دانشکده فنی

گروه مهندسی مکانیک

(گرایش طراحی کاربردی)

تحلیل رفتار مکانیکی نانو تیرهای هوشمند بر مبنای تئوری‌های غیرکلاسیک مکانیک محیط‌های پیوسته

از

سیده طلیعه پوراشرف

استاد راهنما

دکتر رضا انصاری

شهریور ۱۳۹۳

تقدیم به:

خانواده‌ام، به‌پاس دلگرمی و حمایت‌های بی‌پایان.

با نهایت سپاس از استاد بزرگوار،

آقای دکتر رضا انصاری

که راهنمایی‌های ارزشمند و دلسوزانه ایشان در به‌سرانجام رساندن این پایان نامه راه‌گشای اینجانب بوده است.

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه
چکیده فارسی ..... ژ
چکیده انگلیسی.....س
فصل اول: پیشگفتار ۱
۱-۱ مروری بر تئوری های محیط های پیوسته تعمیم یافته ۴
۱-۱-۱ تئوری الاستیسیته غیر موضعی ۶
۱-۱-۲ تئوریهای تنش سطحی.....۸
۱-۲ نانو ساختارها و نانو سازه های ساخته شده از مواد هوشمند ۱۱
۱-۳ نوآوری ها و اهداف پایان نامه.....۱۳
۱-۴ مطالب مطرح شده در پایان نامه ۱۴
فصل دوم: تئوری ها و معادلات حاکم ۱۵
۲-۱ مروری بر روابط مکانیک جامدات ۱۶
۲-۱-۱ قانون تعمیم یافته هوک.....۱۶
۲-۱-۲ اصل انرژی پتانسیل کل مینیمم ۱۷
۲-۱-۳ اصل همیلتون ۱۸
۲-۲ معادلات ساختاری تئوری های غیرکلاسیک محیطهای پیوسته ۱۸
۲-۲-۱ تئوری الاستیسیته غیرموضعی ارینگن برای مواد الکتریکی- مغناطیسی - مکانیکی ۱۸
۲-۲-۲ تئوری تنش سطحی ۲۰
۲-۳ بررسی اجمالی تئوری های مختلف تیرها.....۲۰
۲-۳-۱ تئوری تیر اویلر-برنولی ۲۱
۲-۳-۲ تئوری تیر تیموشنکو ۲۲
۲-۴ معادلات حاکم بر حرکت و شرایط مرزی ۲۳
۲-۴-۱ تئوری الاستیسیته غیر موضعی برای نانوتیر الکتریکی- مغناطیسی - مکانیکی ۲۳
۲-۴-۱-۱ نانوتیر اویلر-برنولی ۲۳
۲-۴-۱-۲ نانوتیر تیموشنکو.....۲۷
۲-۴-۲ تئوری الاستیسیته تنش سطحی.....۳۱
۲-۴-۲-۱ خصوصیات مکانیکی مواد هدفمند ۳۲

۲-۴-۲-۲ نانوتیر اویلر-برنولی ۳۳
۲-۴-۲-۳ نانوتیر تیموشنکو ۳۷
۲-۴-۲-۴ توزیع دما ۴۰
فصل سوم: روش های حل ۴۱
۳-۱ تحلیل های خطی ۴۲
۳-۱-۱ نانوتیر اویلر-برنولی ۴۲
۳-۱-۱-۱ خمش ۴۲
۳-۱-۱-۲ کمانش و ارتعاشات آزاد خطی ۴۳
۳-۱-۱-۳ پایداری دینامیکی ۴۴
۳-۱-۲ نانوتیر تیموشنکو ۴۵
۳-۱-۲-۱ خمش ۴۶
۳-۱-۲-۲ کمانش و ارتعاشات آزاد خطی ۴۷
۳-۱-۲-۳ پایداری دینامیکی ۴۷
۳-۲ تحلیل های غیرخطی ۴۸
۳-۲-۱ نانوتیر اویلر-برنولی ۴۸
۳-۲-۱-۱ ارتعاشات آزاد ۴۸
۳-۲-۱-۲ ارتعاشات واداشته ۵۱
۳-۲-۱-۲-۱ تشدید اولیه ۵۱
۳-۲-۱-۲-۲ تشدیدهای ثانویه ۵۳
۳-۲-۱-۲-۲-۱ تشدید فرا هارمونیک ۵۳
۳-۲-۱-۲-۲-۲ تشدید زیرهارمونیک ۵۴
۳-۲-۱-۳ پسک مانش ۵۵
۳-۲-۱-۴ ارتعاشات آزاد تحت پس کمانش ۵۷
۳-۲-۱-۴-۱ تیر با تکیه گاه دوسر گیردار ۶۰
۳-۲-۱-۴-۲ تیر با تکیه گاه یکسر گیردار-یکسر مفصل ۶۱
۳-۲-۱-۴-۳ تیر با تکیه گاه دوسر مفصل ۶۲
۳-۲-۲ نانوتیر تیموشنکو ۶۴
۳-۲-۲-۱ ارتعاشات آزاد ۶۵
۳-۲-۲-۲ ارتعاشات واداشته ۶۸
۳-۲-۲-۳ پس کمانش ۷۰
فصل چهارم: بحث و نتیجه گیری ۷۲

