی صفحه‌ای و ضریب پواسون) یک ماده‌ی ارتوتروپ از نتایج تشدید مدول یک صفحه‌ی نازک مستطیل شکل با تکیه‌گاه آزاد، با استفاده از تئوری لایه‌ای کلاسیک و یک فرمولاسیون بهینه‌سازی سه مد ریلی با تابع هدف حدّاقل مربعات، استخراج می‌شود. نتایج برای نسبت های ارتوتروپی و نسبت های طول به ضخامت های مختلف بدست آمده است. نتایج نشان می-دهد که روش پیشنهادی پتانسیل محاسبه ی ضرایب الاستیسیته کامپوزیت های وسیعی را داراست.

در سال ۱۹۹۳ Pedersen و دیگر همکاران[۳]، یک تکنیک شناسایی غیر مستقیم برای پیش‌بینی خواصّ نمونه‌های مواد کامپوزیتی ارائه کردند. در این روش از فرکانس‌های ویژه‌ی تجربی، مقادیر ویژه‌ی عددی محاسبه شده‌ی متناظر، تحلیل‌های حساسیت و بهینه‌سازی استفاده‌شده‌است. با حدّاقل سازی اختلاف بین فرکانس‌های اندازه‌گیری شده‌ی یک نمونه صفحه و مقادیر عددی متناظر، پارامترهای بهینه سازی مطلوب بدست می‌آید.

در سال ۱۹۹۶ Araujo و دیگر همکاران[۴]، یک روش عددی – تجربی برای تعیین خواص مواد کامپوزیتی پیشنهاد دادند. این روش تکنیک‌های تجربی که برای تعیین فرکانس‌های ویژه‌ی ارتعاشی صفحات ساخته شده از مواد کامپوزیتی می‌باشد را با یک روش عددی اجزا محدود که برای تعیین فرکانس های ویژه‌ی عددی متناظر به‌کار می‌رود، ترکیب می‌کند. در طی روند تعیین مجموعه‌ای از خواصّ مواد، از تکنیک‌های بهینه‌سازی به منظور حداقل سازی اختلاف بین مقادیر ویژه‌ی تجربی و عددی استفاده می‌شود.

در همان سال Lai و دیگر همکاران[۵]، روشی برای اصلاح ضرایب الاستیسیته‌ی یک مدل ارتعاشی صفحه‌ی کامپوزیتی نازک بوسیله‌ی یک روش تکراری ارائه کردند به این گونه که پاسخ‌های تحلیلی اصلاح شده نهایتاً منطبق بر نتایج تجربی بدست آمده شود. در این روش با اتمام روند اصلاحی، ضرایب نهایی بدست آمده به عنوان ضرایب صحیح صفحه در نظر گرفته شده و بنابراین یک روش غیر مخرّب برای تعیین خواصّ بدست آمده است. در این روش از یک مدل ریلی – ریتز برای محاسبه‌ی مودهای طبیعی ارتعاشی و یک مدل اجزا محدود برای اطمینان از این مود مورد استفاده قرار گرفته‌است. مودهای تجربی به عنوان پاسخ های هدف بوسیله‌ی تست مودال استخراج می‌شوند. تخمین آماری Bayesian برای هدایت سازگاری بین پارامترها، بر پایه‌ی اختلاف بین پاسخ های تجربی و تحلیلی اجرا می‌شود. در تحقیق انجام شده همگرایی مطلوب روش تکراری، در صفحات شیشه اپوکسی ارتوتروپ مختلفی دیده‌شده‌است.

در سال۱۹۹۷Hom و دیگر همکاران[۶]، با استفاده از تخمین Bayesian، ضرایب الاستیسیته‌ی پوسته‌های کامپوزیتی استوانه‌ای شکل ارتوتروپیک ویژه با لایه چینی متقارن بالانس شده را به‌وسیله‌ی فرکانس‌های طبیعی که از تست مودال شکل کاملاً آزاد آن‌ها بدست می‌آید، تعیین کردند. تخمین ضرایب الاستیسیته‌ی مختلف هر استوانه بر پایه‌ی یک روند تکراری صورت می‌گیرد. فرمولاسیون مدل توسط روش ریلی-ریتز با استفاده از توابع شکل تیرها انجام می‌گیرد. با تحلیل‌های حساسیت مشخّص می‌شود که فرکانس‌های طبیعی پوسته‌های استوانه‌ای شکل، بستگی زیادی به مدول‌های برشی درون صفحه‌ای و جانبی دارند و به همین دلیل با دقّت بالا اندازه‌گیری می‌شوند. امّا بر خلاف آن نسبت های پواسون نمونه‌ها نمی‌توانند به دقّت محاسبه شوند.

