

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

برداشت انرژی از ارتعاشات غیرخطی یک ایرفویل تحت تحریک‌های همزمان پایه و جریان با رزونانس داخلی

نگارنده: علی کارگزارفرد

اساتید راهنما

دکتر حبیب احمدی

دکتر کامران فروتن

بهمن ۱۴۰۰

تقدیم اثر

تقدیم به

به پدر، مادر و خواهر عزیزم که هر شرایطی

پشتیبان و مشوق من بودند

شکر و قدردانی

خداوند بزرگ را شاکرم که یاری ام کرد تا بخش دیگری از زندگی را می‌یابیم. می‌بودن این مسیر بدون لطف بی‌دین بسیاری از اساتید و دوستان عزیز بسیار دشواری نمود. لذا بر خود وظیفه می‌دانم در این

فرصت از ایشان یاد کرده و حداقل مراتب پاس‌گزاری را بجا آورم.

ابتدا از اساتید که تقدیرم جناب دکتر حبیب احمدی و دکتر کامران فروتن که زحمات راه‌پایانی این پایان نامه را بر عهده داشتند، کمال پاس‌را دارم.

همچنین لازم است از تمامی اساتید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و سایر اعضای هیئت علمی و مسئولین دانشگاه صنعتی شاهرود که در دوران تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد از حضورشان بهره علمی و

معنوی بردم شکر می‌کنم.

و در پایان از همه دوستان ارجمندم که مراد انجام این تحقیق یاری نمودند، قدردانی و شکر می‌نمایم.

تهدنامه

اینجانب علی کارگزارفرد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه برداشت انرژی از ارتعاشات غیرخطی یک ایرفویل تحت تحریک های همزمان پایه و جریان با رزونانس داخلی تحت راهنمایی دکتر حبیب احمدی و دکتر کامران فروتن متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در تحقیق حاضر، به مطالعه مدل سازی غیر خطی و تحلیل ارتعاشات یک ایرفول به منظور بررسی پتانسیل جاذب های برداشت انرژی پیزوالکتریک تحت تحریک های همزمان پایه و جریان پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا یک ایرفول تحت تحریک های همزمان پایه و جریان، به صورت یک سیستم دو درجه آزادی غیرخطی با جابجایی عمودی و پیچشی قرار گرفته و معادلات مربوط به آن استخراج شده است. سپس سفتی های غیر خطی در جهت عمودی (غوطه وری) (k_l و k_{nl}) و سفتی های خطی و غیر خطی پیچشی (ka_l و ka_{nl})، به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته و به مدل سیستم اضافه شده است. در ادامه یک جاذب برداشت انرژی پیزوالکتریک به این سیستم دو درجه آزادی غیر خطی متصل شده است. همچنین برای بررسی پاسخ های ارتعاشی و رزونانسی غیر خطی سیستم از روش های تئوری اغتشاشات و یا روش های عددی در تحلیل سیستم استفاده شده است. در نهایت پاسخ های سیستم استخراج و تاثیر پارامترهای مختلف فیزیکی بر روی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه: ارتعاشات غیرخطی، برداشت انرژی، تحریکات همزمان، رزونانس داخلی، پیزوالکتریک

یست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱-

۲-

۳-

فهرست مطالب

س	فهرست جداول
ش	فهرست اشکال
ض	فهرست علائم
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ برداشت انرژی
۳	۱-۲-۱ چرا برداشت انرژی؟
۳	۲-۲-۱ مبانی برداشت انرژی
۴	۳-۲-۱ تکنولوژی برداشت انرژی
۵	۳-۱ انرژی پیزوالکتریک مبتنی بر ارتعاش
۵	۴-۱ مقدمه‌ای بر برداشت انرژی مغناطیسی
۶	۵-۱ مقدمه‌ای بر برداشت انرژی با تکنولوژی غیرخطی
۶	۶-۱ مقدمه‌ای بر برداشت انرژی ترموالکتریک
۷	۱-۶-۱ برداشت گرما
۸	۲-۶-۱ ژنراتورهای ترموالکتریک
۹	۷-۱ مقدمه‌ای بر برداشت انرژی خورشیدی
۹	۱-۷-۱ استفاده از انرژی خورشیدی
۱۰	۸-۱ برداشت انرژی مکانیکی

فصل ۲: مروری بر تحقیقات پیشین ۱۱

- ۱-۲ مقدمه ۱۲
- ۲-۲ مروری بر تحقیقات پیشین برداشت انرژی ارتعاشات ۱۲
- ۳-۲ مروری بر تحقیقات پیشین برداشت انرژی حرارتی ۱۶
- ۴-۲ مروری بر تحقیقات پیشین جاذب‌های برداشت انرژی خورشیدی ۱۷
- ۵-۲ مروری بر تحقیقات پیشین جاذب‌های برداشت انرژی مکانیکی ۱۸
- ۶-۲ مروری بر تحقیقات پیشین جاذب‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک ۱۹
- ۷-۲ معرفی کار حاضر ۲۲

فصل ۳: مدل‌سازی ۲۵

- ۱-۳ مقدمه ۲۶
- ۲-۳ بررسی رزونانس داخلی یک ایرفویل با استفاده سفتی خطی ۲۶
- ۱-۲-۳ مدل‌سازی دینامیکی برداشت انرژی ۲۶
- ۲-۲-۳ راه حل‌های تحلیل تقریبی تشدید داخلی ۲۸

فصل ۴: ارائه نتایج ۳۵

- ۱-۴ مقدمه ۳۶
- ۲-۴ نتایج ۳۶

فصل ۵: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات ۵۱

- ۱-۵ نتیجه گیری ۵۲
- ۲-۵ پیشنهادات ۵۲

مراجع ۵۳

فهرست جداول

جدول ۱، مشخصات فیزیکی سیستم.....	۳۶
جدول ۲-راهنمای خطوط نمودار	۳۷

فهرست اشکال

- شکل ۱ (a) تیر یک سردگیر با جرم در انتها، (b) PZT چند لایه تحت ارتعاش عرضی برانگیخته شده در پایه، و (c) سیستم جرم-فنر معادل یک جسم صلب ارتعاشی ۴
- شکل ۲ Seiko Thermic، ساعت مچی با گرمای بدن و با استفاده از برداشت کننده انرژی ترموالکتریک (چپ) ساعت، (راست) نمودار مقطعی ۷
- شکل ۳ شماتیک یک ژنراتور ترموالکتریک. بسیاری از جفت‌های ترموالکتریک (پایین داخلی) از مواد ترموالکتریک نوع n و p به صورت الکتریکی به صورت سری و حرارتی به صورت موازی به هم متصل می‌شوند تا یک ماژول ترموالکتریک (بالا) یا ترموپایل بسازند. ۹
- شکل ۴ سیستم برداشت انرژی تحریک پایه دو درجه آزادی [۱۲] ۱۳
- شکل ۵ مدل پیشنهادی برای برداشت انرژی هم‌زمان از ارتعاشات پایه و جریان باد [۱۳] ۱۳
- شکل ۶ مدل معادل برداشت انرژی غیر خطی تحت تحریک خارجی [۱۹] ۱۵
- شکل ۷ شماتیک سیستم جدید تبدیل انرژی گرمایی اقیانوس‌ها ۱۷
- شکل ۸ شماتیک سیستم موتور ترکیبی استرلینگ [۱۵] ۱۸
- شکل ۹ ساختار سه‌بعدی جمع‌کننده انرژی الکترومغناطیسی چرخشی [۱۹] ۱۹
- شکل ۱۰ مدل ژنراتور پیزوالکتریک با یکسو کننده AC-DC و بارگذاری [۲۰] ۲۲
- شکل ۱۱ اثر پیزوالکتریک پایه [۲۲] ۲۲
- شکل ۱۲ شماتیک برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک ناشی از ارتعاش [۲۹] ۲۲
- شکل ۱۳ برداشت‌کننده انرژی تحت تحریک‌های هم‌زمان پایه و جریان [۴۵] ۲۳
- شکل ۱۴ شماتیک ایرفویل ناشی از تحریک‌های هم‌زمان پایه و جریان و جاذب‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک ۲۴
- شکل ۱۵- نمودار a_2 بر حسب t ، در حالت‌های مختلف ۳۷
- شکل ۱۶، نمودار a_2 بر حسب t ، در حالت‌های مختلف ۳۸
- شکل ۱۷، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=1, z_0=0.015, U=2m/s$ ۳۹
- شکل ۱۸، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=2m/s$ ۴۰
- شکل ۱۹، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.01, z_0=0.015, U=2m/s$ ۴۰
- شکل ۲۰، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.01, z_0=0.015, U=5sm/s$ ۴۱
- شکل ۲۱، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.05, z_0=0.015, U=5sm/s$ ۴۱
- شکل ۲۲، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.05, z_0=0.015, U=2.5sm/s$ ۴۲
- شکل ۲۳، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.05, z_0=0.15, U=2.5sm/s$ ۴۲
- شکل ۲۴، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.05, z_0=1.5, U=2.5sm/s$ ۴۳

- شکل ۲۵، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=2\text{m/s}$ ۴۳
- شکل ۲۶، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=1, z_0=0.015, U=2\text{m/s}$ ۴۴
- شکل ۲۷، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$ ۴۴
- شکل ۲۸، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.05, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$ ۴۵
- شکل ۲۹، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.05, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$ ۴۵
- شکل ۳۰، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$ ۴۶
- شکل ۳۱، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0.5, \sigma_0=0.5, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$ ۴۶
- شکل ۳۲، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=0.15, U=2.5\text{m/s}$ ۴۷
- شکل ۳۳، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=1.5, U=2.5\text{m/s}$ ۴۷
- شکل ۳۴، مقایسه ولتاژ غیر خطی با مقاله برای $\varepsilon=1, 0$ و $z_0=0.015, U=2.22\text{m/s}$ ۴۹
- شکل ۳۵، مقایسه ولتاژ غیر خطی با مقاله برای $\varepsilon=5, 0$ و $z_0=0.015, U=2.22\text{m/s}, \sigma=0.001, \sigma_0=0.0155$ ۴۹
- شکل ۳۶، نمودار $v-\sigma_0$ در دامنه‌های ۳ و ۱/۵ میلی‌متر ۵۰
- شکل ۳۷، نمودار $v-\sigma_0$ در دامنه‌های ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر ۵۰

فهرست علائم

علائم یونانی

زیرنویس‌ها

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

تکنولوژی‌های برداشت انرژی، با برداشت انرژی محیط و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، می‌توانند انرژی الکتریکی مورد نیاز دستگاه‌های الکترونیکی کوچک را فراهم سازند. آن‌ها می‌توانند پتانسیل زیادی را برای کاربردهای دستگاه‌های الکترونیکی کم‌مصرف از خود نشان دهند، به‌ویژه زمانی که شارژ یا تعویض باتری مشکل و گران می‌باشد. منابع انرژی مختلف مانند انرژی باد، خورشید، حرارتی و ارتعاشی برای برداشت انرژی در دسترس می‌باشند که در دهه گذشته از میان این منابع انرژی، برداشت انرژی از ارتعاشات تحت تحریک پایه، مورد علاقه محققان زیادی قرار گرفته است [۱، ۲]. بنابراین محققان سعی بر این داشته‌اند که به بررسی پاسخ ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی متصل به جاذب‌های برداشت انرژی و پتانسیل ناشی از آن‌ها بپردازند.