۴-۱ مقدمه ۷۳
۴-۲ اعتبار سنجی نتایج ۷۴
۴-۳ مدلهای غیر کلاسیک بر مبنای تیر اویلر- برنولی ۷۵
۴-۳-۱ نانو تیر الکتریکی- مغناطیسی - مکانیکی بر مبنای تئوری الاستیسیته غیر موضعی ۷۵
۴-۳-۱-۱ ارتعاشات آزاد ۷۵
۴-۳-۱-۲ ارتعاشات واداشته ۸۱
۴-۳-۱-۳ کمانش و پس کمانش ۹۰
۴-۳-۱-۴ ارتعاشات تحت پس کمانش ۹۶
۴-۳-۲ نانو تیر ساخته شده از مواد FG بر مبنای تئوری تنش سطحی ۱۰۰
۴-۳-۲-۱ ارتعاشات آزاد ۱۰۰
۴-۳-۲-۲ ارتعاشات واداشته ۱۰۴
۴-۳-۲-۳ کمانش و پس کمانش ۱۰۸
۴-۳-۲-۴ ارتعاشات تحت پس کمانش ۱۱۳
۴-۴ مدلهای غیر کلاسیک بر مبنای تیر تیموشنکو ۱۱۶
۴-۴-۱ نانو تیر الکتریکی- مغناطیسی - مکانیکی بر مبنای تئوری الاستیسیته غیر موضعی ۱۱۶
۴-۴-۱-۱ خمش، کمانش،ارتعاشات خطی و پایداری دینامیکی ۱۱۶
۴-۴-۱-۲ ارتعاشات آزاد و واداشته ۱۲۲
۴-۴-۲ نانو تیر ساخته شده از مواد FG بر مبنای تئوری تنش سطحی ۱۲۸
۴-۴-۲-۱ خمش و پایداری دینامیکی ۱۲۸
۴-۴-۲-۲ ارتعاشات آزاد و واداشته ۱۳۱
۴-۴-۲-۳ کمانش و پس کمانش ۱۳۷
فصل پنجم: جمع بندی و پیشنهادات ۱۴۳
۵-۱ مقدمه ۱۴۴
۵-۲ جمع بندی ۱۴۴
۵-۳ پیشنهادات ۱۴۵
مراجع ۱۴۶

فهرست جداول

عنوان.....صفحه

فصل سوم: روش‌های حل

جدول ۳-۱. تابع شکل مد برای تیر با شرایط انتهایی متفاوت ۴۴

جدول ۳-۲. سه بار بحرانی اول کمانش برای تیر اویلر-برنولی ۵۷

فصل چهارم: بحث و نتایج

جدول ۴-۱. خصوصیات مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی $BaTiO_3 - CoFe_2O_4$ ۷۳

جدول ۴-۲. خصوصیات مکانیکی آلومینیوم و سیلیکون ۷۳

جدول ۴-۳. مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر با مرجع [43] ۷۵

فهرست اشکال

عنوان.....صفحه

فصل دوم: تئوری‌ها و معادلات حاکم

شکل ۲-۱ نمایی از نانوتیر ساخته‌شده از مواد هدفمند و مشخصات هندسی آن.....۸
شکل ۲-۲ تغییرات ضریب انبساط حرارتی با شاخص قانون توانی.....۸
شکل ۲-۳ تغییرات مدول الاستیسیته با شاخص قانون توانی.....۸
شکل ۲-۴ تغییرات ضریب پواسون با شاخص قانون توانی.....۸
شکل ۲-۵ تغییرات چگالی با شاخص قانون توانی.....۸

فصل سوم: روش‌های حل

شکل ۳-۱. ناحیه وجود تحریک زیرهارمونیک.....۱۸

فصل چهارم: بحث ونتیجه‌گیری

شکل ۴- ۱ مقایسه نتایج تحقیق حاضر با مرجع[46].....۷۴
شکل ۴- ۲ تغییرات فرکانس بی بعد با تغییر ضریب غیرموضعی.....۷۶
شکل ۴- ۳ تغییرات نسبت فرکانسی با تغییر ضریب غیرموضعی.....۷۶
شکل ۴- ۴ تغییرات نسبت فرکانسی با تغییر اختلاف دما.....۷۸
شکل ۴- ۵ تغییرات نسبت فرکانسی با تغییر ولتاژ.....۷۸
شکل ۴- ۶ تغییرات فرکانس بی بعد با تغییر ولتاژ برای ضرایب غیرموضعی متفاوت.....۷۹
شکل ۴- ۷ تغییرات فرکانس بی بعد با تغییر پتانسیل مغناطیسی برای ضرایب غیرموضعی متفاوت.....۷۹
شکل ۴- ۸ تغییرات فرکانس بی بعد با تغییر اختلاف دما برای ضرایب غیرموضعی متفاوت.....۸۰
شکل ۴- ۹ تغییرات نسبت فرکانسی با تغییر $wmax$ برای پتانسیلهای مغناطیسی متفاوت.....۸۱
شکل ۴- ۱۰ پاسخ فرکانسی سیستم برای ضرایب غیرموضعی متفاوت در تشدید اولیه.....۸۲
شکل ۴- ۱۱ تغییرات بیشینه دامنه ارتعاشات بدون بعد نسبت به دامنه بدون بعد نیروی تحریک برای ضرایب موضعی متفاوت در تشدید اولیه.....۸۲
شکل ۴- ۱۲ پاسخ فرکانسی سیستم برای ضرایب غیرموضعی متفاوت در تشدید فراهارمونیک.....۸۳
شکل ۴- ۱۳ تغییرات بیشینه دامنه ارتعاشات بدون بعد نسبت به دامنه بدون بعد نیروی تحریک برای ضرایب موضعی متفاوت در تشدید فراهارمونیک.....۸۳
شکل ۴- ۱۴ پاسخ فرکانسی سیستم برای ضرایب غیرموضعی متفاوت در تشدید زیرهارمونیک.....۸۵
شکل ۴- ۱۵ تغییرات بیشینه دامنه ارتعاشات بدون بعد نسبت به دامنه بدون بعد نیروی تحریک برای ضرایب موضعی متفاوت در تشدید زیرهارمونیک.....۸۵
شکل ۴- ۱۶ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر متفاوت ولتاژ در تشدید اولیه.....۸۶
شکل ۴- ۱۷ پاسخ فرکانسی سیستم برای برای مقادیر متفاوت ولتاژ در تشدید فراهارمونیک.....۸۶
شکل ۴- ۱۸ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر متفاوت ولتاژ در تشدید زیرهارمونیک.....۸۷
شکل ۴- ۱۹ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر متفاوت پتانسیل مغناطیسی در تحریک اولیه.....۸۸
شکل ۴- ۲۰ پاسخ فرکانسی سیستم برای برای مقادیر متفاوت پتانسیل مغناطیسی در تشدید فراهارمونیک.....۸۸

