۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران –گرایش سازه

تحلیل استاتیکی تیرهای کامپوزیتی شامل لایه‌های پیزوالکتریک برشی

استاد راهنما:

دکتر سید بهرام بهشتی اول

نگارش:

سیلدا شه‌وقار اصل

۸۸۲۰۳۲۴

بهمن ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

۱.....

فصل دوم: پیزوالکتریسیته و معادله‌ی ساختاری ماده پیزوالکتریک برشی

۲-۱- مقدمه ۶

۲-۲- دسته‌بندی مواد پیزوالکتریک ۶

۲-۳- اثر پیزوالکتریسیته از دیدگاه میکروسکوپیک ۸

۲-۴- فرآیند قطبی‌سازی و دمای کوری جسم پیزوالکتریک ۱۲

۲-۵- بدست آوردن معادله ساختاری جسم پیزوالکتریک ۱۵

۲-۵-۱- اثر مستقیم پیزوالکتریک ۱۵

۲-۵-۲- اثر معکوس پیزوالکتریک ۱۸

۲-۶- رفتار مواد پیزوالکتریک تحت آزمایش‌های کشش و فشار ۱۹

۲-۷- نحوه فعالیت پیزوالکتریک برشی به عنوان حسگر و عملگر در سازه‌های مرکب ۲۰

۲-۸- کاربرد مواد پیزوالکتریک برشی در صنعت ۲۱

فصل سوم: مرور ادبیات فنی

۳-۱- مقدمه ۲۶

۳-۲- مدل‌های ارائه شده جهت تحلیل سازه‌های مرکب چندلایه ۲۷

۳-۲-۱ تئوری‌های معادل صفحات تک لایه ۲۸

۳-۲-۲- تئوری‌های لایه‌ای (LW) ۳۱

۳-۲-۳- تئوری‌های زیگزاگ ۳۲
۳-۲-۳-۱- مدل‌های مبتنی بر LMT ۳۳
۳-۲-۳-۲- مدل‌های مبتنی بر AMT ۳۶
۳-۲-۳-۳- مدل‌های مبتنی بر فرمولاسیون ترکیبی ریسنر ۳۷
۳-۲-۴- تئوری‌های مبتنی بر اصل برهم نهی مضاعف ۴۰
۳-۳- مدل‌های ارائه شده جهت تحلیل تیرها و صفحات مرکب پیزوالکتریک برشی ۴۲

فصل چهارم: مدل اصلاح شده مرتبه بالای پیشنهادی جهت تحلیل استاتیکی تیرهای مرکب چندلایه شامل لایه پیزوالکتریک برشی

۴-۱- مقدمه ۵۰
۴-۲- هندسه و دستگاه مختصات ۵۲
۴-۳- معادلات ساختاری ۵۳
۴-۴- تقریب پتانسیل الکتریکی در لایه‌های پیزوالکتریک ۵۴
۴-۵- تقریب مولفه‌های تغییرشکل ۵۵
۴-۶- اعمال شروط پیوستگی ۵۶
۴-۶-۱- اعمال شرایط پیوستگی مولفه‌های تغییرشکل ۵۶
۴-۶-۲- اعمال شرط پیوستگی تنش برشی ۵۶
۴-۶-۳- اعمال شرایط پیوستگی تنش نرمال عرضی و مشتق آن ۶۰
۴-۷- مولفه‌های تانسور کرنش ۶۶
۴-۸- مدل اجزا محدود ۶۷
۴-۹- معادلات حاکم ۷۱
۴-۱۰- معادلات تعادل ۷۳

۴-۱۱- جمع‌بندی ۷۳

فصل پنجم: بحث و بررسی نتایج

۵-۱- مقدمه ۷۵

۵-۲- تیر ساندویچی دو سر مفصل با هسته پیزوالکتریک برشی تحت بارگذاری مکانیکی ۷۶

۵-۳- تیر ساندویچی دو سر مفصل با هسته پیزوالکتریک برشی تحت بارگذاری الکتریکی ۸۹

۵-۴- تیر ساندویچی یکسر گیردار با هسته پیزوالکتریک برشی ۱۰۳

۵-۵- تیر ساندویچی هوشمند ۱۱۴

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه تحقیقات

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۸

۶-۲- پیشنهادهایی برای ادامه‌ی تحقیقات ۱۱۹

پیوست ۱۲۱

فهرست مراجع ۱۲۷

K. N. Toosi University of Technology
Civil Engineering Department
Structural Engineering Division

Static analysis of composite beams with embedded shear piezoelectric layers

By:
Silda Shahvaghar Asl

Under the supervision of:
Dr. Bahram Beheshti Aval

January 2012

تقدیم به

مادر مهربان و پدر گرامیم که هر چه دارم از آنهاست

و

همسر عزیزم که همواره در کنار من بوده است

تشکر و قدردانی

سپاس می‌گویم خداوند بزرگ و بلندمرتبه را که توفیق گام نهادن در گوشه‌ای از دنیای بیکران علم را به من عطا نمود. به این امید که تلاش من مثمر ثمر واقع شود.