در فصل اول این پایان نامه توضیحاتی در ارتباط با سیستم‌های برداشت انرژی، دسته‌بندی‌ها و کاربردهای آن آورده شده است.

در فصل دوم مروری بر تحقیقاتی که در زمینه سیستم‌های برداشت انرژی، برداشت انرژی ارتعاشات، حرارتی، خورشیدی، مکانیکی و پیزوالتریک ارائه می‌شود. در فصل سوم مدل‌سازی و روابط حاکم ارائه می‌گردد. در فصل چهارم مطالعه صورت گرفته به همراه نتایج تشریح می‌گردد و در فصل پنجم، فصل پایانی نیز نتایج و ارائه پیشنهادات آورده شده است.

۲-۱ برداشت انرژی

برداشت انرژی را می‌توان جذب و تبدیل مقادیر کمی از انرژی قابل دسترس در محیط به انرژی الکتریکی قابل استفاده، تعریف کرد. انرژی الکتریکی تولیدی یا به صورت مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد و یا برای استفاده‌های بعدی ذخیره می‌شود. این روش می‌تواند یک منبع انرژی جایگزین برای کاربرد در

مکان‌هایی است که شبکه برق وجود نداشته و نصب توربین‌های بادی و یا پنل‌های خورشیدی نیز امکان‌پذیر نباشد.

به غیر از انرژی خورشیدی در فضای باز، هیچ منبعی نمی‌تواند انرژی زیادی را از یک منبع انرژی کم تامین کند. انرژی جذب شده برای اکثر کاربردهای بی سیم، سنجش از راه دور، ایمپلنت‌های بدن، RFID و سایر کاربردها در بخش‌های پایین‌تر از طیف قدرت نیز کافی است. حتی اگر انرژی برداشت شده کم باشد و قادر به تامین انرژی دستگاه نباشد، باز هم می‌توان از آن برای افزایش عمر باتری استفاده کرد [۳].

۱-۲-۱ چرا برداشت انرژی؟

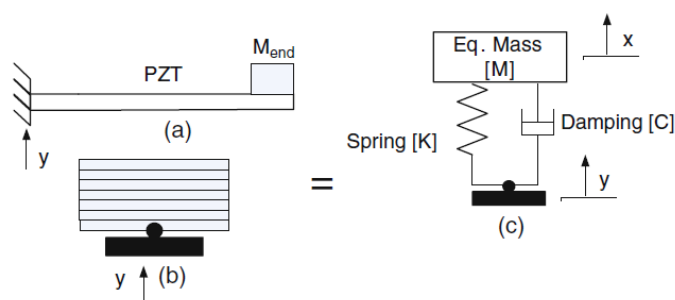
بیشتر وسایل الکترونیکی کم مصرف، مانند سنسورهای راه دور و دستگاه‌های تعبیه‌شده، توسط باتری تغذیه می‌شوند. با این حال، حتی باتری‌های با عمر زیاد، عمر محدودی دارند و باید هر چند سال یکبار تعویض شوند. هنگامی که صدها حسگر در مکان‌های دور وجود داشته باشد، جایگزینی آن‌ها هزینه‌بر می‌شود. از سوی دیگر، فناوری‌های برداشت انرژی، عمر عملیاتی نامحدودی را برای تجهیزات کم‌مصرف فراهم می‌کنند و نیاز به تعویض باتری‌ها را در مواردی که پرهزینه، غیرعملی یا خطرناک باشد، از بین می‌برند.

بیشتر کاربردهای برداشت انرژی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که خودپایدار، مقرون به صرفه بوده و طی سالیان متمادی نیاز کمی به سرویس داشته و یا اصلاً نداشته باشند. علاوه بر این، به دلیل نزدیکی منبع برق به سیستم، تلفات ناشی از انتقال و کابل‌های طولانی حذف می‌شود. اگر انرژی برای تغذیه مستقیم دستگاه کافی باشد، دستگاه می‌تواند بدون باتری کار کند [۳].

۱-۲-۲ مبانی برداشت انرژی

لرزش یک جسم صلب می‌تواند ناشی از عوامل متعددی مانند جرم نامتعادل در یک سیستم، پارگی و

سایش مواد باشد و تقریباً در تمام سیستم های دینامیکی رخ می دهد. رفتار برای هر سیستم منحصر به فرد است و می توان آن را به سادگی با دو پارامتر توصیف کرد: ثابت میرایی و فرکانس طبیعی. معمولاً از یک سیستم جرم-فنر یک درجه آزادی برای مطالعه ویژگی های دینامیکی یک جسم ارتعاشی مرتبط با برداشت انرژی استفاده می شود [۴]. شکل ۱ یک تیر با صفحات پیزوالکتریک متصل به یک بستر و یک جرم ثابت در انتهای آن را نشان می دهد.



شکل ۱ (a) تیر یک سر درگیر با جرم در انتها، (b) PZT چند لایه تحت ارتعاش عرضی برانگیخته شده در پایه، و (c) سیستم جرم-فنر معادل یک جسم صلب ارتعاشی

تیر یک سر درگیر با جرم در انتهای آن پرکاربردترین شکل برای دستگاه برداشت انرژی پیزوالکتریک است. منبع ارتعاش با یک فلش در پایه نقطه اتصال نشان داده شده است. سختی سازه به شرایط هندسه، مواد و سطح مقطع عمود بر جهت ارتعاش بستگی دارد. معادله حاکم بر حرکت برای سیستم نشان داده شده در شکل ۱ (c) را می توان از معادله تعادل، انرژی یا اصل D'Alembert به دست آورد. این پیکربندی برای هر دو مکانیسم برداشت انرژی نشان داده شده در شکل ۱ (a) و (b) اعمال می شود.

۳-۲-۱ تکنولوژی برداشت انرژی

برداشت نیروی الکتریکی از منابع انرژی غیر سنتی با استفاده از ژنراتورهای ترموالکتریک، مبدل های پیزوالکتریک و سلول های خورشیدی همچنان یک چالش باقی مانده است. هر یک از این ها به شکلی از مدار تبدیل توان برای جمع آوری، مدیریت و تبدیل انرژی از این منابع به انرژی الکتریکی قابل استفاده برای

میکروکنترلرها، حسگرها، دستگاه‌های بی‌سیم و دیگر مدارهای کم مصرف نیاز دارند [۳].

۱-۳ انرژی پیزوالکتریک مبتنی بر ارتعاش

توسعه شبکه‌ی حسگرهای بی‌سیم و گره‌های ارتباطی در چند سال گذشته مورد توجه جوامع تحقیقاتی قرار گرفته است [۵]. کاربردهایی که نیاز به استفاده از این نوع شبکه‌ها را دارد، شامل نظارت بر سلامت سازه‌های عمرانی، پایش سلامتی بدن، سیستم‌های کنترل محیطی، تشخیص مواد خطرناک، خانه‌های هوشمند و برنامه‌های کاربردی امنیت داخلی می‌باشد. با افزایش تعداد شبکه‌ها و کاهش اندازه دستگاه‌ها، مشکل اصلی تعداد زیاد این میکروسنسورها مشکل منبع تغذیه است که این چالش را می‌توان با استفاده از پیزوالکتریک‌ها و انرژی مبتنی بر ارتعاش حل کرد.

۱-۴ مقدمه‌ای بر برداشت انرژی مغناطیسی

از اوایل دهه ۱۹۳۰، مدت کوتاهی بعد از پیشرفت فارادی در القای الکترومغناطیس، از الکترومغناطیس برای تولید الکتریسیته استفاده شده است. اکثر ژنراتورهای مورد استفاده امروزی مبتنی بر چرخش هستند و در کاربردهای متعددی از تولید برق در مقیاس بزرگ تا کاربردهای مقیاس کوچکتر در خودروها برای شارژ مجدد باتری استفاده می‌شوند. برای برداشت توان در مقیاس میکرو وات تا میلی وات می‌توان از ژنراتورهای خطی یا چرخشی الکترومغناطیسی استفاده کرد. در صورتی که یک ژنراتور به درستی طراحی شده باشد و اندازه آن محدود نباشد، می‌توانند مبدل بسیار کارآمد انرژی جنبشی به الکتریکی باشند. هرچند که کوچک‌سازی این ژنراتورها با کاهش راندمان همراه است ولی تلاش‌ها برای رسیدن به بهترین راندمان از میکرو ژنراتورها با تکنیک‌های مختلف ادامه دارد.

۵- مقدمه‌ای بر برداشت انرژی با تکنولوژی غیرخطی

پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌های تبدیل انرژی و میکروالکترونیک باعث تنوع زیادی در مفهوم سیستم‌های بی‌سیم خودتوان شده است. با افزایش تقاضا از سوی صنایع برای استفاده از این نوع حسگرها و با وجود پیشرفت‌هایی که در زمینه تجاری‌سازی صورت پذیرفته، اما بهینه‌سازی ریزژنراتورها-که انرژی خود را از محیط اطراف می‌گیرند- برای ایجاد تعادل انرژی مثبت به مدارهای الکتریکی با عملکرد پیچیده همچنان مورد نیاز است. منابع زیادی برای برداشت انرژی (حرارتی، خورشیدی و غیره) در دسترس هستند، اما ارتعاشات یکی از رایج‌ترین منابع در دسترس می‌باشد که مقدار انرژی قابل توجهی را ارائه می‌دهد. برای چنین منبعی، عناصر پیزوالکتریک عوامل بسیار خوبی برای تبدیل انرژی هستند، زیرا ضریب جفت نسبتاً بالا و همچنین چگالی توان بالایی دارند.