شکل ۴- ۲۱ پاسخ فرکانسی سیستم برای برای مقادیر متفاوت پتانسیل مغناطیسی در تشدید زیرهارمونیک.....۸۹
شکل ۴- ۲۲ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر متفاوت اختلاف دما در تحریک اولیه ۸۹
شکل ۴- ۲۳ تغییرات نیروی کمانش بحرانی با تغییر ضریب غیرموضعی برای ۳ مد اول کمانش.....۹۰
شکل ۴- ۲۴ تغییرات نیروی کمانش بحرانی با تغییر ولتاژ برای ضرایب غیرموضعی متفاوت.....۹۱
شکل ۴- ۲۵ تغییرات نیروی کمانش بحرانی با تغییر پتانسیل مغناطیسی برای ضرایب غیرموضعی متفاوت.....۹۱
شکل ۴- ۲۶ تغییرات نیروی کمانش بحرانی با تغییراختلاف دما برای ضرایب غیرموضعی متفاوت.....۹۲
شکل ۴- ۲۷ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای ضرایب غیر موضعی متفاوت در مد اول کمانش ۹۳
شکل ۴- ۲۸ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای ضرایب غیر موضعی متفاوت در مد دوم کمانش ۹۳
شکل ۴- ۲۹ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای ضرایب غیر موضعی متفاوت در مد سوم کمانش ۹۴
شکل ۴- ۳۰ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر ولتاژ متفاوت ۹۵
شکل ۴- ۳۱ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر پتانسیل مغناطیسی متفاوت ۹۵
شکل ۴- ۳۲ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر اختلاف دمای متفاوت در مد اول کمانش.....۹۶
شکل ۴- ۳۳ پاسخ ارتعاشی تحت پسکمانش برای ضرایب غیر موضعی متفاوت در مد اول کمانش ۹۷
شکل ۴- ۳۴ پاسخ ارتعاشی تحت پسکمانش برای ضرایب غیر موضعی متفاوت در مد دوم کمانش.....۹۷
شکل ۴- ۳۵ پاسخ ارتعاشی تحت پسکمانش برای ضرایب غیر موضعی متفاوت در مد سوم کمانش.....۹۸
شکل ۴- ۳۶ پاسخ ارتعاشی تحت پسکمانش برای مقادیر ولتاژ متفاوت در۳ مد اول کمانش.....۹۸
شکل ۴- ۳۷ پاسخ ارتعاشی تحت پسکمانش برای مقادیر پتانسیل مغناطیسی متفاوت در۳ مد اول کمانش ۹۹
شکل ۴- ۳۸ پاسخ ارتعاشی تحت پسکمانش برای مقادیر اختلاف دمای متفاوت در مد اول کمانش.....۹۹
شکل ۴- ۳۹ تغییرات نسبت فرکانسی با تغییر شاخص قانون توانی.....۱۰۱
شکل ۴- ۴۰ تغییرات نسبت فرکانسی با تغییر ضخامت ۱۰۱
شکل ۴- ۴۱ تغییرات فرکانس بی بعد با تغییر ضخامت برای مقادیر متفاوت $wmax$.....۱۰۲
شکل ۴- ۴۲ تغییرات فرکانس بی بعد با تغییر ضخامت برای مقادیر متفاوت شاخص قانون توانی ۱۰۲
شکل ۴- ۴۳ تغییرات فرکانس بی بعد با تغییر طول تیر برای مقادیر متفاوت $wmax$ ۱۰۳
شکل ۴- ۴۴ تغییرات فرکانس بی بعد با تغییر طول تیر برای مقادیر متفاوت شاخص قانون توانی.....۱۰۳
شکل ۴- ۴۵ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی در تشدید اولیه.....۱۰۵
شکل ۴- ۴۶ تغییرات بیشینه دامنه ارتعاشات بدون بعد نسبت به دامنه بدون بعد نیروی تحریک برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی در تشدید اولیه ۱۰۵
شکل ۴- ۴۷ پاسخ فرکانسی سیستم برای ضخامتهای مختلف در تشدید اولیه ۱۰۶
شکل ۴- ۴۸ تغییرات بیشینه دامنه ارتعاشات بدون بعد نسبت به دامنه بدون بعد نیروی تحریک برای ضخامتهای مختلف در تشدید اولیه ۱۰۷
شکل ۴- ۴۹ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر مختلف دامنه بی بعد نیروی تحریک در تشدید اولیه.....۱۰۷
شکل ۴- ۵۰ تغییرات بیشینه دامنه ارتعاشات بدون بعد نسبت به دامنه بدون بعد نیروی تحریک برای مقادیر متفاوت پارامتر انحراف از تشدید در تشدید اولیه.....۱۰۸
شکل ۴- ۵۱ تغییرات نیروی کمانش بحرانی با ضخامت تیر برای مقادیر مختلف شاخص قانون توان.....۱۰۹
شکل ۴- ۵۲ تغییرات نیروی کمانش بحرانی با شاخص قانون توانی برای ۳ مد اول کمانش ۱۰۹
شکل ۴- ۵۳ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی در مد اول کمانش ۱۱۰
شکل ۴- ۵۴ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی در مد سوم کمانش ۱۱۰

