بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)

عنوان :

ارتعاشات الکتروترمومکانیکی سیستم کوپله میکرولوله‌های کامپوزیتی پلیمری پیزوالکتریک تقویت‌شده با نانولوله‌های تک‌جداره نیترید بور واقع بر بستر الاستیک تحت جریان سیال

استاد راهنما :

دکتر علی قربان‌پور آرانی

استاد مشاور:

دکتر محمد حیدری رارانی

توسط :

الهام حق‌پرست

شهریور 1392

بسمه تعالی

تاریخ:
شماره:
پیوست:

مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی دانشجو: الهام حق پرست شماره دانشجویی: ۹۰۱۳۵۲۰۰۰۵

رشته : مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی دانشکده : مهندسی مکانیک

عنوان پایان نامه : ارتعاشات الکتروترمومکانیکی سیستم کوپله میکرو لوله های کامپوزیتی پلیمری پیزو الکتریک تقویت شده با نانو لوله های تک جداره نیترید بور واقع بر بستر الاستیک تحت جریان سیال

استاد راهنما: دکتر علی قربان پور

استاد مشاور : دکتر محمد حیدری

تعداد واحد پایان نامه : ۶ واحد **تاریخ دفاع : ۹۴/۶/ ۱۹**

این پایان‌نامه به مدیریت تحصیلات تکمیلی به منظور بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد ارایه می‌گردد. دفاع از پایان نامه در تاریخ ۹۴/۶/۱۹ مورد تایید و ارزیابی هیات داوران قرار گرفت و با نمره ۲۰ و درجه عالی به تصویب رسید.

اعضاء هیات داوران

عنوان	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱. استاد راهنما	دکتر علی قربان پور	استاد	
۲.استاد مشاور	دکتر محمد حیدری	استادیار	
۳.متخصص وصاحب نظر از داخل دانشگاه	دکتر مهدی محمدی مهر	استادیار	
٤.متخصص وصاحب نظر از داخل دانشگاه	دکتر کیوان ترابی	استادیار	
۵. نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دکتر مهدی محمدی مهر	استادیار	

دانشگاه کاشان
دانشکده مهندسی

آدرس: کاشان- بلوار قطب راوندی
کدپستی ۵۱۱۶۷ - ۸۷۳۱۷
تلفن ۵۵۵۹۱۳۰-دورنگار ۵۵۵۹۱۹۳۰
http: www.kashanu.ac.ir

تقدیم به

آنان که ناتوان شدند تا ما توانا بار سیم...

مرهای شان سپید شد تا ما سفید رو سیم...

و عاشقانه سوختند تا گرما بخش وجود ما و تنگر راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوار به ویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد راهنمای گرامی و بزرگوارم جناب آقای دکتر علی قربان‌پور که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان نامه تقبل نموده‌اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم.

از جناب آقای دکتر محمد حیدری به عنوان مشاور که با راهنمایی خود مرا مورد لطف قرار دادند کمال تشکر را دارم.

هم چنین از تشریک مساعی اساتید داور آقایان دکتر محمدی مهر و دکتر ترابی، که این پایان‌نامه را مطالعه نموده‌اند و در جلسه دفاعیه شرکت نمودند تشکر می‌نمایم.

در پایان از خانواده مهربانم که تمام موفقیت‌های زندگی‌ام مرهون زحمات بی دریغ و دلسوزانه آنهاست و با صبرشان بنده را در این مدت همراهی نمودند کمال تشکر را دارم.

.