راه‌های مختلفی برای بهینه‌سازی قابل بررسی است، اما دو موضوع اصلی مربوط به افزایش انرژی‌های تبدیل و استخراج شده و مستقل بودن توان برداشت شده از بار متصل به برداشت کننده است. بنابراین، می‌توان چنین اصولی را به برداشت انرژی تعمیم داد، که امکان افزایش قابل توجهی از نظر انرژی استخراج شده و برداشت شده، و یا امکان جداسازی مرحله استخراج و ذخیره را فراهم می‌آورد.

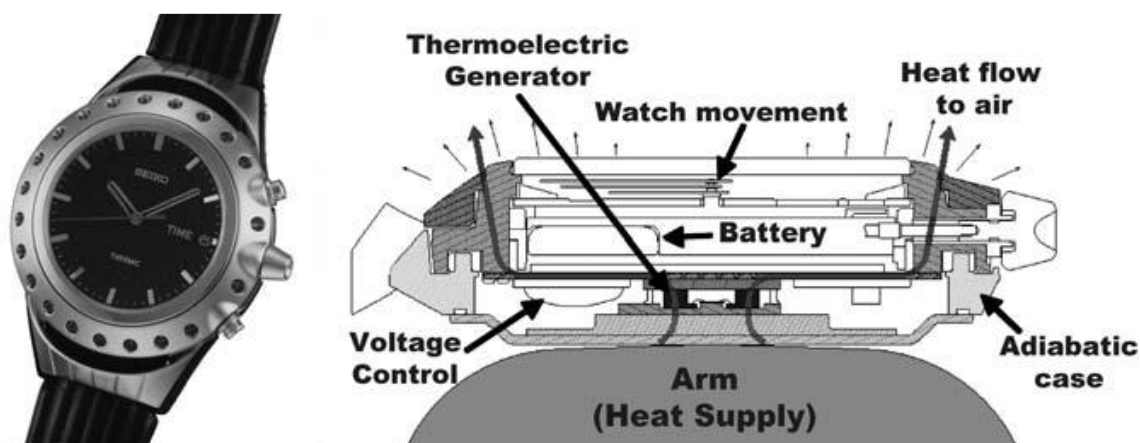
۶- مقدمه‌ای بر برداشت انرژی ترموالکتریک

گرایان دما و جریان گرما در همه جا اعم از محیط‌های طبیعی و ساخته‌شده توسط انسان وجود دارد و فرصتی برای برداشت انرژی از محیط زیست فراهم می‌کند. برداشت انرژی ترموالکتریک (یا حذف انرژی) می‌تواند روزی نیاز به جایگزینی باتری‌ها را در کاربردهایی مانند شبکه‌های حسگر از راه دور یا دستگاه‌های تلفن همراه را برطرف کند. گرمای بدن توانایی تولید و تامین برق دستگاه‌های پزشکی یا ایمپلنت‌ها، شبکه‌های بی‌سیم شخصی یا سایر دستگاه‌ها را دارد.

۱-۶-۱ برداشت گرما

محیط‌هایی که به‌طور طبیعی دارای گرادیان دما و جریان گرما هستند، پتانسیل تولید نیروی الکتریکی با استفاده از تبدیل انرژی حرارتی به الکتریکی را دارند. اختلاف دما، پتانسیل تبدیل انرژی و جریان گرما، قدرت را فراهم می‌کند. با این حال، با جریان گرمای زیاد، معمولاً قدرت استخراج به دلیل راندمان پایین کارنو و مواد، کم است. علاوه بر این، در دسترس بودن حرارت محدود نیز توان تولیدی را محدود خواهد کرد. با این وجود، برای سیستم‌هایی فوق‌العاده کم‌مصرف، مانند حسگرهای بی‌سیم از راه دور، برداشت انرژی ترموالکتریک به عنوان یک فناوری قابل استفاده است و نوید دهنده این است که با کاهش توان مورد نیاز برای چنین کاربردهایی، رایج‌تر نیز شود [۶].

یک مثال خوب از برداشت انرژی ترموالکتریک، ساعت مچی ترموالکتریک است که گرمای بدن را به نیروی الکتریکی تبدیل می‌کند و ساعت را به حرکت در می‌آورد. حداقل دو مدل یکی توسط سیکو و دیگری توسط سیتیزن ساخته شده است. ساعت سیکو [۷] در حالت عادی ۲۲ وات توان الکتریکی تولید می‌کند (شکل ۲). تنها با $1/5$ K افت دمای در سراسر مازول‌های پیچیده ترموالکتریک، ولتاژ مدار باز 300 mV است و راندمان حرارتی به الکتریکی حدود 0.1% است.

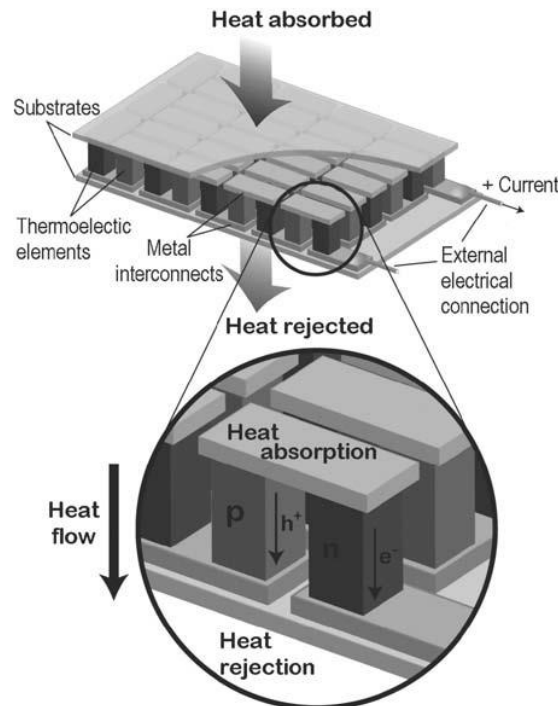


شکل ۲ Seiko Thermic، ساعت مچی با گرمای بدن و با استفاده از برداشت کننده انرژی ترموالکتریک (چپ) ساعت، (راست) نمودار مقطعی

۱-۶-۲ ژنراتورهای ترموالکتریک

ژنراتورهای ترموالکتریک دستگاه‌های حالت جامد و بدون قطعات متحرک هستند. این ژنراتورها بی صدا، قابل اعتماد و مقیاس‌پذیرند، که آن‌ها را برای تولید برق در مقیاس کوچک و توزیع شده و برداشت انرژی ایده‌آل می‌کند. دلیل به وجود آمدن اثرات ترموالکتریک، آزاد بودن حامل‌های بار در فلزات و نیمه‌هادی‌ها -شبیه مولکول‌های گاز حین حمل بار و گرما- می‌باشد [۸]. هنگامی که یک اختلاف دما به یک ماده اعمال می‌شود، معمولاً حامل‌های بار از انتهای داغ به انتهای سرد پخش می‌شوند. تجمع حامل‌های بار منجر به بار خالص (منفی برای الکترون‌ها، e^- و مثبت برای حفره‌ها h^+) در انتهای سرد می‌شود که یک پتانسیل الکترواستاتیک (ولتاژ) را تولید می‌کند. بنابراین تعادلی بین پتانسیل شیمیایی برای انتشار و دافعه الکترواستاتیکی به دلیل ایجاد بار حاصل می‌شود. این خاصیت که به اثر سبک^۱ معروف است، اساس تولید برق ترموالکتریک است. دستگاه‌های ترموالکتریک حاوی زوج‌های ترموالکتریک زیادی هستند که شامل عناصر ترموالکتریک n نوع (شامل الکترون‌های آزاد) و p نوع (حاوی سوراخ‌های آزاد) هستند که به صورت سری و حرارتی به صورت موازی سیم‌کشی شده‌اند (شکل ۳). بهترین مواد ترموالکتریک نیمه هادی‌هایی هستند که به شدت تقویت شده‌اند.

^۱Seebeck



شکل ۳ شماتیک یک ژنراتور ترموالکتریک. بسیاری از جفت‌های ترموالکتریک (پایین داخلی) از مواد ترموالکتریک نوع p و n به صورت الکتریکی به صورت سری و حرارتی به صورت موازی به هم متصل می‌شوند تا یک ماژول ترموالکتریک (بالا) یا ترموپایل بسازند.

۷-۱ مقدمه‌ای بر برداشت انرژی خورشیدی

برداشت انرژی از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی یک چالش کلیدی فن‌آوری برای کاهش آلودگی سوخت‌های فسیلی در بسیاری از کشورها است. انرژی خورشیدی منبع فراوانی از انرژی تجدیدپذیر است و فن‌آوری‌های مختلف تولید برق را می‌توان برای افزایش راندمان تبدیل تابش خورشیدی به برق ادغام کرد. از این رو، ایجاد سیستم‌های کارآمدتر و ترکیب مکانیسم‌های برداشت انرژی برای استخراج انرژی بیشتر از انرژی خورشیدی یکی از جالب‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی است [۹].

۷-۱-۱ استفاده از انرژی خورشیدی

سلول‌های خورشیدی کوچک در کاربردهای صنعتی و مصرفی مانند ماهواره‌ها، منابع تغذیه قابل حمل،

چراغ‌های خیابانی، اسباب بازی‌ها، ماشین حساب‌ها و غیره استفاده می‌شوند. این‌ها از یک سلول فتوولتائیک کوچک استفاده می‌کنند که نور را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. برای کاربردهای داخلی، نور معمولاً خیلی قوی نیست و شدت معمولی آن حدود $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ است. بنابراین، نیروی یک سیستم برداشت انرژی داخلی به اندازه ماژول خورشیدی و همچنین شدت یا ترکیب طیفی نور بستگی دارد. با توجه به ماهیت متناوب نور، معمولاً از انرژی سلول‌های خورشیدی برای شارژ باتری یا ابرخازن استفاده می‌شود تا از تامین پایدار برنامه اطمینان حاصل شود [۳].