در سال۱۹۹۹ Sol و دیگر همکاران[۷]، به ارائه‌ی روشی عددی – تجربی برای تعیین غیر مخرب ضرایب سختی مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف پرداختند. در واقع تعیین ضرایب سختی مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف (FRC)، دشوارتر از تعیین خواصّ مواد ایزوتروپیک مرسوم است. در تحقیق انجام‌شده ابتدا به توضیح مشکلاتی که ممکن است بوجود بیاید پرداخته و در ادامه یک روش غیر مخرّب که می‌تواند یک پاسخ ممکن مسأله باشد را ارائه می‌کنند. روش پیشنهادی به نام تکنیک ترکیب روش عددی-تجربی خوانده می‌شود(MNET). از نقطه نظر تجربی، روش به اندازه‌گیری فرکانس های تشدید حاصل از تست صفحات مستطیلی معلق به طور آزاد، نیاز دارد. از نظر عددی، یک مدل دقیق از صفحه باید فراهم شود. روش اندازه‌گیری بسیار ساده بوده و نیاز به فراهم شدن نمونه‌های کمی دارد. تجهیزات روش ارزان بوده و روش اندازه‌گیری می‌تواند با یک برنامه‌ی کامپیوتر شخصی کنترل شود.

در همان سال Cunha و دیگر همکاران[۸]، از الگوریتم ژنتیک برای تعیین ضرایب الاستیسیته مواد کامپوزیتی به-وسیله‌ی تست های دینامیکی استفاده‌کردند. در واقع از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک تکنیک مکمّل برای اجرای پاسخ اوّلیه خواصّ الاستیکی استفاده شده و به کمک آن، روش های معمول آپدیت کردن تصحیح می‌شود. این روش امکان تخمین همزمان چند ضریب الاستیسته را با تنها یک تست فراهم می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، بازده و قدرت الگوریتم ژنتیک را نشان می-دهد.

در سال ۲۰۰۰ Araújo و دیگر همکاران[۹]، یک روش ترکیبی تجربی-عددی برای تعیین شش مدول الاستیسیته صفحات کامپوزیتی ضخیم پیشنهاد کردند. این تکنیک می‌تواند در صفحات کامپوزیتی ساخته شده از مواد و لایه چینی متفاوت

مورد استفاده قرار گیرد. در این روش از داده‌های تجربی پاسخ صفحه، متناظر با پیش بینی‌های عددی و تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده شده‌است. در واقع پاسخ صفحه مجموعه‌ای از فرکانس‌های طبیعی ارتعاش مارپیچ است. مدل عددی بر پایه‌ی روش اجزا محدود با استفاده از میدان جابجایی با مرتبه بالا می‌باشد. مدل برای تعیین مدول های الاستیسیته نمونه صفحه از طریق تکنیک-های بهینه‌سازی، با استفاده از تحلیل‌های حساسیت به کار می‌رود. اعتبار، بازده و پتانسیل روش پیشنهادی در طی موارد آزمایش توضیح داده می‌شود.

در سال۲۰۰۲ Berthelot و دیگر همکاران[۱۰]، یک تحلیل وسیعی را پیرامون مسأله‌ی تعیین سختی خمشی صفحات لایه‌ای متقارن و ارتوتروپ به‌وسیله‌ی ارتعاش مارپیچ صفحات مستطیل شکل با شرایط مرزی متفاوت شامل لبه‌های آزاد یا کلمپ، ارائه کردند. در این روش، تقریب ریلی و روش ریتز برای ارزیابی ارتعاشات مارپیچ صفحه در نظر گرفته شده است. با استفاده از نتایج تجربی و یک تحلیل حساسیت به خوبی نشان دادند که چگونه استخراج سختی خمشی از فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات مارپیچ یک صفحه‌ی ارتوتروپ یا متقارن به یک مسئله‌ی ill-conditional میل می‌کند و این نتیجه حاصل می‌شود که روش-هایی که بر مبنای تکرار در کنار روش ریتز یا روش های عددی از جمله آنالیز اجزا محدود قرار می‌گیرند، نمی‌توانند برای تعیین سختی خمشی از روی فرکانس‌های طبیعی یک صفحه، در کاربردهای صنعتی به‌کار روند. برای صفحه‌های لایه‌ای ارتوتروپ، این تحقیق نشان می‌دهد که چگونه تقریب ریلی بر مشکل واگرایی روش تکراری چیره می‌شود.