الهام حق‌پرست

شهریورماه 1392

چکیده

در این تحقیق تحلیل ارتعاشات غیرخطی دومیکرولوله کامپوزیتی پلیمری هوشمند تقویت شده با نانولوله‌های تک‌جداره نیتریدبور، تحت جریان سیال مورد مطالعه قرارمی‌گیرد.میکرولوله‌های کامپوزیتی توسط محیط الاستیک که با مدل ویسکوپاسترناک شبیه‌سازی شده‌است، به یکدیگر کوپله شده‌اند. با استفاده از روش میکرومکانیک، معادلات ساختاری نانوکامپوزیت برای یک المان حجمی نمونه به‌دست آمده و با درنظرگرفتن میدان الکتریکی یک جهته و تنش صفحه‌ای در راستای این میدان، روابط تنش_کرنش که شامل ترم‌های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی می‌باشد، برای میکرولوله‌ها حاصل شده است. جریان سیال عبوری از میکرولوله غیر قابل تراکم، لزج و غیرچرخشی فرض شده و مدل‌سازی دینامیکی سیال با استفاده از معادلات ناویراستوکس انجام گرفته است. با در نظر گرفتن انواع مختلف رژیم‌های جریان سیال شامل پیوسته، لغزشی، انتقالی و مولکولی آزاد مقدار عدد نادسن برای اصلاح سرعت و لزجت سیال انتخاب شده است. میکرولوله‌ها به عنوان پوسته جدارنازک فرض می‌شوند و از تئوری غیرخطی دانل برای تحلیل استفاده شده است. با استفاده از تئوری‌های مختلف مانند گرادیان کرنش، تنش کوپله اصلاح شده و کلاسیک و اعمال روش انرژی و اصل هامیلتون معادلات حاکم به دست آمده و با روش مربعات دیفرانسیلی (DQM) حل شده‌اند. اثر پارامترهای مختلف مانند محیط الاستیک، لزجت، تغییر دما، درصدحجمی و زاویه قرارگیری نانولوله‌های نیتریدبور نسبت به محور میکرولوله‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که تحلیل خطی در سرعت کم سیال و نسبت طول به شعاع بالای میکرولوله‌ها معتبر می‌باشد در حالی که با افزایش سرعت سیال و نسبت طول به شعاع کم برای میکرولوله‌ها، نتایج خطی به هیچ عنوان قابل اتکا نیستند و باید حتماً از نتایج غیرخطی استفاده شود.

کلمات کلیدی: ارتعاشات، سیستم کوپله میکرولوله‌ها، نانوکامپوزیت‌های پلیمری، نانولوله تک جداره نیترید بور، تئوری گرادیان کرنش

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه‌ای بر مکانیک نانو کامپوزیت ها 1

1-1- مواد کامپوزیت 1

2-1- نانوکامپوزیت ها 2

1-2-1- انواع نانوکامپوزیت 4

2-2-1- خواص و کاربردهای نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری 4

3-2-1- انواع تقویت در نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری 7

1-3-2-1- نانوذرات 7

2-3-2-1- نانولایه ها 7

3-3-2-1- نانوالیاف 8

4-3-2-1- نانولوله ها 9

4-2-1-نانوکامپوزیت های زمینه پلیمری هوشمند 10

3-1- پلیمرهای پیزوالکتریک 10

2-3-1- روابط ساختاری در مواد پیزوالکتریک 11

1-2-3-1-میدان های مکانیکی 12

2-2-3-1-میدان های الکترواستاتیک 13

3-2-3-1-کوپل شدگی الکترومکانیکی 14

4-1- تشریح نوآوری تحقیق و کاربرد آن در صنعت 15

5-1-پیشینه تحقیق 17

فصل دوم: مدلسازی ساختاری نانو کامپوزیت های هوشمند 22

1-2- مقدمه 22

2-2- کامپوزیت پیزوالکتریک 22

1-2-2- المان حجمی نمونه (RVE) و هندسه الیاف 24

2-2-2- سطح مقطع الیاف 25

2-3-مدلسازی خواص الکترومگنتوالاستیک کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک- مگنتیگ 26
2-3-1- مدل میکرومکانیک 27
2-3-2- فرضیات 29
2-3-3- تعریف و اعمال شرایط مرزی 29
2-3-4- به دست آوردن فرمولهای فرم بسته برای مدل XPEMFRC 31
2-4- روابط ساختاری پیزوالکتریسیته برای میکرولوله های کامپوزیتی 36
2-4-1- میدان الکترواستاتیک تک جهته 37
2-4-2- میدان تنش صفحه‌ای 38
2-4-2-1-تنش صفحه‌ای عمود بر قطبیت 39
2-4-2-2-تنش صفحه‌ای در راستای قطبیت 39
2-4-3- چرخش فضایی 40