در اینجا برخود لازم میدارم که از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های ارزشمند استاد ارجمندم جناب آقای دکتر بهشتی قدردانی و سپاسگزاری نمایم و برای ایشان آرزوی سلامتی و سعادت می‌نمایم.

همچنین از پدر و مادر بزرگوار و همسر عزیزم که در طول این سال‌ها همیشه پشتوانه و مشوق بنده در راه تحصیل علم بوده و با کمک‌های شایان خود مرا در این راه یاری نموده‌اند، کمال تشکر را دارم و از خداوند منان می‌خواهم که به من توانی دهد بلکه بتوانم گوشه‌ای از محبت‌هایشان را جبران کنم.

در انتها وظیفه خود می‌دانم که از زحمات کلیه کسانی که به نحوی در انجام این پایان‌نامه مرا یاری نموده‌اند به ویژه آقای دکتر لزگی سپاسگزاری نمایم.

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از مواد پیزوالکتریک در ساخت سازه‌های هوشمند افزایش چشمگیری یافته است. سازه ساندویچی هوشمند نوعی از سازه‌های موردنظر می‌باشد که در آن از خاصیت برشی مواد پیزوالکتریک استفاده شده است.

در تحقیق موردنظر، تئوری اصلاح شده مرتبه بالایی جهت تحلیل استاتیکی تیرهای مرکب چند لایه و ساندویچی شامل لایه‌های پیزوالکتریک برشی ارائه شده است. از آنجایی که نیروی محرک از طریق سطوح مشترک لایه‌ها انتقال پیدا می‌کند، تنش‌های عرضی از جمله تنش نرمال عرضی دارای اهمیت زیادی می‌باشند. از اینرو در تئوری موردنظر اثرات تنش‌ها و کرنش‌های نرمال عرضی، همچنین انعطاف‌پذیری جانبی تیر نیز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این به منظور اعمال اثرات الکتریکی و افزایش دقت محاسبات، اثرات کرنش برشی القایی در لایه‌های پیزوالکتریک برشی نیز در فرمولاسیون لحاظ شده است. برخلاف بسیاری از تئوری‌های ارائه شده‌ی موجود، شرایط پیوستگی بین‌لایه‌ای تمامی مولفه‌های تغییرشکل و تنش‌های عرضی در حضور میدان الکتریکی محوری، برآورده گشته است. همچنین در مدل معرفی شده شرایط مرزی غیر صفر تنش‌های عرضی برشی و قائم بر روی سطوح بالا و پایین تیر نیز برآورده شده است.

در تئوری موردنظر، مولفه محوری تغییرشکل از ترکیب یک چند جمله‌ای، یک عبارت نمایی و یک عبارت شامل مجهولات الکتریکی لایه‌های پیزوالکتریک، تشکیل شده است. مولفه عرضی تیر نیز از ترکیب یک چند جمله‌ای پیوسته‌ی مرتبه چهار بهمراه یک عبارت که شامل مشتق اول مجهولات الکتریکی می‌باشد، تشکیل شده است. در راستای ضخامت هر لایه‌ی پیزوالکتریک نیز یک پتانسیل الکتریکی مرتبه دوم در نظر گرفته شده است. از جمله دیگر مزیت‌های مدل پیشنهادی این است که تعداد مجهولات مکانیکی آن مستقل از تعداد لایه‌هاست. علاوه بر این، مدل اجزا محدود بکار گرفته شده نیز عاری از پدیده‌ی قفل شدگی برشی می‌باشد.