شکل ۴- ۵۵ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی در مد سوم کمانش ۱۱۱
شکل ۴- ۵۶ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف ضخامت تیر در مد اول کمانش ۱۱۲
شکل ۴- ۵۷ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف ضخامت تیر در مد دوم کمانش..... ۱۱۲
شکل ۴- ۵۸ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف ضخامت تیر در مد سوم کمانش..... ۱۱۳
شکل ۴- ۵۹ پاسخ ارتعاشی تحت پسکمانش برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی در مد اول کمانش..... ۱۱۴
شکل ۴- ۶۰ پاسخ ارتعاشی تحت پسکمانش برای مقادیر مختلف ضخامت تیر در مد اول کمانش ۱۱۵
شکل ۴- ۶۱ پاسخ ارتعاشی تحت پسکمانش برای مقادیر مختلف اختلاف دما در مد اول کمانش..... ۱۱۵
شکل ۴- ۶۲ انحنای خمش تیر برای ولتاژ و پتانسیل مغناطیسی متفاوت- نانوتیر تیموشنکو..... ۱۱۷
شکل ۴- ۶۳ تغییرات انحنای خمش غیرکلاسیک به کلاسیک با تغییر ولتاژ و پتانسیل مغناطیسی برای مقادیر متفاوت ضریب غیر کلاسیک-نانوتیر تیموشنکو ۱۱۷
شکل ۴- ۶۴ تغییرات بار بحرانی کمانش غیرکلاسیک به کلاسیک با ولتاژ و پتانسیل مغناطیسی برای مقادیر متفاوت ضریب غیرموضعی- نانوتیر تیموشنکو ۱۱۸
شکل ۴- ۶۵ تغییر فرکانس خطی تیر با پتانسیل مغناطیسی برای مقادیر متفاوت ضریب غیرموضعی- نانوتیر تیموشنکو ... ۱۱۸
شکل ۴- ۶۶ تغییر فرکانس خطی تیر با ولتاژ برای مقادیر متفاوت ضریب غیرموضعی- نانوتیر تیموشنکو ۱۱۹
شکل ۴- ۶۷ تغییر فرکانس خطی تیر با اختلاف دما برای مقادیر متفاوت ضریب غیرموضعی- نانوتیر تیموشنکو ۱۱۹
شکل ۴- ۶۸ اثر ولتاژ و پتانسیل مغناطیسی بر محدوده ناپایداری- نانوتیر تیموشنکو..... ۱۲۰
شکل ۴- ۶۹ اثر فاکتور بار استاتیکی بر محدوده ناپایداری- نانوتیر تیموشنکو..... ۱۲۱
شکل ۴- ۷۰ اثر اختلاف دما بر محدوده ناپایداری- نانوتیر تیموشنکو ۱۲۱
شکل ۴- ۷۱ تغییرات نسبت فرکانسی با $wmax$ برای مقادیر متفاوت ضریب غیرموضعی - نانوتیر تیموشنکو ۱۲۳
شکل ۴- ۷۲ تغییرات فرکانس بیبعد با ضریب غیرموضعی برای مقادیر متفاوت $wmax$ -نانوتیر تیموشنکو ۱۲۳
شکل ۴- ۷۳ تغییرات نسبت فرکانسی با $wmax$ برای مقادیر متفاوت اختلاف دما - نانوتیر تیموشنکو ۱۲۴
شکل ۴- ۷۴ تغییرات نسبت فرکانسی با $wmax$ برای مقادیر متفاوت L/r نانوتیر تیموشنکو ۱۲۴
شکل ۴- ۷۵ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر متفاوت ضریب غیرموضعی- نانوتیر تیموشنکو ۱۲۵
شکل ۴- ۷۶ تغییرات بیشینه دامنه ارتعاشات بدون بعد نسبت به دامنه بدون بعد نیروی تحریک برای مقادیر متفاوت ضریب غیرموضعی - نانوتیر تیموشنکو ۱۲۵
شکل ۴- ۷۷ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر متفاوت ولتاژ- نانوتیر تیموشنکو..... ۱۲۶
شکل ۴- ۷۸ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر متفاوت پتانسیل مغناطیسی- نانوتیر تیموشنکو..... ۱۲۷
شکل ۴- ۷۹ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر متفاوت اختلاف دما- نانوتیر تیموشنکو ۱۲۷
شکل ۴- ۸۰ تغییرات انحنای خمش غیرکلاسیک به کلاسیک برای مقادیر متفاوت شاخص قانون توانی ۱۲۸
شکل ۴- ۸۱ تغییرات زاویه دوران سطح مقطع غیرکلاسیک به کلاسیک برای مقادیر متفاوت ضریب قانون توانی..... ۱۲۸
شکل ۴- ۸۲ انحنای خمش تیر برای ضخامتهای متفاوت ۱۲۹
شکل ۴- ۸۳ اثر اختلاف دما بر محدوده ناپایداری..... ۱۲۹
شکل ۴- ۸۴ اثر فاکتور بار استاتیکی بر محدوده ناپایداری ۱۳۰
شکل ۴- ۸۵ اثر ضخامت نانوتیر بر محدوده ناپایداری ۱۳۰
شکل ۴- ۸۶ اثر شاخص قانون توانی بر محدوده ناپایداری ۱۳۰
شکل ۴- ۸۷ تغییرات نسبت فرکانسی با $wmax$ برای مقادیر متفاوت شاخص قانون توانی- نانوتیر تیموشنکو..... ۱۳۲
شکل ۴- ۸۸ تغییرات فرکانس بیبعد با ضخامت تیر برای مقادیر متفاوت $wmax$- نانوتیر تیموشنکو..... ۱۳۲
شکل ۴- ۸۹ تغییرات فرکانس بیبعد با طول تیر برای مقادیر متفاوت $wmax$- نانوتیر تیموشنکو ۱۳۲