فصل سوم: تحلیل ارتعاشات غیرخطی سیستم کوپله میکرولوله های کامپوزیتی 42

3-1- مقدمه 42
3-2- معادلات ساختاری 43
3-3-تئوری کلاسیک 44
3-3-1-ضرورت استفاده از تئوری مکانیک محیط پیوسته غیرکلاسیک 44
3-4-تئوری تنش کوپله اصلاح شده 46
3-5-تئوری گرادیان کرنش 47
3-6- مدل پوسته‌ی استوانه‌ای 49
3-7- معادلات حرکت 53
3-7-2- انرژی جنبشی 53
3-7-2-1- انرژی جنبشی میکرولوله های کامپوزیتی 53
3-7-2-2- انرژی جنبشی سیال 54
3-7-3- بررسی اثرلزجت سیال 55
3-7-4-اثر لغزش سیال عبوری درون میکرولوله های کامپوزیتی 58
3-7-4-1- مدل کردن شرایط مرزی لغزش 59
3-7-5- کار خارجی 63

3-7-5-1-کار خارجی ناشی از محیط الاستیک 63
3-7-5-2-کار خارجی سیال عبوری بر جداره داخلی میکرولوله ها 63
3-8- اصل کمترین انرژی پتانسیل 64
3-9- به کارگیری اصل هامیلتون 66
3-10- حل معادلات 68
3-10-1- مقدمه‌ای بر روش مربعات دیفرانسیلی (DQM) 68
3-10-2- توابع تست و نحوه اعمال روش مربعات دیفرانسیلی 70
3-10-3- شرط مرزی و نحوه اعمال آن 72
3-10-4- مراحل حل معادلات 73
فصل چهارم: نتایج عددی و بحث 78
4-1- مقدمه 78
4-2- نتایج حاصل از تئوری گرادیان کرنش 79
4-2-1- بررسی ارتعاشات همفاز و غیر همفاز 80
4-2-2- بررسی مودهای مختلف 81
4-2-3- اثر محیط الاستیک 82
4-2-4- اثر تغییر دما 89
4-2-5- اثر تغییر طول 90
4-2-6- اثر لزجت و چگالی سیال 92
4-2-7- اثر سرعت سیال داخل میکرولوله ها 95
4-2-8- اثر لغزش سیال داخل میکرولوله ها 98
4-2-9- اثر درصد حجمی نانولوله های نیتریدبور 100
4-2-10- اثر زاویه قرارگیری نانولوله های نیتریدبور 101
4-2-11-اثر جنس زمینه 103
4-2-12- اثر جنس تقویت کننده 104
4-2-13- ضرایب معادله ساختاری میکرولوله ها 106
4-2-14- پاسخ پیزوالکتریکی سیستم 110
4-3- مقایسه فرکانس خطی و غیر خطی 112
4-4-مقایسه نتایج تئوری‌های گرادیان کرنش، تنش کوپله اصلاح شده و کلاسیک 113