۸-۱ برداشت انرژی مکانیکی

برداشت اشکال مختلف انرژی مکانیکی، از انرژی جنبشی و کرنش سطحی گرفته تا ارتعاشات آئروالاستیک و هیدروالاستیک ناشی از جریان، به طور گسترده در دهه گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. از مکانیسم‌های مختلف انتقال می‌توان به انتقال پیزوالکتریک، القای الکترومغناطیسی، انتقال الکترواستاتیک و همچنین برداشت پلیمرهای الکترواکتیو اشاره کرد [۱۰].

روش‌های استفاده شده برای تبدیل انرژی مکانیکی (بیشتر ارتعاشی و جنبشی) به انرژی الکتریکی عبارتند از: پیزوالکتریک، الکترومغناطیسی، الکترواستاتیک، و مغناطیسی یا روش‌های تبدیل مبتنی بر کامپوزیت مغناطیسی و همچنین استفاده از پلیمرهای الکترواکتیو، مانند الاستومرهای دی الکتریک و کامپوزیت‌های پلیمر-فلز یونی. می‌توان ادعا کرد که تولید برق کم‌توان از انرژی جنبشی و ارتعاشات محیطی یک زمینه نسبتاً تثبیت شده است [۱۱].

مبدل‌های پیزوالکتریک زمانی که در معرض انرژی جنبشی ناشی از ارتعاشات، حرکات امواج گرما و یا صداهایی مانند سر و صدای ناشی از بال‌های هواپیما و سایر منابع قرار می‌گیرند، الکتریسیته تولید می‌کنند. مبدل انرژی جنبشی ارتعاشات را به یک ولتاژ خروجی AC تبدیل می‌کند که سپس اصلاح می‌شود، تنظیم و در یک باتری فیلم نازک یا یک خازن فوق العاده ذخیره می‌شود [۳].

فصل ۲ : مروری بر تحقیقات پیشین

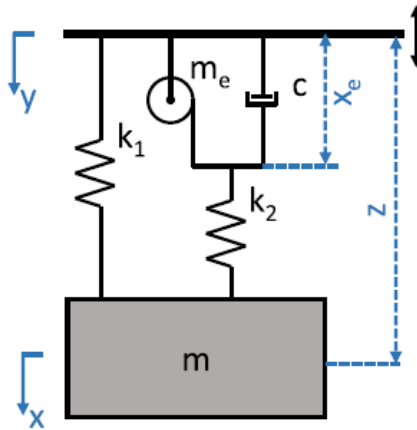
۱-۲ مقدمه

برداشت انرژی به معنای جمع‌آوری انرژی‌های کوچکی می‌باشد که ممکن است به هر شکلی هدر روند. امروزه با توجه به اهمیت محیط زیست و اقتصاد، بازیابی این انرژی‌ها می‌تواند سهم به‌سزایی در حفظ این منابع داشته باشد. از این انرژی‌ها می‌توان در زمینه‌های مختلفی از جمله تولید برق، سنسورهای بدون سیم، پزشکی، علم مواد و... استفاده نمود. بدین ترتیب در سال‌های گذشته محققان زیادی، پژوهش‌های متنوعی را در زمینه برداشت انرژی انجام داده‌اند و به بررسی و مطالعه پارامترهای مختلف در این سیستم‌ها پرداخته‌اند که در ادامه، مطالعات صورت گرفته در این حوزه‌ها ارائه می‌شود.

۲-۲ مروری بر تحقیقات پیشین برداشت انرژی ارتعاشات

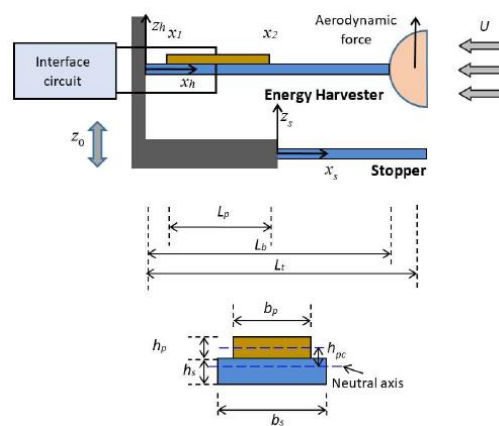
در سیستم‌های جمع‌آوری انرژی لرزش از ژنراتورهای الکترومغناطیسی دوار که دارای توان بالا، خروجی زیاد برق و اینرسی چرخشی زیادی هستند، استفاده می‌شود. استفاده از این نوع ژنراتورها بر روی سیستم‌های یک درجه آزادی عملکرد را کاهش می‌دهد. لیو و همکاران [۱۲] سیستم‌های دو درجه آزادی مطابق شکل ۴ پیشنهاد داده‌اند که استفاده از آن‌ها چالش‌هایی مانند افزایش جرم و فضا را در پی داشت که با سیستم‌های مبتنی بر پایه اینترتر^۱ توانستند این چالش‌ها را برطرف نمایند.

^۱Inerter-based



شکل ۴ سیستم برداشت انرژی تحریک پایه دو درجه آزادی [۱۲]

ژائو و یانگ [۱۳] با پیشنهاد یک دستگاه جمع‌آوری انرژی پهنای باند مطابق شکل ۵ و با استفاده از یک درپوش مکانیکی، انرژی را از ارتعاشات پایه و جریان باد به‌طور هم‌زمان برداشت کرده‌اند. یکی از مشکل‌های برداشت انرژی باد این است که فقط می‌تواند انرژی را از دو نوع تحریک در اطراف فرکانس تشدید خود مهار کند. لذا با پیشنهاد دستگاه مذکور توسط آن‌ها، می‌توان هم انرژی ارتعاش و هم انرژی باد را به‌طور هم‌زمان برداشت نمود.



شکل ۵ مدل پیشنهادی برای برداشت انرژی هم‌زمان از ارتعاشات پایه و جریان باد [۱۳]

محمود و همکاران [۱۴] با توجه به محدودیت باتری دستگاه‌های پزشکی پوشیدنی و قابل حمل، یک مبدل پیزوالکتریک به‌منظور استفاده از وزن بدن برای تولید نیرو در این دستگاه‌ها پیشنهاد داده‌اند. با آزمایش

سیستم پیشنهادی که شامل سه قسمت: واحد توان، اندازه‌گیری و نظارت می‌باشد، نشان داده‌اند که می‌توان ولتاژ مطلوب، که ۵ ولت بود، را به‌دست آورند.

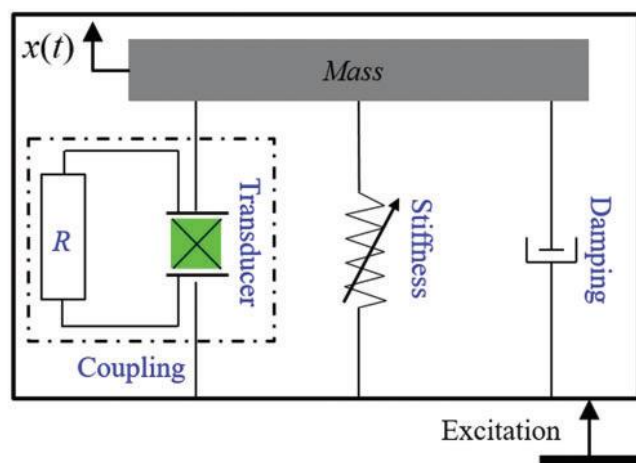
امبروشکیویچ و همکاران [۱۵] با استفاده از آونگ چرخشی مغناطیسی، مفهومی برای سیستم الکترومغناطیسی غیر خطی ارائه داده‌اند. در روند اعتبارسنجی سیستم پیشنهادی، با استفاده از روش المان محدود و مدل‌سازی اثرات الکترومغناطیسی، توانسته‌اند نیروی مغناطیسی آهن‌ربا را در موقعیت‌های مختلف اندازه‌گیری کنند. همچنین با استفاده از ولتاژ و توان خروجی در محدوده فرکانس عملیاتی برای یک پیکربندی ثابت، توانسته‌اند یک مدل ریاضی را نیز استخراج کنند.

بن دالی و همکاران [۱۶]، یک دستگاه جمع‌آوری انرژی با استفاده از فروالکتریک‌های فلرو اتیلن پروپیلن که از دو لایه نازک موازی با شکاف‌های هوا تشکیل شده است را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها با استفاده از یک لرزش‌گر، این دستگاه را در معرض ارتعاشات سینوسی با شتاب a قرار داده‌اند. همچنین، نتایج خروجی و اندازه‌گیری‌ها نشان داده‌است که بهبود خوبی در برداشت انرژی ارتعاشی این نوع فروالکتریک‌ها وجود دارد که تا حدود زیادی از داده‌های قبلی برای دستگاه‌های کنسول پلیمر بیشتر می‌باشد.

یوسف‌پور و همکاران [۱۷]، یک طرح جدید برای کنترل جذب‌کننده‌های هم‌زمان در یک مولد برق پیزومغناطیسی الاستیکی پیشنهاد داده‌اند که با توجه به این‌که عملکرد موثر برداشت‌کننده انرژی سیستم در مدار دوره‌ای با انرژی بالا کار می‌کند، نیاز به یک کنترل‌کننده نیز دارد. آن‌ها از یک کنترل‌کننده‌ی لغزشی به همراه یک الگوریتم بهینه‌ساز استفاده نموده‌اند و در این روش علاوه بر تشدید اولیه، تشدید مافوق هارمونیک را نیز در نظر گرفته‌اند. در این تحقیق نشان داده شده‌است که روش پیشنهادی با موفقیت و با کم‌ترین هزینه می‌تواند انرژی لرزش را بین جاذب‌های مختلف، جابه‌جا نماید.

دتره و همکاران [۱۸]، روشی را برای طراحی یک تامین‌کننده‌ی انرژی قلبی از انرژی ارتعاشی تولید شده توسط آن، ارائه داده‌اند. آن‌ها در این روش طیف شتاب قلب را اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار داده‌اند.