شکل ۴- ۹۰ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی در تشدید اولیه- نانوتیر تیموشنکو ۱۳۳
شکل ۴- ۹۱ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر مختلف ضخامت نانوتیر در تشدید اولیه- نانوتیر تیموشنکو ۱۳۳
شکل ۴- ۹۲ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر مختلف تنش پسماند سطح در تشدید اولیه- نانوتیر تیموشنکو.....۱۳۴
شکل ۴- ۹۳ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر مختلف Lh در تشدید اولیه- نانوتیر تیموشنکو ۱۳۴
شکل ۴- ۹۴ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر مختلف اختلاف دما در تشدید اولیه- نانوتیر تیموشنکو.....۱۳۵
شکل ۴- ۹۵ پاسخ فرکانسی سیستم برای مقادیر مختلف دامنه بیبعد نیروی تحریک در تشدید اولیه- نانوتیر تیموشنکو..۱۳۶
شکل ۴- ۹۶ تغییرات بیشینه دامنه ارتعاشات بدون بعد نسبت به دامنه بدون بعد نیروی تحریک برای مقادیر متفاوت پارامتر انحراف از تشدید در تشدید اولیه- نانوتیر تیموشنکو ۱۳۶
شکل ۴- ۹۷ تغییرات نیروی کمانش بحرانی با شاخص فانون توانی برای ۳ مد اول کمانش- نانوتیر تیموشنکو.....۱۳۷
شکل ۴- ۹۸ تغییرات نیروی کمانش بحرانی با ضخامت تیر برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی- نانوتیر تیموشنکو ...۱۳۸
شکل ۴- ۹۹ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی در مد اول کمانش- نانوتیر تیموشنکو ۱۳۸
شکل ۴- ۱۰۰ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر شاخص ضریب قانون توانی در مد دوم کمانش- نانوتیر تیموشنکو ۱۳۹
شکل ۴- ۱۰۱ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف شاخص قانون توانی در مد سوم کمانش- نانوتیر تیموشنکو ۱۳۹
شکل ۴- ۱۰۲ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف ضخامت تیر در مد اول کمانش- نانوتیر تیموشنکو.....۱۴۰
شکل ۴- ۱۰۳ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف ضخامت تیر در مد دوم کمانش- نانوتیر تیموشنکو.....۱۴۱
شکل ۴- ۱۰۴ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف ضخامت تیر در مد سوم کمانش- نانوتیر تیموشنکو.....۱۴۱
شکل ۴- ۱۰۵ تغییرات انحنای کمانش با تغییرات نیروی محوری برای مقادیر مختلف اختلاف دما در مد اول کمانش- نانوتیر تیموشنکو.....۱۴۲

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی	تعریف
A	مساحت
B	ضریب میرایی بدون بعد
B_i	القای مغناطیسی
c_{ijkl}	ثابت الاستیک
d_{in}	ثابت الکترومغناطیسی
D_0, D_1, D_2	مشتقات نسبت به مقیاس‌های زمانی
D_i	جابجایی الکتریکی
e_{kij}	ثابت پیزوالکتریک
$e_0 a$	ضریب غیرموضعی
E_i	میدان الکتریکی
E	مدول الاستیسیته
E^s	مدول الاستیسیته سطح
F	دامنه نیروی تحریک
H_i	میدان مغناطیسی
k	شاخص قانون توانی
K	ضریب هدایت حرارتی
M	برآیند گشتاور
M^s	برآیند گشتاور سطح
M_T	برآیند گشتاور حرارتی
N	برآیند نیرو
N^s	برآیند نیروی سطح
N_T	برآیند نیروی حرارتی
p_i	ثابت پایرو الکتریک
Q	برآیند نیروی برشی
Q^s	برآیند نیروی برشی سطح
T_0, T_1, T_2	مقیاس‌های زمانی
V_f	تابع کسر حجمی
W^{ext}	کار نیروهای خارجی وارد بر تیر

علائم یونانی	تعریف
α	ضریب انبساط حرارتی
β_{ij}	مدول حرارتی

ΔT	اختلاف دما
ϵ	پارامتر بدون بعد اغتشاش
ε_{ij}	کرنش
$\in_{ik}$	ثابت دی‌الکتریک
θ	فرکانس نیروی تحریک محوری
λ_i	ثابت پایرو مغناطیس
λ^s و μ^s	ثوابت لامه سطح
μ	ضریب غیر موضعی بی‌بعد
μ_{in}	ثابت مغناطیسی
ν	ضریب پواسون
Π_T	انرژی جنبشی تیر
Π_s	انرژی کرنشی تیر
ρ	چگالی
ρ^s	چگالی سطح
σ_{ij}	تنش
$\sigma^s_{\alpha\beta}$	تنش سطحی
τ^s	تنش پسماند سطح
$\varphi(\hat{x})$	تابع شکل مد
Φ	تابع پتانسیل الکتریکی
Ψ	تابع پتانسیل مغناطیسی
ω_0	فرکانس طبیعی خطی تیر
$\tilde{\Omega}$	فرکانس نیروی تحریک