در سال ۲۰۰۴ Maletta و دیگر همکاران[۱۱]، روشی را برای تعیین ضرایب الاستیسیته ی صفحات لایه ای کامپوزیتی ارائه دادند که در آن تحلیل اجزا محدود با الگوریتم ژنتیک بوسیله‌ی نتایج تست ارتعاشی، ترکیب شده‌است، به این‌گونه که ضرایب الاستیسیته در یک مدل عددی، آپدیت می‌شوند تا این‌که خروجی برنامه‌ی عددی با نتایج تست ارتعاشی منطبق شود.

درهمان سال Pedersen و دیگر همکاران[۱۲]، برای تعیین مدول موادّ ارتوتروپیک از روند عددی-تجربی ترکیبی استفاده‌کردند. روش تعیین بر پایه‌ی فرکانس‌های ویژه‌ی یک صفحه‌ی مستطیل شکل آزاد می‌باشد. زیرا بهترین سازش بین فرکانس‌های ویژه‌ی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در این حالت به‌وجود می‌آید. مسأله‌ی تعیین خواص به شکل عددی به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی فرموله شده به طوری‌که در آن یک تابع خطا مینیمم می‌شود. این تابع خطا به شکل اختلاف بین نتایج تحلیل مدل و نتایج تجربی بیان می‌شود. روش پیشنهادی سریع و غیر مخرّب است و تنها به یک آزمایش برای تعیین هر چهار مدول نیاز دارد. به علاوه این‌که روش برای مطالعه‌ی مدول مواد در محیط‌های مختلف مناسب است. از این جهت که صفحه‌ی مورد آزمایش، از تجهیزات تست جدا می‌شود.

در همان سال Silva و دیگر همکاران[۱۳]، یک تکنیک برای تعیین ضرایب الاستیسیته‌ی مواد کامپوزیتی با اجرای یک الگوریتم ژنتیک ارائه می‌دهند. روش تعیین ضرایب، بر پایه‌ی بروزرسانی یک مدل در طی یک روند بهینه‌سازی است که در آن تابع هدف به صورت اختلاف بین فرکانس های طبیعی تحلیلی و فرکانس های تجربی متناظر می‌باشد. فرکانس‌های طبیعی تحلیلی بوسیله‌ی روش اجزا محدود، در حالی‌که فرکانس‌های تجربی به‌وسیله‌ی تست‌های مودال استاندارد بدست می‌آیند. مسئله‌ی بهینه-سازی به کمک یک ژنتیک الگوریتم اجرا می‌شود که در آن دیگر به گرادیان تابع با توجه به محاسبات عظیم بردارهای ویژه‌ی موجود در روش‌های گرادیان، نیازی نیست. تکنیک پیشنهادی بوسیله‌ی تعدادی تست‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در سال ۲۰۰۵ Alfano و دیگر همکاران[۱۴]، یک روش غیر مخرّب برای تعیین ضرایب الاستیسیته‌ی دینامیکی صفحات نازک مربّعی شکل ایزوتروپیک ارائه کردند. این روش بر پایه‌ی اندازه گیری حداقل ۲ عدد از چهار فرکانس تشدید نمونه-هاست و ضرایب الاستیسیته به طور مستقیم با استفاده از توابع درون یابی چند جمله‌ای محاسبه می‌شود. این توابع از داده‌های مناسب بدست آمده بوسیله‌ی آنالیزهای اجزا محدود استخراج می‌شوند. این روش بر روی نمونه‌های سرامیکی و فلزی آزمایش شده‌است. نمونه‌ها برای مرتعش شدن، یا با خروجی بسامد متغیر پیوسته یا ضربه‌ای تحریک شده‌اند. تأثیر منابع متفاوت ایجاد خطا در محاسبه‌ی ضرایب الاستیسیته نیز مورد بحث قرار گرفته‌است.