هوآنگ و همکاران [۱۹] با استفاده از روش تقریب چندجمله‌ای چپیشف، خصوصیات دینامیکی برداشت‌کننده انرژی غیرخطی را با یک پارامتر نامشخص مطابق شکل ۶، تحلیل نموده‌اند. آن‌ها همچنین در مدل خود، یک سفتی غیرخطی را پیشنهاد داده‌اند. با این تقریب، اثر بخشی پاسخ میانگین به‌دست آمده، که برای بحث درباره‌ی پاسخ تصادفی معرفی شده، با نتایج عددی تایید می‌شود. از آنجایی که برداشت انرژی ارتعاشی به عنوان وسیله‌ای برای تامین انرژی حس‌گرها توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است، بیبی و همکاران [۲۰] با استفاده از ژنراتورهای کوچک بهینه‌شده در قسمت سیم‌پیچ، اندازه آهن‌ربا و...، ولتاژ مطلوب‌تری را به‌دست آورده‌اند.



شکل ۶ مدل معادل برداشت انرژی غیر خطی تحت تحریک خارجی [۱۹]

بیبو و دافاق [۲۱] یک برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی یکپارچه با ایرفویل پیشنهاد داده‌اند که به طور همزمان انرژی را از ارتعاشات محیطی و باد را مهار می‌کند. آن‌ها نشان داده‌اند که دستگاه یکپارچه در مقایسه با استفاده از دو دستگاه جداگانه برای برداشت انرژی مستقل از دو منبع انرژی، تحت بارگذاری ترکیبی عملکرد بهتری دارد.

یانگ و توفیق‌یان [۲۲] یک برداشت‌کننده انرژی ارتعاش غیرخطی با رزونانس داخلی پیشنهاد داده‌اند

که از دو کنسول تشکیل شده است که هر کدام یک آهنربای دائمی در نوک خود و یک لایه پیزوالکتریک در پایه خود دارد. هنگامی که نیروی مغناطیسی اعمال می‌کند، این سیستم ارتعاش غیرخطی دو درجه آزادی، پدیده تشدید داخلی را نشان می‌دهد که باعث گسترش پهنای باند فرکانس در مقایسه با یک سیستم خطی می‌شود. نتایج آزمایش و شبیه سازی ها علاوه بر تایید مدل ریاضی نشان می‌دهد که طراحی ترکیبی از تشدید داخلی و غیرخطی مغناطیسی، کارایی برداشت انرژی را بهبود می‌بخشد.

ژانگ و همکاران [۲۳] یک استراتژی عملیاتی برای افزایش توان خروجی برداشت انرژی پیزوالکتریک از ارتعاشات ناشی از گرداب (VIV) با استفاده از نیروهای مغناطیسی غیرخطی را برای اولین بار ارائه داده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که برداشت‌کننده انرژی پیشنهادی به دلیل تأثیر نیروهای مغناطیسی غیرخطی، رفتار نرم‌کننده‌ای از خود نشان می‌دهد، که عملکرد سیستم برداشت انرژی مبتنی بر VIV را به شدت افزایش می‌دهد و منطقه همگام‌سازی گسترده‌تر و سطح بالاتری از برداشت را نشان می‌دهد.

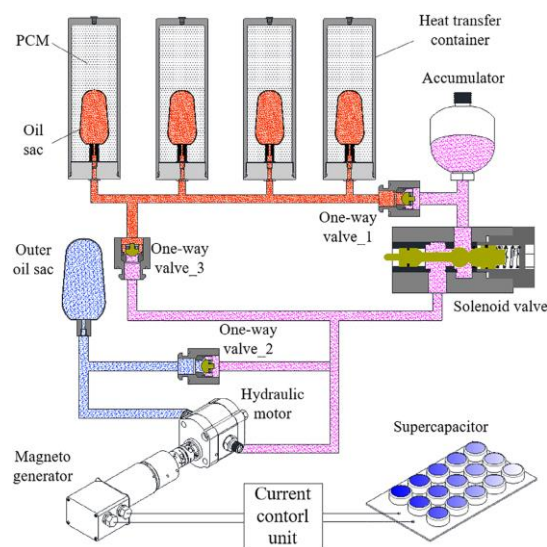
این طرح پیشنهادی می‌تواند زمینه‌ای را برای ارتقای توان خروجی ژنراتورهای پیزوالکتریک مبتنی بر VIV معمولی فراهم کند، و بیشتر امکان تحقیق سیستم‌های خود را فراهم کند.

۳-۲ مروری بر تحقیقات پیشین برداشت انرژی حرارتی

کتریل و همکاران [۲۴]، موادی را طراحی کرده‌اند که حداکثر یا حداقل رسانایی و ظرفیت گرمایی را داشته باشند و با توجه به نوسانات حرارتی، منجر به تولید برق پایدارتری شوند.

شیا و همکاران [۲۵] با توجه به محدودیت انرژی در زیر اقیانوس‌ها و با استفاده از مواد تغییر فاز یافته به عنوان محیط ذخیره انرژی، روش جدیدی را برای تبدیل انرژی حرارتی ذخیره شده بین سطح و عمق دریا مطابق شکل ۷ طراحی نموده‌اند و همچنین یک روش جدید ردیابی حداکثر نقطه کارایی را نیز پیشنهاد داده‌اند که این روش می‌تواند به طور مؤثر بازده تبدیل انرژی را بهبود ببخشد.

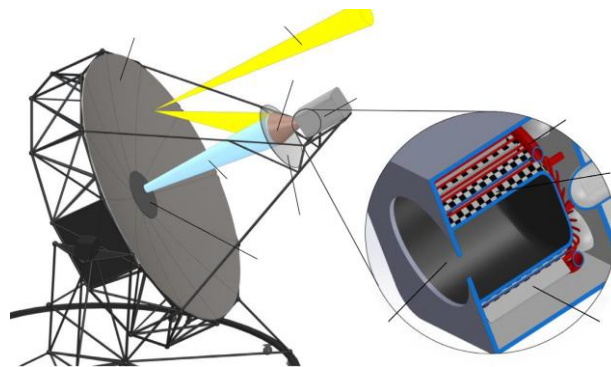
یو و همکاران [۲۶] سیستمی ارائه داده‌اند که با استفاده از تغییرات دمایی محیط، انرژی گرمایی به‌دردرفته را بازیابی می‌کند. این سیستم از دو ماده تغییر فاز یافته مختلف و یک سلول نیمه‌هادی تشکیل شده‌است و از آن‌جا که مقدار زیادی انرژی گرمایی طی انتقال، جذب می‌شود تاجایی که ممکن است از ماده‌های تغییر فاز یافته برای حفظ دما، در دو طرف نیمه‌هادی استفاده نموده‌اند.



شکل ۷ شماتیک سیستم جدید تبدیل انرژی گرمایی اقیانوس‌ها

۴-۲ مروری بر تحقیقات پیشین جاذب‌های برداشت انرژی خورشیدی

محمدنیا و همکاران [۹] باتوجه به این مسئله که با افزایش دمای سلول‌های تولید برق، بازدهی آن‌ها کاهش می‌یابد، با تفکیک طیف خورشیدی و طول موج، بازدهی را افزایش داده‌اند (شکل ۸). آن‌ها باتوجه به طول موج‌هایی که پس از افزایش دما انرژی حرارتی خود را از دست می‌دادند، روش‌هایی را برای تولید برق ارائه نموده‌اند که این روش‌ها علی‌رغم عملکرد و کارایی بالا، هزینه‌ی بالایی داشته‌اند.

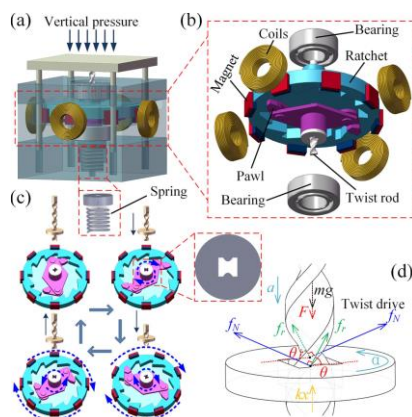


شکل ۸ شماتیک سیستم موتور ترکیبی استرلینگ [۱۵]

سول و همکاران [۲۷] با استفاده از کیت‌های خورشیدی زیرپوستی توانسته‌اند انرژی مورد نیاز جهت شارژ باتری ضربان‌سازهای قلب و دیگر نیازهای تجهیزات پزشکی همراه بیمار را تامین کنند. آن‌ها همچنین سعی داشته‌اند که با بهینه‌سازی از کم‌ترین اندازه تابش نور و ابعاد، بیش‌ترین بازدهی را به دست آورند.

۲-۵ مروری بر تحقیقات پیشین جاذب‌های برداشت انرژی مکانیکی

زو و همکاران [۲۸] توانسته‌اند که با ارائه یک روش جدید، مشکل تبدیل انرژی جنبشی ناشی از حرکات و ارتعاشات محیط اطراف به برق را برطرف نمایند. شین و همکاران [۲۹] توانسته‌اند با استفاده از تنظیم اتوماتیک تشدید، فرکانس طبیعی را بدون دخالت انسان، با ارتعاشات محیط هماهنگ کنند که این امر منجر به افزایش چشم‌گیر بازدهی شده است. ژانگ و همکاران [۳۰] با طراحی یک جمع‌کننده انرژی الکترومغناطیسی چرخشی برای برداشت انرژی مکانیکی حرکت انسان در فرکانس پایین، توانسته‌اند به‌وسیله یک سیستم اینرسی حرکت خطی را به یک چرخش با سرعت بالا تبدیل کنند (شکل ۹).



شکل ۹ ساختار سه بعدی جمع کننده انرژی الکترومغناطیسی چرخشی [۱۹]

یانگ و همکاران [۳۱] مطالعه‌ی مقایسه‌ای از نوک مقاطع عرضی مختلف برای برداشت انرژی باد در مقیاس کوچک بر اساس پدیده گالوپینگ ارائه داده اند. آن ها با ساخت یک نمونه اولیه از دستگاه با یک کنسول پیزوالکتریک و بدنه نوک با پروفایل های مقطع مختلف، برتری سطح مقطع مربعی را نشان دادند که مدل تحلیلی را تایید می کند. بنابراین توصیه میکنند که برای برداشت کننده های انرژی بادگیرهای کوچک از برش مربعی استفاده شود.