فصل پنجم: مقایسه‌ی نتایج 118

5-1- مقدمه 118

5-2-مقایسه نتایج 118

5-3-نتیجه گیری 136

پیشنهادهایی برای ادامه کار 139

منابع و ماخذ 140

پیوست الف 148

پیوست ب 151

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل 1-1 اعمال بار فشاری و کششی به ماده پیزوالکتریک و تولید ولتاژ در آن 11
شکل 1-2 برشی از یک نمونه نیمه صنعتی از مبدل پوسته و لوله 16
شکل 1-3 لوله‌های درون یک مبدل پوسته و لوله 16
شکل1-4 ملکول آب 20
شکل1-5 سیستم کوپله میکرولوله‌های کامپوزیتی حاوی جریان سیال ویسکوز واقع در میدان الکتریکی 20
شکل2-1 انواع مختلف وصله 24
شکل2-2 المان حجمی نمونه(RVE) با در نظر گرفتن فیبرهای الیافی و الکترودهای مجتمع. 25
شکل2-3 ابعاد مشخصه المان حجمی نمونه ساده شده 26
شکل 2-4 شماتیک سلول واحد PEMFRC 28
شکل 2-5 شماتیک برش‌ها 28
شکل2-6 شماتیک نوار واحدRC 36
شکل2-7 نمایش جهات محورهای مختصات بر روی پوسته استوانه‌ای 37
شکل 2-8 الف) تنش صفحه‌ای عمود بر میدان، ب) تنش صفحه‌ای در راستای میدان 38
شکل 3-1 نمایی از سیستم کوپله میکرولوله‌های کامپوزیتی حاوی جریان سیال ویسکوز واقع در محیط ویسکو پاسترناک 43
شکل3-2 پوسته‌ی استوانه‌ای 50
شکل3-3 نیروها و ممان های وارد بر المانی از پوسته 50
شکل3-4 محور های مختصات در مدل پوسته 51
شکل3-5 جابجایی نقطه‌ی P از سطح میانی و نقطه‌ی Q فرضی از پوسته‌ی استوانه‌ای 52
شکل3-6 مؤلفه‌های سیال عبوری از میکرولوله 54
شکل3-7 سیال لزج تحت تنش برشی 56
شکل 3-8 تغییرات Cr بر حسب عدد نادسن 61
شکل 3-9 تغییرات VCFبر حسب عدد نادسن 62
شکل 3-10 میکرولوله کامپوزیتی حاوی سیال بعد از تغییر شکل 64

شکل3-11 شبکه بندی با فواصل نامساوی 72
جدول 4-1- مشخصات ساختاری PVDF و BNNT 79
شکل 4-1 تصویر شماتیک از ارتعاشات سیستم کوپله میکرولوله‌های کامپوزیتی 80
شکل 4-2 جابجایی عرضی بی‌بعد در طول میکرولوله‌های کامپوزیتی در دو حالت ارتعاشات همفاز و غیرهمفاز 80
شکل4-3 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در سه مود اول ارتعاشی 82
شکل4-4 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال برای مدل‌های مختلف محیط الاستیک 83
شکل4-5 تغییرات فرکانس میرایی نسبت به سرعت سیال برای مدل‌های مختلف محیط الاستیک 83
شکل4-6 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال به‌ازای مقادیر مختلف ثابت وینکلر.84
شکل4-7 تغییرات فرکانس میرایی نسبت به سرعت سیال به‌ازای مقادیر مختلف ثابت وینکلر.84
شکل4-8 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به مقادیر مختلف ثابت وینکلر در سرعت های سیال متفاوت 85
شکل4-9 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال به‌ازای مقادیر مختلف مدول برشی پاسترناک 86
شکل4-10 تغییرات فرکانس میرایی نسبت به سرعت سیال به‌ازای مقادیر مختلف مدول برشی پاسترناک 86
شکل4-11 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به مقادیر مختلف ثابت برشی پاسترناک در سرعت های سیال متفاوت 87
شکل4-12 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال به‌ازای مقادیر مختلف ضریب دمپر محیط ویسکوپاسترناک 88
شکل4-13 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال به‌ازای مقادیر مختلف ضریب دمپر محیط ویسکوپاسترناک 88
شکل4-14 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به مقادیر مختلف ثابت دمپر در سرعت های سیال متفاوت 89
شکل4-15 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت سرعت سیال به‌ازای تغییرات دمایی مختلف 90
شکل4-16 تغییرات فرکانس میرایی نسبت سرعت سیال به‌ازای تغییرات دمایی مختلف 90