به منظور صحت سنجی تئوری موردنظر، نتایج بدست آمده از مدل پیشنهادی با نتایج حاصل از تحلیل پیزوالاستیسیته و نیز نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود (ABAQUS) مقایسه شده‌اند. بدین منظور نمونه‌های مختلفی از تیر ساندویچی هوشمند که پارامترهای هندسی، شرایط مرزی و بارگذاری مکانیکی و الکتریکی آن‌ها با یکدیگر متفاوت‌اند انتخاب و تحلیل استاتیکی آن‌ها با استفاده از مدل پیشنهادی انجام شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی علاوه بر کم هزینه بودن به لحاظ محاسباتی قادر است پاسخ الکترواستاتیکی تیرهای ساندویچی شامل هسته پیزوالکتریک برشی را با دقت بسیار بالایی تحت شرایط مرزی مختلف الکتریکی و مکانیکی پیش بینی نماید.

کلمات کلیدی: اجزا محدود، پیزوالکتریک برشی، تیرهای مرکب چند لایه و ساندویچی، تنش‌های عرضی برشی و قائم، شرایط مرزی غیر همگن تنش‌های برشی عرضی

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱: مشخصات مکانیکی PZT-5A ۸

جدول ۵-۱. مشخصات مکانیکی گرافیت- اپوکسی و محرک برشی PZT-5A ۷۷

جدول۵-۲. بررسی همگرایی تعداد المان‌ها برای تیر ساندویچی تحت بارگذاری مکانیکی (S=10) ۷۸

جدول ۵-۳. نتایج عددی بدست آمده برای تیر ساندویچی تحت بارگذاری مکانیکی ۷۹

جدول ۵-۴. بررسی همگرایی تعداد المان‌ها برای تیر ساندویچی تحت بارگذاری الکتریکی (S=4) ۹۰

جدول ۵-۵. نتایج عددی بدست آمده برای تیر ساندویچی تحت بارگذاری الکتریکی ۹۱

جدول ۵-۶. نتایج عددی بدست آمده برای تیر ساندویچی یکسر گیردار ۱۰۵

جدول ۵-۷. مشخصات مکانیکی آلومینیوم و محرک برشی PZT-5H [۲۳] ۱۱۴

فهرست علائم و اختصارات

علائم

E_x , E_y	مولفه‌های درون صفحه‌ای میدان الکتریکی
ν_{ij}	نسبت پواسن
d_{ij}	ثابت پیزوالکتریک
D	قطبش بر واحد سطح
P_i	مولفه‌های بردار قطبش
E_i	مولفه‌های میدان الکتریکی
ε_{ij}	مولفه‌های تانسور کرنش
σ_{ij}	مولفه‌های تانسور تنش
ρ	وزن مخصوص
Ω	حجم جسم پیزوالکتریک
Γ	سطح مرزی جسم پیزوالکتریک
$\boldsymbol{F_V}$	بردار نیروهای حجمی
$\overline{q}$	بار الکتریکی حجمی
D_i	مولفه‌های بردار جابجائی الکتریکی
C_{ijkl}	ثوابت الاستیک
e_{kij}	ثوابت پیزوالکتریک
χ_{ik}	ثوابت دی‌الکتریک
u_i	مولفه‌های جابجائی مکانیکی
φ	پتانسیل الکتریکی

$\boldsymbol{F}_s$	بردار نیروهای سطحی
$\overline{Q}$	بار الکتریکی سطحی
V	پتانسیل الکتریکی اعمالی
U_i	جابجایی مکانیکی اعمالی
n_i	بردار نرمال بر سطح جسم پیزالکتریک
b	عرض سطح مقطع تیر مرکب
h	ارتفاع سطح مقطع تیر مرکب
L	طول تیر مرکب
N_l	تعداد لایه‌های تیر
k	شماره‌ی لایه تیر مرکب
$\phi_b^k(x,t)$	پتانسیل الکتریکی در سطح پایین k-امین لایه‌ی پیزوالکتریک
$\phi_c^k(x,t)$	پتانسیل الکتریکی در مرکز k-امین لایه‌ی پیزوالکتریک
$\phi_t^k(x,t)$	پتانسیل الکتریکی در سطح بالای k-امین لایه‌ی پیزوالکتریک
$L_j^k(z)$	توابع درونیاب میدان الکتریکی
$\overline{z}_k$	مختصات محلی راستای ضخامت k-امین لایه‌ی تیر
z_k	مختصات عرضی تیر پیزوالکتریک
$H(z)$	تابع پله‌ای واحد
t	زمان
$u(x,y,z,t)$	مولفه‌ی افقی (درون صفحه‌ای) تیر پیزوالکتریک
$w(x,y,z,t)$	مولفه‌ی قائم (عرضی) تیر پیزوالکتریک
$u_0(x,t)$	پارامتر مجهول جابجایی لایه‌ی مرجع تیر