۲-۶ مروری بر تحقیقات پیشین جاذب های برداشت انرژی پیزوالکتریک^۱

کینگ و ها [۳۲] با استفاده از عملکرد مبدل بازگشتی حالت هدایت ناپیوسته با یک سنسور جریان منفرد به منظور ردیابی حداکثر نقطه قدرت و با کاهش مرتبه سیستم مطابق شکل ۱۰، اتلاف انرژی را کاهش داده اند.

کابن و همکاران [۳۳] با استفاده از ارتعاشات سیستم تعلیق یک موتور روی یک تیر دارای پیزوالکتریک، نشان داده اند که ولتاژهای خروجی در حالت غیر خطی بیشتر از حالت خطی می باشد. هم چنین، آن ها با

^۱Piezoelectric

استفاده از سیگنال اندازه‌گیری شده سیستم تعلیق، شبیه‌سازی‌های مناسبی از رزوناتور و مبدل پیزوالکتریک را ارائه نموده‌اند.

ارتورک و همکاران [۳۴] به بررسی مفهوم پیزوآثروالاستیسیته برای برداشت انرژی پرداخته‌اند. آن‌ها با مدل‌سازی ریاضی و اعتبارسنجی تجربی مسئله تولید الکتریسیته در مرز فلاتر یک ایرفویل پیزوآثروالاستیک و تاثیر سرعت فلاتر بر توان پیزوالکتریک را بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که پارامترهای غیر خطی تاثیر به سزایی در سیستم مورد بررسی‌شان دارد.

میشرا و همکاران [۳۵] به تحلیل دو روش برداشت نیروی الکتریکی از دو سیستم مختلف پیزوالکتریک جدید که مطابق شکل ۱۱ به ریل‌های راه‌آهن متصل شده‌اند، پرداخته‌اند. یک سیستم از نوع فشرده‌سازی است که نیروی آن توسط قطار اعمال می‌شود و سیستم دیگر، یک تیر یک‌سر درگیر است که از ارتعاشات زمین برانگیخته می‌شود.

سارکر و همکاران [۳۶] با پیشنهاد یک روش بهینه‌سازی ترکیبی به جلوگیری از افت قدرت پیزوالکتریک‌ها پرداخته‌اند. این پیشنهاد شامل یک طراحی مبدل و روش کنترلی بهبودیافته است که منجر به کاهش زیاد اتلاف انرژی و خطای خروجی شده است.

چا و همکاران [۳۷] به بررسی برداشت انرژی از ارتعاشات یک تیر کامپوزیت پیزوالکتریک در زیر آب پرداخته‌اند. آن‌ها هندسه‌ها و حالت‌های غوطه‌وری مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند. دونگ و همکاران [۳۸] با پیشنهاد طرح‌های پیزوالکتریک و تریبولکتریک برای باتری دستگاه کنترل ضربان نامنظم قلب، که بایستی به صورت دوره‌ای تعویض گردد، توانسته‌اند بیمار را از جراحی‌هایی متعدد، خطرناک و هزینه‌بر، بی‌نیاز سازند.

دونگ و همکاران [۳۹] بررسی کرده‌اند که با استفاده از پیزوالکتریک‌ها می‌توان از ارتعاشات قلب برای شارژدهی باتری‌های که در درون آن قرار داده شده‌است، به عملکرد بهتر قلب کمک کنند. آن‌ها نشان داده‌اند که با این روش عمر باتری‌ها ۲۰٪ افزایش خواهد یافت. وو و همکاران [۴۰] با تبدیل انرژی

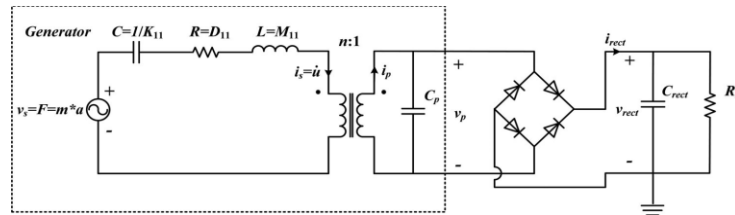
بیومکانیکی انسان به انرژی الکتریکی از طریق پیزوالکتریک، ایده‌ای مناسب برای شارژ وسایل الکتریکی ارائه داده‌اند. در این روش از یک کامپوزیت چندمنظوره و یک ماژول چندمنظوره خودشارژ استفاده شده‌است.

لی و جینگ [۴۱] با استفاده از ساختار غیر خطی X شکل متصل به برداشت کننده‌های پیزوالکتریک و از طریق دو نوع پیکربندی نصب شده ویژه، سیستم‌های جدید برداشت انرژی ارتعاشی را مورد بررسی قرار داده‌اند.

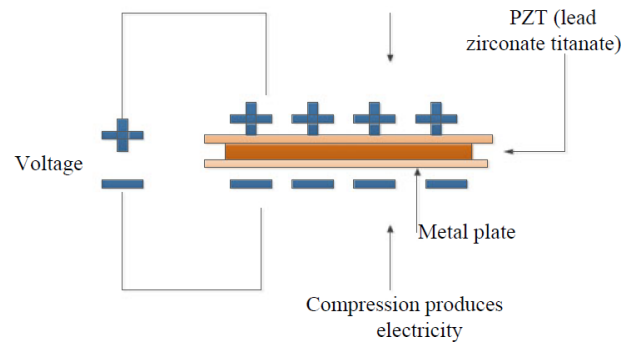
ژانگ و همکاران [۴۲] به بررسی برداشت انرژی توسط پیزوالتریک‌های نصب شده بر روی یک پوسته‌ی استوانه‌ای پرداخته‌اند (شکل ۱۲). آن‌ها با پیشنهاد یک مدل جدید، برای حالتی که پوسته حاوی مایع می‌باشد، کارایی آن را افزایش داده‌اند.

اگیویس و همکاران [۴۳] به بررسی تجربی دینامیک غیرخطی یک ساختار نازک پیزوالکتریک دایره‌ای کاملاً یکپارچه پرداخته‌اند. آن‌ها از پیزوالکتریک برای تحریک و سنجش استفاده و پاسخ دوره ای تشدید کننده سیستم تحت فشار هارمونیک پایدار و نا پایدار را اندازه گیری کرده‌اند. آنان دریافتند که علاوه بر یک رفتار سخت شونده‌ی مرتبط با هندسه‌های غیرخطی صفحه، یک رفتار نرم‌شدگی غالب نیز در دامنه‌های با تحریک کم مشاهده می‌شود که ناشی از غیرخطی‌های پیزوالکتریک مواد است.

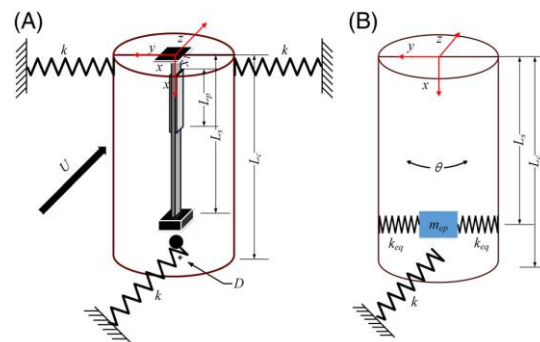
چن و جیانگ [۴۴] امکان جدیدی را برای افزایش برداشت انرژی از طریق رزونانس داخلی نشان داده‌اند. آن‌ها تحریک متوالی را به عنوان نویز سفید گاوسی، نویز رنگی را به عنوان فیلتر مرتبه دوم، نویز باند باریک و نویز همبسته نمایی تعریف کرده‌اند. نتایج عددی نشان می‌دهد که رزونانس داخلی، پهنای باند عملیاتی و ولتاژ خروجی را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۰ مدل ژنراتور پیزوالکتریک با یکسو کننده AC-DC و بارگذاری [۲۰]



شکل ۱۱ اثر پیزوالکتریک پایه [۲۲]

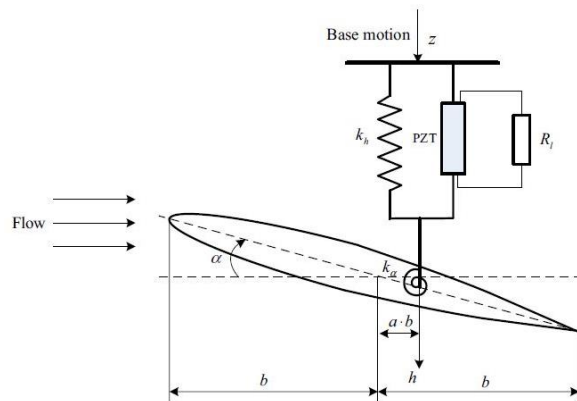


شکل ۱۲ شماتیک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک ناشی از ارتعاش [۲۹]

۷-۲ معرفی کار حاضر

لیو و گائو [۴۵] به بررسی اثر رزونانس داخلی در برداشت انرژی تحت تحریک همزمان پایه و جریان پرداخته‌اند. آن‌ها به منظور مدل سازی ایرفول و جاذب برداشت انرژی، سفتی های غوطه‌وری و پیچشی را به صورت خطی مطابق شکل ۱۳ در نظر گرفته‌اند و در نتیجه سیستم را به صورت خطی با یک بارگذاری غیر خطی در نظر گرفته‌اند. در حالی که در کار پیشنهادی حاضر علاوه بر سفتی های غوطه‌وری و پیچشی خطی،

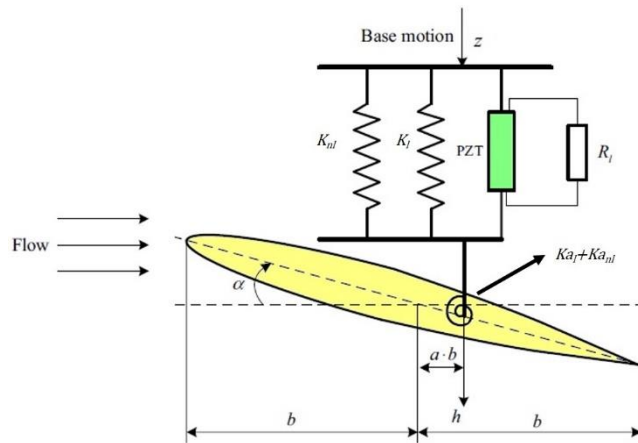
سفتی‌های غوطه‌وری و پیچشی غیر خطی نیز در نظر گرفته شده‌است و در اینجا هدف بررسی برداشت انرژی از یک مدل غیر خطی و تأثیر این سفتی‌ها در کارایی آن می‌باشد.