در همان سال Lee و دیگر همکاران[۱۵]، یک روش جستجوی غیر مخرب با استفاده از نتایج ارتعاشی برای تعیین خواصّ مکانیکی صفحات کامپوزیتی لایه‌ای محدود، ارائه‌کردند. روش ریلی-ریتز که در آن یک سری چند جمله ای لژاندر برای تقریب تغییر شکل صفحه اختیار شده، برای تعیین فرکانس‌های طبیعی تحلیلی صفحات کامپوزیتی لایه‌ای محدود به کار رفته است. یک تعدادی فرکانس از نتایج تست ارتعاشی محرک آنی صفحات کامپوزیتی لایه‌ای که از هر دو طرف لبه‌ها و وسط صفحه با قید ارتجاعی محدود شده، استخراج می‌شوند تا بوسیله‌ی آن خواص مکانیکی صفحات بدست آیند. تابع مجموع مربعات مانده‌هایی که اختلاف بین فرکانس طبیعی پیش بینی شده‌ی تجربی و تحلیلی صفحات کامپوزیتی لایه‌ای به صورت ارتجاعی محدود را محاسبه می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. محاسبه‌ی خواص مکانیکی صفحه به شکل یک مسئله‌ی حداقل سازی مقید، فرموله می-شود، به طوری‌که ضرایب مکانیکی با محاسبه‌ی مینیمم مطلق تابع مجموع مربع مانده‌ها، بدست می‌آیند. دقّت و امکان پذیری روش پیشنهادی بوسیله‌ی نمونه های مختلف عددی در تعیین خواص مکانیکی صفحات کامپوزیتی لایه ای محدود ارتجاعی با لایه چینی‌های مختلف و ساخته شده از مواد کامپوزیتی متفاوت، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بررسی تجربی تعیین ضرایب مکانیکی صفحات کامپوزیتی لایه‌ای محدود ارتجاعی مختلف برای روش پیشنهادی می‌تواند تخمین‌های خوبی برای ضرایب مکانیکی صفحات کامپوزیتی لایه‌ای محدود ارتجاعی به طریق موثر و کارآمدی ارائه دهد.

در سال۲۰۰۹ Hwang و دیگر همکاران[۱۶]، با استفاده از تست ارتعاشی ترکیب شده با یک روش عددی، روش جایگزینی برای تعیین ضرایب الاستیسیته صفحه کامپوزیتی ارائه‌دادند و برای بدست آوردن نتایج بهتر، یک روش عددی بر پایه‌ی یک الگوریتم ژنتیک هیبرید پیشنهاد کردند. تکرارپذیری و دقت روش معکوس پیشنهادی توسط داده‌های موجود، تایید شده‌است. روش پیشنهادی با موفقیت برای تعیین ضرایب الاستیسیته موثر یک صفحه کامپوزیتی بافته‌شده به کار رفته‌است.

همان‌طور که در گزارش بالا مشخّص است، الگوریتم ژنتیک به همراه روش تحلیلی مورد استفاده قرار نگرفته است. در این مقاله یک روش غیر مستقیم تحلیلی- تجربی برای تعیین خواصّ الاستیکی صفحه‌های ارتوتروپیک کامپوزیتی با شرایط مرزی کاملاً آزاد پیشنهاد می‌شود. روش پیشنهادی شامل استفاده از نتایج تجربی اندازه‌گیری فرکانس‌های تشدید صفحات کامپوزیتی در کنار یک روش تحلیلی برای تعیین فرکانس‌های طبیعی متناظر است. به منظور حدّاقل سازی انحراف بین فرکانس-های تشدید تجربی و تحلیلی در طول شناسایی خواص از یک روش جستجو بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. در این مقاله تنها صفحات نازک مستطیل شکل کامپوزیتی ارتوتروپیک ویژه با شرایط مرزی کاملاً آزاد در نظر گرفته شده‌است.