زیروندها	**تعریف**
c	مربوط به سرامیک
m	مربوط به فلز
L	مربوط به حالت خطی
NL	مربوط به حالت غیرخطی

چکیده

تحلیل رفتار مکانیکی نانو تیرهای هوشمند بر مبنای تئوری‌های غیرکلاسیک مکانیک محیط‌های پیوسته

سیده طلیعه پوراشرف

در این پژوهش به تحلیل رفتار مکانیکی نانوتیرهای ساخته‌شده از مواد هوشمند با استفاده تئوری‌های غیرکلاسیک محیط‌های پیوسته پرداخته می‌شود. مواد هوشمند مواد طراحی‌شده‌ای هستند که یک یا چند خصوصیت آن‌ها را می‌توان به‌طرز قابل توجهی به‌صورت کنترل‌شده با محرک‌های خارجی مانند تنش، دما، رطوبت و یا میدان‌های مغناطیس و الکتریکی تغییر داد. معادلات حاکم بر حرکت غیرخطی و شرایط مرزی متناظر با آن‌ها از اصل همیلتون بر مبنای تئوری‌های تیر اویلر-برنولی و تیموشنکو استخراج می‌شوند. با استفاده از تئوری‌های الاستیسیته گورتین-موردا‌ک و ارینگن، به‌ترتیب اثرات تنش سطحی و غیرموضعی در معادلات وارد می‌شوند. به‌منظور حل معادلات نیز روش‌های حل تحلیلی مانند روش‌های حل بسته و روش اغتشاشات مقیاس‌های چندگانه ارائه‌شده و رفتارهایی مانند خمش، کمانش، پس‌کمانش و ارتعاشات تحت آن، ارتعاشات آزاد و خطی و نیز ارتعاشات واداشته بررسی شده‌اند. در قسمت نتایج نیز اثرات پارامترهای مختلف بر رفتار تیرها به‌طور کامل بررسی شده و هم‌چنین نتایج حاصل از هریک از تئوری‌های یادشده با نتایج تئوری کلاسیک مقایسه شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده عدم توانایی تئوری‌کلاسیک در پیش‌بینی دقیق رفتار مواد است و هرچه ضخامت تیر کمتر باشد، اختلاف مشاهده‌شده بین نتایج حاصل از تئوری‌های کلاسیک و غیرکلاسیک بیشتر خواهد بود. همین‌طور نشان داده می‌شود که با کاهش ضخامت، اثر تنش سطحی سبب تعدیل ویژگی غیرخطی سخت شوندگی نانوتیر می‌گردد و این تأثیر در ضخامت‌های پایین بسیار مشهود است. همچنین، می‌توان دریافت که با افزایش پارامتر غیرموضعی، رفتار غیرخطی سخت شوندگی نانوتیر تشدید می‌شود.

کلیدواژه: نانوتیر، مواد هوشمند، حل تحلیلی، رفتار مکانیکی

Abstract

Mechanical behavior of smart nano-beams based on non-classical continuum mechanics

S. Talieh Pourashraf

In this research, using non-classical continuum theories, mechanical behaviors of nanobeams made of smart materials are investigated. Smart materials are designed materials with one or more properties which change significantly in a controlled fashion by external stimuli such as stress, temperature, moisture, electric or magnetic fields. The geometrically nonlinear equations of motion and corresponding boundary conditions are derived using Hamilton's principle on the basis of the Euler-Bernoulli and Timoshenko beam theories. Using the Gurtin-Murdoch and Eringen elasticity theories, the surface stress and nonlocal effects are taken into account in obtained equations, respectively. In order to solve differential equations, analytical solutions including closed form solution and multiple scales perturbation technique are presented. Mechanical behaviors such as bending, buckling, postbuckling and vibration under postbuckling domain, linear and nonlinear free vibration and Forced vibration of nanobeams are considered. In the result section, the influences of different parameters are investigated. Also, comparisons are made between the results obtained from the classical and non-classical theories. It is shown that the classical theory doesn't predict materials behavior precisely and as the thickness decrease, the difference between results observed from classical theory with those obtained from non-classical ones increases. It is also shown that as the thickness of nanobeam decreases, the surface stress effect moderates the hardening-type nonlinear behavior of nanobeams. This effect is more prominent at low magnitudes of thickness. Moreover, one can find that by increasing the nonlocal parameter, the hardening-type response of nanobeams is intensified.

Key words: Nano-beams, Smart Materials, Analytical Solution, Mechanical Behavior

فصل اول:

پیش‌گفتار

زندگی بشر در حال پیشروی به سمت کوچک شدن ابعاد است. فناوری نانو با سرعتی باور نکردنی در حال پیشرفت می باشد. استفاده از باطری‌های کوچک در ابعاد قطر موی انسان، ساخت پردازنده با ترانزیستورهای نانو متری و هزاران نمونه دیگر که همگی ابزاری برای بهره‌وری هرچه بیشتر هستند. ایده‌ها و تحولات انقلابی در این زمینه از سال ۱۹۵۹ میلادی با سخنرانی[1] ریچارد فیمن آغاز شد و این سوال را در اذهان جستجوگر بوجود آورد که خواص ماده‌ای با ابعاد کوچک چگونه می-توانند بر خواص کلاسیک در ابعاد معمولی غلبه کنند. اما موج جدید این انقلاب در دو دهه پیش شکل گرفت. زمانی که ایجیما[2] [1] در یک شرکت ژاپنی موفق به کشف نانولوله های کربنی با ابعادی نانو متری (برابر با 10^{-9} متر) و خواص مکانیکی باور نکردنی شد. این فناوری تا امروز با سرعت در حال پیشروی و گسترش در تمامی گرایشات علمی است. امروزه هدف از کاربرد این فناوری ساخت و دخل و تصرف در چگونگی آرایش اتم‌ها یا مولکول‌ها با استفاده از مواد، وسایل و سیستم‌هایی با توانایی‌های جدید و با تغییر این ساختارها و رسیدن به بازدهی بیشتر مواد می‌باشد. نانو روکش‌ها، نانو پودرها، نانو کامپوزیت‌ها، نانو سیم‌ها، نانو حسگرها، نانو ترانزیستورها، نانو لیپیدها و نانو سیالات نمونه‌هایی از این دخل و تصرف‌ها و مهندسی ملوکول‌ها می‌باشند. فناوری نانو تاکنون انقلابی ژرف در همه حوزه های علوم و مهندسی ایجاد کرده است و به اعتقاد دانشمندان، می تواند از دیدگاه بهره‌وری انرژی و حفظ منابع، بهبودی شگرف در تمام فناوری های ساختی و زیرساختی ایجاد نماید. برای پی بردن به این مهم تنها کافی است در ذهن خود نیروگاهی را تجسم نمایید که از میلیون‌ها و یا شاید میلیاردها مولد انرژی در ابعاد نانو تشکیل شده‌است که به راحتی در جیب شما جای می‌گیرد. بنابراین آن ایده که در شش دهه پیش شکل گرفت، امروزه در جهت آسایش و رفاه بشر و همچنین حفظ منابع طبیعی در حال حرکت رو به جلو است. بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا با برنامه‌ریزی‌های بلند مدت و همچنین سرمایه‌گذاری در راستای گسترش علوم نانو اقدام کرده‌اند. افقی که فناوری نانو برای آینده تکنولوژی ترسیم کرده، باعث جذب و سرمایه گذاری بسیاری از کشور ها در این حوزه شده است. در ایران نیز همگام با پیشرفت‌های جهانی در این عرصه فعالیت‌هایی صورت گرفته است و کشور ما با قدم نهادن در این راه، هم اکنون هم تراز با کشورهایی همچون آلمان و ژاپن، جایگاه ممتاز هفتم جهان را به خود اختصاص داده است.

از علوم مرتبط با فناوری نانو، نانو مکانیک است که ابزاری برای توسعه تمام شاخه های مرتبط با این فناوری می‌باشد. علومی همچون اپتیک، بایو و الکترونیک برای قرار گرفتن در مسیر نانو فناوری نیازمند ابزار نانومکانیک برای درک هرچه بهتر رفتار مکانیکی نانو سازه‌ها، می‌باشند.

[1] "There's Plenty of Room at the Bottom"
[2] Iijima

نانو مکانیک که بخشی پرکاربرد و مهم در نانو فناوری می باشد، عموماً بـه دو شـاخه نـانو مکانیـک محاسـباتی و نـانو مکانیـک تحلیلی دسته‌بندی کرد. رفتار مکانیکی نانو سازه‌ها و نانو ساختارها را می‌توان به طرق مختلفی عنوان کرد. یا از طریق دقت بـه رفتار ملوکول‌ها و اتم‌ها و بیان روابط فیزیکی بین آنها که در بخش مکانیک کوانتومی مطرح می‌شوند و یا با اسـتفاده از قـوانین مکانیک کلاسیک با اندکی تغییر در آن تا که مناسب ابعاد کوچک در حد نانو و یا میکرو شوند. بنابراین مدل ریاضـی حـاکم بـر رفتار مکانیکی مجموعه‌ای از اتم‌ها و ملوکول‌ها یا از طریق مکانیک کوانتوم به کمک انرژی های بین اتمی بیان مـی‌شـود، یـا از تئوری های مکانیک محیط پیوسته، بصورت معادلات دیفرانسیل جزئی.

ادغام تئوری‌هایی همچون مکانیک کوانتوم و مولکولی در فناوری نانو و نانو مکانیک، باعث گرایش محققان بـه عرصـه مکانیـک محاسباتی بیش از پیش گردید. در سالیان گذشته، پیشرفت نانو مکانیک محاسـباتی مـدیون توسـعه فنـاوری مـرتبط بـا علـوم کامپیوتر و الکترونیک و ساخت کامپیوتر های با قدرت پردازشی بالاتر است. با این حال تا به امـروز، محـدودیت هـای ابزارهـای پردازشی به عنوان چالشی اساسی در نانو مکانیک محاسباتی مطرح می باشد و محققین این بخش مجبور به ساده سازی تئوری ها با از دست دادن دقت هستند [2].

از آنجا که فیزیک دانان معتقد هستند که جهان پیرامون انسان‌ها بر اساس ریاضیات پایه ریزی شده‌است، بنابراین رفتار اتم‌ها و مولکول‌ها از یک مدل ریاضی پیروی می‌کند. این مدل‌ها یا از نوع معادلات انتگرالی هستند و یا از نوع معادلات دیفرانسیلی و یا ترکیبی از آنها. نانو مکانیک تحلیلی با در نظر گرفتن این معادلات به حل دقیق آنها با استفاده از راهکارهای ریاضـی اینگونـه از معادلات می‌پردازد و آنجا که دست راه حل‌های معقول و معمول کوتاه است از روش‌های عددی می‌توان بهره جست. پـر واضـح است که حل دقیق معادلات حاکم در نانو مکانیک برای محققان بسیار اطمینان بخش تر است.