شکل4-17 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت سرعت سیال به‌ازای نسبت طول به شعاع مختلف. 91
شکل4-18 تغییرات فرکانس میرایی نسبت سرعت سیال به‌ازای نسبت طول به شعاع مختلف 91
شکل4-19 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال برای دو سیال مختلف 93
شکل4-20 تغییرات فرکانس میرایی نسبت به سرعت سیال برای دو سیال مختلف 94
شکل 4- 21 مقایسه فرکانس طبیعی با در نظر گرفتن لزجت سیال و بدون در نظر گرفتن آن .. 94
شکل 4-22 مقایسه فرکانس میرایی با در نظر گرفتن لزجت سیال و بدون در نظر گرفتن آن .. 95
شکل4-23 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب نسبت طول به شعاع در مقادیر مختلف سرعت سیال 96
شکل4-24 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در مقادیر مختلف نسبت سرعت سیال در میکرولوله‌ها 97
شکل4-25 تغییرات فرکانس میرایی نسبت به سرعت سیال در مقادیر مختلف نسبت سرعت سیال در میکرولوله‌ها 97
شکل4-26 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب نسبت طول به شعاع در مقادیر مختلف نسبت سرعت سیال در میکرولوله‌ها 98
شکل4-27 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در مقادیر مختلف عدد نادسن 99
شکل4-28 تغییرات فرکانس میرایی نسبت به سرعت سیال در مقادیر مختلف عدد نادسن 99
شکل4-29 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب نسبت طول به شعاع در مقادیر مختلف عدد نادسن 100
شکل 4-30 تغییرات فرکانس طبیعی بر حسب سرعت سیال به ازای مقادیر مختلف درصد حجمی BNNT 101
شکل 4-31 تغییرات فرکانس میرایی بر حسب سرعت سیال به ازای مقادیر مختلف درصد حجمی BNNT 101
شکل 4- 32 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال در زوایای مختلف قرارگیری BNNT نسبت به محور میکرولوله‌ها.....102
شکل 4- 33 تغییرات فرکانس میرایی برحسب سرعت سیال در زوایای مختلف قرارگیری BNNT نسبت به محور میکرولوله‌ها.....102
شکل 4- 34 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال برای مواد زمینه مختلف 103
شکل 4- 35 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال برای مواد زمینه مختلف 104

شکل 4- 36 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال برای نانولوله‌های کربنی و نیتریدبور به عنوان تقویت کننده 105
شکل 4- 37 تغییرات فرکانس میرایی برحسب سرعت سیال برای نانولوله‌های کربنی و نیتریدبور به عنوان تقویت کننده 105
شکل 4-38 تغییرات C_{xxxx} نسبت به زاویه نانولوله‌ها و درصد حجمی 106
شکل 4-39 تغییرات $C_{\theta\theta\theta\theta}$ نسبت به زاویه نانولوله‌ها و درصد حجمی 107
شکل 4-40 تغییرات $C_{xx\theta\theta}$ نسبت به زاویه نانولوله‌ها و درصد حجمی 107
شکل 4-41 تغییرات $C_{x\theta x\theta}$ نسبت به زاویه نانولوله‌ها و درصد حجمی 108
شکل 4-42 تغییرات e_{xxx}نسبت به زاویه نانولوله‌ها و درصد حجمی 109
شکل 4- 43 تغییرات $e_{x\theta\theta}$ نسبت به زاویه نانولوله‌ها و درصد حجمی 109
شکل4-44 توزیع پتانسیل الکتریکی نسبت به طول به‌ازای مقادیر مختلف سرعت سیال 110
شکل4-45 توزیع پتانسیل الکتریکی نسبت به طول به‌ازای مقادیر مختلف درصد حجمی نانولوله‌ها 111
شکل4-46 توزیع پتانسیل الکتریکی نسبت به طول به‌ازای مقادیر مختلف زاویه قرارگیری نانولوله‌ها 111
شکل4-47 تغییرات نسبت فرکانس غیر خطی به خطی برحسب دامنه در مقادیر مختلف سرعت بی‌بعد سیال 112
شکل 4- 48 تغییرات فرکانس طبیعی حاصل از تئوری های مختلف برحسب سرعت سیال .114
شکل 4- 49 تغییرات فرکانس میرایی حاصل از تئوری های مختلف برحسب سرعت سیال .114
شکل4-50 تغییرات نسبت فرکانس غیرخطی به خطی در تئوری‌های مختلف برحسب دامنه 115
شکل4-51 تغییرات فرکانس طبیعی حاصل از تئوری‌های مختلف برحسب نسبت جانبی ..116
شکل4-52 توزیع پتانسیل الکتریکی در تئوری‌های مختلف نسبت به طول 117
شکل 5- 1 مقایسه نتایج به‌دست آمده با کار زو و وانگ 119
شکل 5-2 تغییرات فرکانس طبیعی بر حسب سرعت سیال در سه مد اول ارتعاشات 120
شکل 5- 3 اثر محیط الاستیک بر فرکانس طبیعی میکرولوله کامپوزیتی 121
شکل 5-4 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال به ازای مقادیر مختلف درصد حجمی BNNT 121