شکل ۱۳ برداشت کننده انرژی تحت تحریک‌های همزمان پایه و جریان [۴۵]

در این پایان‌نامه به مدل‌سازی غیر خطی و تحلیل ارتعاشات یک ایرفول^۱ به‌منظور بررسی پتانسیل جاذب‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک تحت تحریک‌های همزمان پایه و جریان پرداخته می‌شود. در این مطالعه، یک ایرفول تحت تحریک‌های همزمان پایه و جریان، مطابق شکل ۱۴ به‌صورت یک سیستم دو درجه آزادی غیر خطی با سفتی‌های خطی و غیر خطی در جهت عمودی (غوطه‌وری) (k_l و k_{nl}) و سفتی‌های خطی و غیر خطی پیچشی (ka_l و ka_{nl})، در نظر گرفته می‌شود. سپس یک جاذب برداشت انرژی پیزوالکتریک به یک سیستم دو درجه آزادی غیر خطی متصل شده‌است. هم‌چنین برای بررسی پاسخ‌های ارتعاشی و رزونانسی غیر خطی سیستم از تئوری اغتشاشات و یا روش‌های عددی در تحلیل سیستم استفاده می‌شود.

^۱Airfoil



شکل ۱۴ شماتیک ایرفویل ناشی از تحریک‌های هم‌زمان پایه و جریان و جاذب‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک

در سال‌های اخیر باتوجه به اهمیت محیط‌زیست و اقتصاد، تحقیقات فراوانی در زمینه برداشت انرژی انجام شده‌است و مطالعه تأثیر پارامترها و روش‌های مختلف به‌منظور افزایش کارایی آن‌ها توسط محققان افزایش یافته و روزبه‌روز به کارایی آن‌ها افزوده می‌شود. با توجه به سوابق مطالعات، تحقیقات بر روی جاذب‌های برداشت انرژی انجام شده‌است ولی بررسی تأثیر پارامترها بر روی برداشت انرژی یک ایرفول کمتر مورد توجه واقع شده‌است، لذا در این تحقیق به مدل‌سازی غیر خطی و تحلیل ارتعاشات یک ایرفول به‌منظور بررسی پتانسیل جاذب‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک تحت تحریک‌های هم‌زمان پایه و جریان پرداخته خواهد شد. نوآوری و تفاوت تحقیق پیشنهادی نسبت به دیگر تحقیقات بصورت زیر می‌باشد:

۱- ارائه یک مدل غیر خطی با در نظر گرفتن سفتی‌های خطی و غیر خطی در جهت عمودی (غوطه‌وری) و پیچشی برای یک ایرفول که به صورت یک سیستم دو درجه آزادی در نظر گرفته شده است

۲- در نظر گرفتن رزونانس‌های داخلی و تأثیر آن‌ها در برداشت انرژی

۳- بررسی پاسخ رژیم‌های دینامیکی براساس مدل جدید پیشنهادی

فصل ۳: مدلسازی

۱-۳ مقدمه

در این قسمت، ابتدا سیستم را از نظر دینامیکی مدل سازی شده و معادلات حاکم بر حرکت سیستم با در نظر گرفتن تأثیر سفتی های خطی و غیر خطی غوطه وری و پیچشی، استخراج شده و سپس با استفاده از روش های مرسوم غیر خطی همانند تئوری اغتشاشات و روش مقیاس های چندگانه به بررسی پاسخ رژیم های دینامیکی پرداخته خواهد شد.

ابتدا یک ایرفول تحت تحریک های هم زمان پایه و جریان، مطابق شکل ۱۴ به صورت یک سیستم دو درجه آزادی غیر خطی با سفتی های خطی و غیر خطی در جهت عمودی (غوطه وری) (k_l و k_{nl}) و سفتی های خطی و غیر خطی پیچشی (ka_l و ka_{nl})، در نظر گرفته می شود. سپس یک جاذب برداشت انرژی پیزوالکتریک به یک سیستم دو درجه آزادی غیر خطی متصل شده است. همچنین برای بررسی پاسخ های ارتعاشی و رزونانسی غیر خطی سیستم از روش هایی مانند تئوری اغتشاشات و یا روش های عددی در تحلیل سیستم استفاده می شود.

۲-۳ بررسی رزونانس داخلی یک ایرفویل با استفاده سفتی خطی

۱-۲-۳ مدل سازی دینامیکی برداشت انرژی

همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، برداشت کننده انرژی از یک ایرفویل صلب با درجات آزادی غوطه وری و پیچشی تشکیل شده است و اتصال پیزوالکتریک به درجه آزادی غوطه وری معرفی شده است. معادلات حاکم بر برداشت کننده تحت تحریکات پایه و جریان همزمان به صورت نوشته می شود [۴۵]:

$$\begin{aligned}
m_T \ddot{h} + m_w x_a b \ddot{\alpha} + c_h (\dot{h} - \dot{z}) + k_l h + k_{nl} h^3 - \theta V &= -L \\
m_w x_a b \ddot{h} + I_\alpha \ddot{\alpha} + c_\alpha \dot{\alpha} + k a_l \alpha + k a_{nl} \alpha^3 &= T \\
C_p \dot{V} + \frac{V}{R_l} + \theta (\dot{h} - \dot{z}) &= 0
\end{aligned}
\tag{۱-۳}$$

که در عبارت بالا h و α جابجایی‌های غوطه‌وری و پیچش ایرفویل هستند. b طول نیم وتر است. x_α فاصله بی‌بعد بین مرکز جرم و محور الاستیک است. z نشان دهنده تحریک پایه در جهت غوطه‌ور شدن است. m_T و m_w پارامترهای جرمی ایرفویل هستند که مربوط به جرم خود ایرفویل و جرم ایرفویل در حالت غوطه‌وری می‌باشد. I_α گشتاور جرمی اینرسی حول محور الاستیک است. L و T به ترتیب نیروی بالابری و گشتاور آیرودینامیکی هستند که بر روی ایرفویل عمل می‌کنند. k_l و k_{nl} سفتی‌های خطی و غیر خطی در جهت عمودی (غوطه‌وری) و $k a_l$ و $k a_{nl}$ سفتی‌های خطی و غیر خطی پیچشی هستند. R_l مقاومت و V ولتاژ مقاومت بار است. C_p ظرفیت ماده پیزوالکتریک است. θ عبارت اتصال الکترومکانیکی ماده پیزوالکتریک است. C_h و C_α ضرایب میرایی در جهت غوطه‌وری و پیچش هستند.

یک مدل آیرودینامیکی شبه پایا با اثرات استال^۱ برای محاسبه بارهای آیرودینامیکی اجرا شده است.

$$\begin{aligned}
L &= \rho_\infty U_\infty^2 b c_{l\alpha} (\alpha_{eff} - c_s \alpha_{eff}^3) \\
T &= \rho_\infty U_\infty^2 b c_{t\alpha} (\alpha_{eff} - c_s \alpha_{eff}^3)
\end{aligned}
\tag{۲-۳}$$

در جایی که α_{eff} زاویه حمله موثر است، U_∞ سرعت جریان آزاد است، $c_{l\alpha}$ و $c_{t\alpha}$ ضرایب برا و گشتاور آیرودینامیکی هستند. c_s یک پارامتر غیر خطی است که با اثرات استال مرتبط است. زاویه موثر حمله α_{eff} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_{eff} = \alpha + \frac{\dot{h}}{U_\infty} + \left(\frac{1}{2} - a\right) \frac{b \dot{\alpha}}{U_\infty}
\tag{۳-۳}$$

معادلات را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

^۱Stall

$$M\ddot{\eta} + K\eta + (C\dot{\eta} - C_1\dot{z}) = Q\left(\eta_2 + \frac{\dot{\eta}_1}{U_\infty} + b_0\dot{\eta}_2\right)^3 + PV \quad (4-3)$$

$$\dot{V} + R_0V + X_p(\dot{\eta}_1 - \dot{z}) = 0$$

که در این عبارات:

$$M = \begin{bmatrix} m_T & s_\alpha \\ s_\alpha & I_\alpha \end{bmatrix} \quad K_l = \begin{bmatrix} k_l & -L_s \\ 0 & ka_l - T_s \end{bmatrix} \quad K_t = \begin{bmatrix} k_{nl} & 0 \\ 0 & ka_{nl} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_h - L_s/U_\infty & -L_s b_0 \\ 0 & c_\alpha - T_s b_0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{pmatrix} c_h \\ 0 \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} L_s c_s \\ T_s c_s \end{pmatrix} \quad P = \begin{pmatrix} \theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad \eta = \begin{pmatrix} h \\ \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix} \quad (5-3)$$

$$s_\alpha = m_w x_\alpha b \quad L_s = -\rho_\infty U_\infty^2 b c_{l\alpha} \quad T_s = \rho_\infty U_\infty^2 b^2 c_{t\alpha} \quad c_{t\alpha} = \left(\frac{1}{2} + a\right) c_{l\alpha}$$

$$b_0 = \left(\frac{1}{2} - a\right) \frac{b}{U_\infty} \quad R_0 = \frac{1}{c_p R_l} \quad X_P = \frac{\theta}{c_p}$$

۳-۲-۲ راه حل‌های تحلیل تقریبی تشدید داخلی

در این بخش، دینامیک غیرخطی برداشت کننده انرژی توسط معادله (۴) شرح داده و از طریق روش مقیاس های چندگانه بررسی می‌شوند. فرض می‌کنیم که تحریک پایه هارمونیک است، یعنی $z = z_0 \sin \Omega t$ که در آن z_0 و Ω دامنه و فرکانس تحریک پایه هستند.