دروازه ورود به نانو فناوری از منظر مهندسی مکانیک شناخت دقیق رفتار مکانیکی مواد، ساختارها و سازه هـا در ابعـاد نـانومتر می باشد. در واقع، ابعاد، منشأ اثرات فیزیکی جدیدی می‌شود که تئوری‌های معتبر مکانیک کلاسیک را به چالش می‌کشد؛ چـرا که اساس مکانیک محیط پیوسته کلاسیک برپایه فرضیاتی استوار می‌باشد که با ابعاد اتمی در تناقض آشکار می‌باشـند. بـا ایـن وصف، روش‌ها و تئوری‌های کلاسیک مهندسی مکانیک که طی دهه‌ها توسعه یافته‌اند، در ابعاد نـانومتر معتبـر نمـی‌باشـند. در واقع برخی اثرات وابسته به اندازه به گونه‌ای در رفتار مکانیکی ظهور می‌یابند که مکانیک محیط پیوسته کلاسـیک را در پـیش بینی رفتار مکانیکی ناتوان می‌سازند. بر همین اساس و برای غلبه کردن بر ایـن مشـکل، روش‌هـای دیگـری از جملـه مکانیـک کوانتومی و شبیه سازی مولکولی مورد استفاده قرار گرفته اند که هر کدام از آنها محدودیت‌های خاص خود را از نظر زمانی و یا ابعادی دارند. به خاطر در دسترس بودن پتانسیل بین اتمی دقیق برای بسیاری از مواد، شبیه سـازی مولکـولی کلاسـیک بـرای بررسی رفتارهای پیچیده ساختارها و مواد در این ابعاد مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌است، هر چند ایـن روش نیـز محـدودیت زیادی دارد. اکثر سازه‌ها و ساختارهایی که نظر محققان را برای مشاهده رفتار مکانیکی خود جلب مـی‌کننـد، از چنـدین اتـم و

ملوکول تشکیل شده‌اند. تا به امروز، بررسی نانو مکانیکی یک ساختار با ابعاد چند میکرون، که خود شامل بیلیون‌ها اتم می‌شود، برای شبیه‌سازی مولکولی بسیار سنگین می‌باشد. زیرا در این شبیه‌سازی‌ها برهمکنش تک تک اتم‌ها و مولکول‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و تاریخچه هر کدام از این برهمکنش‌ها ثبت می‌گردد. بنابراین با توجه به مسئله حصول حداکثر دقت، نیاز به ظرفیت پردازشی بسیار بالایی وجود دارد. همین مشکلات، محققان را به سوی ابداع و یا اصلاح روش های دیگر به ویژه تئوری‌های تعمیم یافته مکانیک محیط پیوسته کشاند. روش‌هایی که پیش از مطرح شدن در فناوری نانو نیز وجود داشته‌اند و در مسائلی چون بررسی رشد ترک، مرز بین دو ماده مختلف و مواد دانه‌ای کاربرد داشته‌اند. از مهم ترین این تئوری‌ها، تئوری‌های غیر موضعی در الاستیسیته و تئوری الاستیسیته تنش سطحی می‌باشند که توانسته‌اند با دقت مناسب با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت داشته باشند [3].

نانو مکانیک در حوزه ریاضیات عموماً با معادلات دیفرانسیل جزئی، معادلات انتگرالی، ترکیبی از معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی و جبر خطی سر و کار دارد. تقریبا تمامی روش‌های سنتی حل مسائل مکانیک کلاسیک با ورود به دنیای نانو همچنان کارآمد می‌باشند. هرچند که برخی از آنها با توجه به اصلاحات صورت گرفته در تئوری‌های کلاسیک، نیازمند تغییرات و یا اصلاحاتی جزئی می‌گردند. در این مسیر همواره چالش‌هایی وجود دارد که محققان با آن رو برو بوده‌اند و آنان را درگیر مسائل مختلفی در این حوزه ساخته‌است.

۱-۱ مروری بر تئوری‌های محیط‌های پیوسته تعمیم یافته

نانوسیم ها، نانو فیلم ها، نانو لوله ها، نانو ورق ها و نانو تیرها، نانو سازه‌هایی هستند که ابعاد آنها ۱ نانومتر شروع شده و تا ۱۰۰ نانومتر ادامه می‌یابد. ابعاد این سازه‌ها بزرگتر از ابعاد یک اتم و نزدیک به ابعاد یک و یا چند مولکول می باشند. با استفاده از این سازه‌ها و ساختارها می توان نانو کامپوزیت ها، دستگاه های نانو و یا سازه های پیچیده‌تر نانو با کارکرد مورد نیاز تولید کرد. از بخش های مهم فناوری نانو، مربوط می شود به بررسی مکانیکی رفتار نانو سازه های بنیادین (نانو تیر، نانو ورق و...) که زیر مجموعه نانو مکانیک قرار می گیرند.

از آنجا که رفتار مواد در مقیاس نانو تفاوت آشکاری با رفتار در مقیاس معمول دارد، روش‌های متنوع و جدیدی برای مطالعه رفتار مکانیکی آنها در این مقیاس ابداع شده‌اند که هر یک به‌نوعی دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشد. برای مثال روش‌های شبیه سازی اتمی/ مولکولی می‌توانند با مدل کردن نیرو های بین اتمی/ مولکولی، تک تک آنها را در حین تغییر شکل ماده مورد مطالعه قرار دهند. در واقع در این روش‌ها با درنظر گرفتن نیروهای جاذبه و دافعه بین اتمی و بین ملکولی و با توجه به روابط فیزیک کوانتوم حاکم بر برهمکنش‌ها، خواص و مشخصه‌های فیزیکی جدید در ابعاد کوچک را بررسی کرده و رفتار