شکل5-5 توزیع پتانسیل الکتریکی نسبت به طول به‌ازای مقادیر مختلف زاویه قرارگیری نانولوله‌ها 122
شکل 5-6 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال در تئوری‌های تنش کوپله و کلاسیک 122
شکل 5-7 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال در تئوری‌های گرادیان کرنش، تنش کوپله و کلاسیک 123
شکل 5- 8 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال با در نظر گرفتن اثر اندازه.....124
شکل 5- 9 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال در سه مد اول ارتعاشات 124
شکل 5-10 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در دو مود مختلف به ازای مقادیر متفاوت نسبت‌جانبی 125
شکل 5-11 تغییرات فرکانس میرایی نسبت به سرعت سیال در دو مود مختلف به‌ازای مقادیر متفاوت نسبت جانبی 125
شکل 5-12 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در دو مود مختلف به‌ازای مقادیر متفاوت ثابت وینکلر 126
شکل 5-13 تغییرات فرکانس میرایی نسبت به سرعت سیال در دو مود مختلف به‌ازای مقادیر متفاوت ثابت وینکلر 126
شکل 5- 14 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال به ازای مقادیر مختلف ثابت وینکلر 127
شکل 5- 15 تغییرات فرکانس میرایی برحسب سرعت سیال به ازای مقادیر مختلف ثابت وینکلر 127
شکل 5- 16 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال به ازای مقادیر مختلف مدول برشی پاستر ناک 128
شکل 5- 17 تغییرات فرکانس میرایی بر حسب سرعت سیال به ازای مقادیر مختلف مدول برشی پاستر ناک 128
شکل 5- 18 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب سرعت سیال به ازای مقادیر مختلف لزجت سیال 129
شکل 5- 19 تغییرات فرکانس میرایی برحسب سرعت سیال به ازای مقادیر مختلف لزجت سیال 129

شکل 5-20 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در لزجت‌های مختلف 130
شکل 5-21 تغییرات فرکانس میرایی نسبت به سرعت سیال در لزجت‌های مختلف 130
شکل 5-22 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در لزجت‌های مختلف 131
شکل 5-23 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در 3 مود مختلف ارتعاشی 131
شکل 5-24 اثر نسبت طول به شعاع بر فرکانس طبیعی 132
شکل 5-25 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در دماهای مختلف 132
شکل 5-26 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در محیط‌های الاستیک مختلف .133
شکل 5-27 تغییرات پتانسیل الکتریکی در طول میکرولوله به ازای مقادیر مختلف سرعت سیال 133
شکل 5-28 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در دماهای مختلف 134
شکل 5-29 تغییرات فرکانس طبیعی نسبت به سرعت سیال در مقادیر مختلف عدد نادسن ...134
شکل 5-30 تغییرات فرکانس طبیعی برحسب طول به شعاع به‌ازای مقادیر مختلف زاویه نانولوله‌ها 135

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول 1-1 بهبود هدایت حرارتی کامپوزیت های پلیمری نانولوله‌های نیتریدبور 10
جدول2-1 شرایط مرزی برای مدل XPEMFRC 30
جدول 4-1 مشخصات ساختاری PVDF و BNNT 79