فصل دوم

معادلات حاکم و روش تحقیق

۲-۱- معادلات یک صفحه‌ی لایه‌ای ناهمسانگرد

با توجّه به اینکه صفحات کامپوزیتی لایه‌ای ارتوتروپیک ویژه به عنوان نمونه برای بررسی در این تحقیق در نظر گرفته-شده‌اند، معادلات و روابط حاکم بر این نوع خاص از صفحات ناهمسانگرد بیشتر مورد توجّه است. از این رو در این فصل به استخراج روابط اصلی و معادلات دیفرانسیل حاکم بر این مسأله پرداخته می‌شود. [۱۳]

۲-۱-۱- روابط بین جابجایی و کرنش

اگر جابجایی مماسی u و v تابع خطی از جهت z فرض شوند. می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} u &= u^{\circ}(x,y,t) + zF_1(x,y,t) \\ v &= v^{\circ}(x,y,t) + zF_2(x,y,t) \end{aligned} \qquad (۱-۲)$$

که در آن u° و v° جابجایی‌های مماسی صفحه‌ی میانی هستند. از طرفی داریم:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \\ \varepsilon_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned} \qquad (۲-۲)$$

اگر کرنش‌های برشی عرضی ε_{xz} و ε_{yz} قابل صرف‌نظر کردن باشند، با استفاده از روابط۲-۱و ۲-۲ می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xz} &= F_1(x,y,t) + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \\ \varepsilon_{yz} &= F_2(x,y,t) + \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \end{aligned} \qquad (۳-۲)$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} F_1(x,y,t) &= -\frac{\partial w}{\partial x} \\ F_2(x,y,t) &= -\frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \qquad (۴-۲)$$

اگر از کرنش نرمال جانبی ε_z نیز بتوان چشم پوشی کرد، خواهیم داشت:

$$w = w(x,y,t) \qquad (۵-۲)$$

بنابراین روابط کرنش – جابجایی به شکل زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \varepsilon_x^\circ + z\chi_x \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_y^\circ + z\chi_y \\ \varepsilon_{xy} &= \varepsilon_{xy}^\circ + z\chi_{xy}\end{aligned} \qquad (۶-۲)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^\circ &= \frac{\partial u^\circ}{\partial x} \\ \varepsilon_y^\circ &= \frac{\partial v^\circ}{\partial y} \\ \varepsilon_{xy}^\circ &= \frac{\partial u^\circ}{\partial y} + \frac{\partial v^\circ}{\partial x}\end{aligned} \qquad (۷-۲)$$

$$\begin{aligned}\chi_x &= -\frac{\partial^۲ w}{\partial x^۲} \\ \chi_y &= -\frac{\partial^۲ w}{\partial y^۲} \\ \chi_{xy} &= -۲\frac{\partial^۲ w}{\partial x \partial y}\end{aligned} \qquad (۸-۲)$$

در روابط بالا χ ، نمایش دهنده‌ی انحنا می‌باشد. معادلات ۲-۶ تا ۲-۸ منطبق بر تئوری کلاسیک صفحات همگن می‌باشد.

۲-۱-۲- معادلات حرکت

صرف نظر کردن از ε_{xz} و ε_{yz} امکان پذیر نیست، مگر اینکه آثار برشی به کلّی از بین برود. بدیهی است که این امر از نظر فیزیکی صحیح نیست. این ناسازگاری آشکار در تئوری صفحه‌ی کلاسیک شناخته شده و پذیرفته می‌شود و آثار برشی زمانی که معادلات حرکت استخراج می‌شوند، در نظر گرفته می‌شود.