$w_0(x,t)$	پارامتر مجهول جابجایی لایه‌ی مرجع تیر
$w_1(x,t)$	پارامتر مجهول جابجایی لایه‌ی مرجع تیر
$w_2(x,t)$	پارامتر مجهول جابجایی لایه‌ی مرجع تیر
$w_3(x,t)$	پارامتر مجهول جابجایی لایه‌ی مرجع تیر
$w_4(x,t)$	پارامتر مجهول جابجایی لایه‌ی مرجع تیر
$\theta(x,t)$	چرخش خمشی- برشی تیر حول محور y
$\psi_j(x,t)$	توابع مجهول میدان جابجایی عرضی تیر
$\Psi_j(x,t)$	توابع مجهول میدان جابجایی عرضی تیر
$\hat{u}_L^k$ ،$\overline{u}_L^k$	مولفه‌های محلی میدان جابجایی هر لایه
$X^-(x,t)$	تنش برشی بر روی سطح پایین تیر
$X^+(x,t)$	تنش برشی بر روی سطح بالای تیر
$Z^-(x,t)$	تنش عرضی قائم اعمال شده بر روی سطح پایین تیر
$Z^+(x,t)$	تنش عرضی قائم اعمال شده بر روی سطح بالای تیر
$\overline{N}_i$	توابع شکل درجه دوم لاگرانژ بوده
N_1, N_2 Nd_1, Nd_2	توابع شکل هرمیتی
ξ	مختصات محلی
l_e	طول المان تیر
$\boldsymbol{M}$	ماتریس جرم تیر
$\boldsymbol{K}$	ماتریس سختی تیر
$\boldsymbol{q}(t)$	بردار درجات آزادی تیر
G_k	مدول برشی k-امین لایه‌ی تیر

PN_l	تعداد لایه‌های پیزوالکتریک
$\boldsymbol{u}_u$	بردار مولفه‌های جابجایی
$\boldsymbol{u}_\varphi$	بردار مولفه‌های پتانسیل الکتریکی
$\boldsymbol{u}_u^e$	بردار متغیرهای گرهی مکانیکی
$\boldsymbol{u}_\varphi^e$	بردار متغیرهای گرهی الکتریکی
$\mathscr{N}$	ماتریس درونیاب مولفه‌های جابجایی و پتانسیل الکتریکی
$\mathscr{B}$	ماتریس درونیاب مولفه‌های کرنش و میدان‌های الکتریکی
$\delta\boldsymbol{u}$	جابجایی مجازی
$\delta\boldsymbol{\varphi}$	پتانسیل مجازی
$\boldsymbol{q}_u(t)$	درجات آزادی مکانیکی تیر پیزوالکتریک
$\boldsymbol{q}_\varphi(t)$	درجات آزادی الکتریکی تیر پیزوالکتریک
$\boldsymbol{K}_{uu}$	ماتریس سختی مکانیکی
$\boldsymbol{K}_{u\phi}, \boldsymbol{K}_{\phi u}$	ماتریس‌های سختی کوپلینگ الکترومکانیکی
$\boldsymbol{K}_{\phi\phi}$	ماتریس سختی دی‌الکتریک
$\boldsymbol{F}_u$	بردار نیروهای مکانیکی تیر پیزوالکتریک
$\boldsymbol{F}_\phi$	بردار نیروهای الکتریکی تیر پیزوالکتریک
h_k	ضخامت k-امین لایه
θ	زاویه‌ی دوران دستگاه مختصات محلی تیر مرکب

اختصارات

ESL	تئوری‌های معادل صفحات تک لایه
LW	تئوری‌های لایه‌ای
KLT	تئوری Kirchhoff-Love
RMT	تئوری Reissner-Mindlin
CLT	تئوری چند لایه کلاسیک
FSDT	تئوری تغییر شکل‌های برشی مرتبه اول
TSDT	تئوری تغییر شکل‌های برشی مرتبه سوم
CLT	تئوری چند لایه کلاسیک
HOT	تئوری‌های مرتبه بالا
LMT	تئوری چند لایه Lekhnitskii
AMT	تئوری چند لایه Ambartsumyan

فصل اول : مقدمه

فصل دوم : پیزوالکتریسیته و معادله‌ی ساختاری ماده پیزوالکتریک برشی

فصل سوم : **مرور ادبیات فنی**

فصل چهارم : مدل اصلاح شده مرتبه بالای پیشنهادی جهت تحلیل استاتیکی تیرهای مرکب چندلایه شامل لایه پیزوالکتریک برشی

فصل پنجم : بحث و بررسی نتایج