فهرست علائم و اختصارات

نانولوله نیترید بور ، تک جداره، دو جداره	BNNT, SWBNNT, DWBNNT
نانولوله کربنی، تک جداره، دو جداره	CNT, SWCNT, DWCNT
کامپوزیت زمینه پلیمری	PMC
کامپوزیت زمینه فلزی	MMC
کامپوزیت زمینه سرامیکی	CMC
المان حجمی نمونه	RVE
کامپوزیت تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک مگنتیک	PMFRC
مدل XY کامپوزیت تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک مگنتیک	XY PMFRC
مدل YX کامپوزیت تقویت شده با الیاف پیزوالکتریک مگنتیک	YX PMFRC
الکترومگنتوترمومکانیک	EMTM
مولفه های تنش در RVE	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$
مولفه های کرنش در RVE	$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$
مولفه های ماتریس ضرایب سختی الاستیک	$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{22}, C_{23}, C_{33}, C_{44}, C_{55}$
مولفه های ماتریس معکوس ضرایب سختی الاستیک	$S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{13}, S_{23}, S_{12}, S_{44}, S_{55}$
مولفه های میدان الکتریکی	E_1, E_2, E_3
مولفه های جابجایی الکتریکی	D_1, D_2, D_3
مولفه های میدان مغناطیسی	H_1, H_2, H_3
مولفه های شار مغناطیسی	B_1, B_2, B_3
مولفه های ماتریس ضرایب پیزوالکتریک	$e_{31}, e_{32}, e_{33}, e_{24}, e_{15}$
مولفه های ماتریس معکوس ضرایب پیزوالکتریک	$d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{24}, d_{15}$
مولفه های ماتریس ضرایب پیزومگنتیک	$q_{31}, q_{32}, q_{33}, q_{24}, q_{15}$
مولفه های ماتریس ضرایب دی الکتریک	$\in_{11}, \in_{22}, \in_{33}$
مولفه های ماتریس ضرایب نفوذ پذیری مغناطیسی	$\mu_{11}, \mu_{22}, \mu_{33}$
مولفه های ماتریس ضرایب مگنتوالکتریک	$\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{33}$
مولفه های بردار انبساط حرارتی	$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$
مولفه های بردار پیروالکتریک	p_1, p_2, p_3

مولفه های بردار پیرومگنتیک	$\beta_1, \beta_2, \beta_3$
مؤلفه‌های تنش در مختصات استوانه‌ای	$\sigma_x, \sigma_\theta, \tau_{x\theta}$
مؤلفه‌های کرنش در مختصات استوانه‌ای	$\varepsilon_x, \varepsilon_\theta, \gamma_{x\theta}$
ضرایب سختی الاستیک در مختصات استوانه‌ای	$C_{xxxx}, C_{xx\theta\theta}, C_{\theta\theta\theta\theta}, C_{x\theta x\theta}$
ضرایب پیزوالکتریک در مختصات استوانه‌ای	$e_{xxx}, e_{x\theta\theta}$
ضریب دی الکتریک در مختصات استوانه‌ای	$\in_x$
ضرایب انبساط حرارتی در مختصات استوانه‌ای	$\lambda_{xx}, \lambda_{\theta\theta}, \lambda_{x\theta}$
ضریب پیروالکتریک در مختصات استوانه‌ای	p_x
تغییر دما	$\Delta\Theta$
ابعاد مربوط به تقویت و زمینه	$X_a,\ X_b$
درصد حجمی نانولوله	ρ
ماتریس انتقال	T
ماتریس انتقال کاهش یافته	$\tilde{T}$
زاویه نانولوله‌ها با محور میکرولوله‌ها	α
ماتریس ترکیب شده پیزوالاستیسیته	Q
پتانسیل الکتریکی	ϕ
مؤلفه‌های جابجایی سطح میانی	U, V, W
مؤلفه های جابجایی	$\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{W}$
مختصات پوسته	x, θ, z
مشخصات هندسی پوسته	R, h, L
زمان	t
مؤلفه‌های کرنش سطح میانی	$\varepsilon_{x,0}, \varepsilon_{\theta,0}, \gamma_{x\theta,0}$
مؤلفه‌های پیچش و انحنا	$k_x, k_\theta, k_{x\theta}$
پارامترهای طول در تئوری گرادیان کرنش	l_0, l_1, l_2
مدول برش	G
انرژی پتانسیل میکرولوله‌ها	U_s
انرژی جنبشی میکرولوله‌ها	K_{tube}
انرژی جنبشی سیال	K_{fluid}
چگالی پوسته	ρ_t