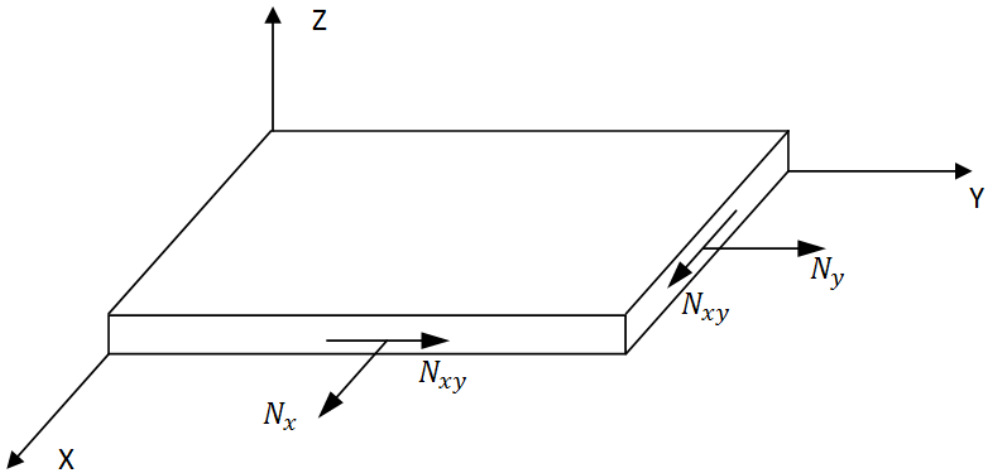
برای اینکه تأثیرات نیروی درون صفحه‌ای را در نظر بگیریم، عبارات غیر خطی معادلات حرکت را که شامل حاصل ضرب تنش‌ها در شیب‌های صفحه می‌باشد، حفظ کرده و از الباقی عبارات غیر خطی صرف نظر می‌کنیم. با این فرض می‌توان معادله‌ی حرکت لایه‌ای k ام را به شکل زیر نوشت:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x^{(k)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{(k)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}^{(k)}}{\partial z} &= \rho_\circ^{(k)} \frac{\partial^۲ u}{\partial t^۲} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}^{(k)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^{(k)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}^{(k)}}{\partial z} &= \rho_\circ^{(k)} \frac{\partial^۲ v}{\partial t^۲} \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma_{xz}^{(k)} + \sigma_x^{(k)}\frac{\partial w}{\partial x} + \sigma_{xy}^{(k)}\frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma_{yz}^{(k)} + \sigma_{xy}^{(k)}\frac{\partial w}{\partial x} + \sigma_y^{(k)}\frac{\partial w}{\partial y}\right) & \\ + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma_z^{(k)} + \sigma_{xz}^{(k)}\frac{\partial w}{\partial x} + \sigma_{yz}^{(k)}\frac{\partial w}{\partial y}\right) &= \rho_\circ^{(k)} \frac{\partial^۲ w}{\partial t^۲}\end{aligned} \qquad (۹-۲)$$

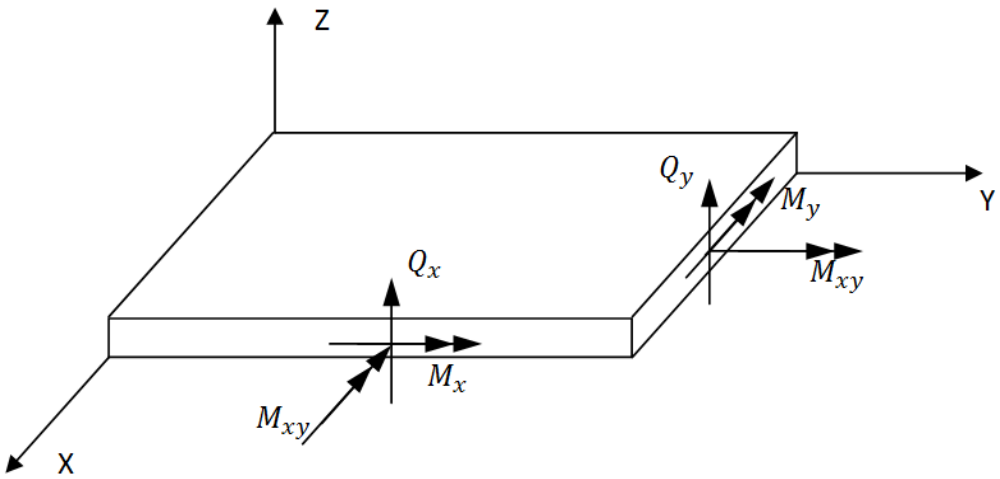
تنش‌ها و مومان‌های برآیند به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$\left(N_x, N_y, N_{xy}\right) = \int_{-h/2}^{h/2} \left(\sigma_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}, \sigma_{xy}^{(k)}\right) dz$$
$$\left(Q_x, Q_y\right) = \int_{-h/2}^{h/2} \left(\sigma_{xz}^{(k)}, \sigma_{yz}^{(k)}\right) dz \qquad (۱۰-۲)$$
$$\left(M_x, M_y, M_{xy}\right) = \int_{-h/2}^{h/2} \left(\sigma_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}, \sigma_{xy}^{(k)}\right) z dz$$

این برآیندها در شکل ۲-۱ و ۲-۲ نمایش داده شده‌اند.



شکل۲-۱: برآیند تنش‌ها



شکل۲-۲: برآیند ممان‌ها و تنش‌های برشی عرضی