فرض بر این است که میرایی، کوپلینگ الکترومکانیکی و تحریک پایه کوچک هستند و یک پارامتر کوچک ε برای تغییر مقیاس متغیرهای زیر معرفی شده است.

$$C \rightarrow \varepsilon^2 C \quad C_1 \rightarrow \varepsilon^2 C_1 \quad P \rightarrow \varepsilon^2 P \quad z \rightarrow \varepsilon^2 z \quad (6-3)$$

معادلات حاکم بر سیستم برداشت انرژی را می‌توان به صورت بازنویسی کرد:

$$M\ddot{\eta} + K_l\eta + K_{nl}\eta^3 + \varepsilon^2 C\dot{\eta} = Q \left(\eta_2 + \frac{\dot{\eta}_1}{U_\infty} + b_0\dot{\eta}_2 \right)^3 + \varepsilon^2 PV + \varepsilon^3 C_1\dot{z} \quad (۷-۳)$$

$$\dot{V} + R_0V + X_p\dot{\eta}_1 - \varepsilon X_p\dot{z} = 0$$

از آن جایی که غیرخطی بودن سیستم برداشت انرژی مکعبی است، حل تحلیلی تقریبی معادله (۷) را می‌توان به صورت بیان کرد:

$$\eta = \varepsilon\eta_1(T_0 + T_2 + \dots) + \varepsilon^3\eta_3(T_0 + T_2 + \dots) + O(\varepsilon^4) \quad (۸-۳)$$

$$V = \varepsilon V_1(T_0 + T_2 + \dots) + \varepsilon^3 V_3(T_0 + T_2 + \dots) + O(\varepsilon^4)$$

که $T_r = \varepsilon^r t$ و $r=0,2,\dots$ مقیاس‌های مختلف زمانی را نشان می‌دهند.

با جایگذاری معادله ۷ در ۸ و برابر قرار دادن عبارات با توان‌های یکسان ۱ و ۳ خواهیم داشت:

$$MD_0^2\eta_1 + K\eta_1 = 0 \quad (۹-۳)$$

$$D_0V_1 + R_0V_1 + x_pD_0\eta_{10} - x_p\dot{z} = 0$$

$$MD_0^2\eta_3 + K\eta_3 = -2MD_2D_0\eta_1 - CD_0\eta_1 + Q \left(\eta_2 + \frac{\dot{\eta}_1}{U_\infty} + b_0\dot{\eta}_2 \right)^3 + PV_1 + C_1\dot{z}\eta_1 + K_{nl} \quad (۱۰-۳)$$

$$D_0V_3 + R_0V_3 = -D_2V_1 - x_p(D_2\eta_{11} + D_0\eta_{31})$$

که در آن $D_r = \partial/\partial T_r$ نشان‌دهنده عمل‌گرهای دیفرانسیل جزئی می‌باشد. راه حل تقریبی مرتبه اول را

می‌توان با حل معادله به دست آورد:

$$\eta_1 = A_1 e^{i\omega_1 T_0} p_1 + A_2 e^{i\omega_2 T_0} p_2 + cc \quad (۱۱-۳)$$

$$V_1 = -\frac{X_p i\omega_1}{i\omega_1 + R_0} A_1 e^{i\omega_1 T_0} p_{11} - \frac{X_p i\omega_1}{i\omega_1 + R_0} A_2 e^{i\omega_2 T_0} p_{21} + \frac{X_p \Omega}{i\Omega + R_0} z_1 + cc$$

که $z_1 = \frac{z_0}{2} e^{i\Omega T_0}$ و cc مزدوج مختلط عبارات را نشان می‌دهد. p_{11} و p_{21} ورودی های اول بردارهای P_1 و P_2 می‌باشد. ω_1, ω_2, P_1 و P_2 به ترتیب فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های حالت سیستم برداشت انرژی خطی شده را نشان می‌دهند که مسئله مقدار ویژه زیر را برآورده می‌کند.

$$\omega_j^2 p_j = M^{-1} K p_j \quad (j = 1, 2) \quad (12-3)$$

Ω_j و P_j را می‌توان از حل معادله (12-3) به صورت زیر به دست آورد:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{\Gamma_\omega \mp \sqrt{\Gamma_\omega^2 - 4(m_T I_\alpha - s_\alpha^2) k_l (k a_l - T_s)}}{2(m_T I_\alpha - s_\alpha^2)} \quad (13-3)$$

$$p_j = \begin{pmatrix} p_{j1} \\ p_{j2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Lambda_j \\ 1 \end{pmatrix}$$

که در آن:

$$\Gamma_\omega = m_T k a_{nl} - m_T T_s + k_l I_\alpha + L_s s_\alpha$$

$$\Lambda_j = \frac{L_s + \omega_j^2 s_\alpha}{k_l - \omega_j^2 m_T} = \frac{k a_l - T_s - \omega_j^2 I_\alpha}{\omega_j^2 s_\alpha} \quad (14-3)$$

می‌باشد.

از آنجایی که غیر خطی بودن سیستم برداشت انرژی، مکعبی است، ممکن است زمانی که دو فرکانس طبیعی رابطه $\omega_2 = 3\omega_1$ را برآورده کنند، سیستم تحت رزونانس داخلی ۳ به ۱ قرار گیرد. با توجه به معادله (۱۳)، شرط رزونانس داخلی ۳ به ۱ را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$(m_T k_\alpha - m_T T_s + k_h I_\alpha + L_s s_\alpha)^2 = \frac{100}{9} (m_T I_\alpha - s_\alpha^2) k_l (k a_l - T_s) \quad (15-3)$$

سپس، رزونانس داخلی ۳ به ۱ زمانی که فرکانس تحریک پایه نزدیک به اولین فرکانس مودال سیستم برداشت انرژی باشد، با جزئیات بررسی می‌شود. دو پارامتر جداسازی σ و σ_0 به صورت تعریف می‌شوند:

$$\Omega = \omega_1 + \varepsilon^2 \sigma_0 \quad \omega_2 = 3\omega_1 + \varepsilon^2 \sigma \quad (۱۶-۳)$$

که به ترتیب برای توصیف نزدیکی ω_2 به $3\omega_1$ و Ω به ω_1 استفاده می‌شود.

با جایگذاری فرمول (۱۱-۳) در (۱۰-۳) و حذف سکولار ترم‌ها می‌توان شرایط حل‌پذیری زیر را به دست آورد:

$$\begin{aligned} z_1^T & [-2M_i \omega_1 p_1 D_2 A_1 - C i \omega_1 p_1 A_1 + P \left(-\frac{X_p i \omega_1}{i \omega_1 + R_0} A_1 p_{11} \right) \\ & + Q(a_{11} A_1^2 \bar{A}_1 + a_{12} A_1 A_2 \bar{A}_2) + Q a_{13} A_2 \bar{A}_1^2 e^{i \sigma_0 T_2} + \\ & \frac{1}{2} (F + P \frac{X_p \Omega Z_0}{i \Omega + R_0}) e^{i \sigma_0 T_2}] = 0 \end{aligned} \quad (۱۷-۳)$$

$$\begin{aligned} z_2^T & [-2\omega_2 p_2 D_2 A_2 - C i \omega_2 p_2 A_2 + P \left(-\frac{X_p i \omega_2}{i \omega_2 + R_0} A_2 p_{21} \right) \\ & + Q(a_{21} A_1 \bar{A}_1 A_2 + a_{22} A_2^2 \bar{A}_1) + Q a_{31} e^{-i \sigma_0 T_2}] = 0 \end{aligned} \quad (۱۸-۳)$$

که $F = C_1 \Omega Z_0$ می‌باشد. همچنین z_1 و z_2 از حل معادله زیر (۱۹-۳) بدست می‌آید:

$$\omega_j^2 M^T z_j = K^T z_j \quad (j = 1, 2) \quad (۱۹-۳)$$

لازم به ذکر است که z_1 و z_2 بردارهای ویژه هستند که می‌توان آنها را به صورت $z_1^T (2M \omega_1 p_1) = 1$ و $z_2^T (2M \omega_2 p_2) = 1$ نرمال نمود. با حل معادله (۱۹-۳)، z_1 و z_2 را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{1}{N_{10}} \begin{pmatrix} \frac{\omega_1^2 s_\alpha}{k_l - \omega_1^2 m_T} \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{N_{10}} \begin{pmatrix} \Lambda'_1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ z_2 &= \frac{1}{N_{20}} \begin{pmatrix} \frac{\omega_2^2 s_\alpha}{k_l - \omega_2^2 m_T} \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{N_{20}} \begin{pmatrix} \Lambda'_2 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (۲۰-۳)$$

که

$$N_{j0} = 2\omega_j^2 \left(\frac{\omega_j^2 s_\alpha m_T (L_s + \omega_j^2 s_\alpha)}{(k_l - \omega_j^2 m_T)^2} + \frac{\omega_j^2 s_\alpha}{k_l - \omega_j^2 m_T} + \frac{s_\alpha (L_s + \omega_j^2 s_\alpha)}{k_l - \omega_j^2 m_T} + I_\alpha \right) \quad (۲۱-۳)$$

$$j = 1, 2$$

با جایگذاری $A_1(T_2) = \frac{1}{2}a_1(T_2)e^{i\beta_1(T_2)}$ و $A_2(T_2) = \frac{1}{2}a_2(T_2)e^{i\beta_2(T_2)}$ در معادلات (۱۷-۳) و

(۱۸-۳) و جداسازی بخش حقیقی و موهومی خواهیم داشت:

$$a_1' + \alpha_2 a_1 + \frac{1}{4}\alpha_4 a_1^3 + \frac{1}{4}\alpha_6 a_1 a_2^2 + \frac{1}{4}a_1^2 a_2 (\alpha_8 \cos(\gamma) - \alpha_9 \sin(\gamma)) \quad (22-3)$$

$$+ \alpha_{10} \cos(\gamma_0) - \alpha_{11} \sin(\gamma_0) = 0$$

$$a_1 \beta_1' + \alpha_3 a_1 + \frac{1}{4}\alpha_5 a_1^3 + \frac{1}{4}\alpha_7 a_1 a_2^2 + \frac{1}{4}a_1^2 a_2 (\alpha_8 \cos(\gamma) - \alpha_9 \sin(\gamma)) \quad (23-3)$$

$$+ \alpha_{11} \cos(\gamma_0) - \alpha_{10} \sin(\gamma_0) = 0$$

$$a_2' + \gamma_2 a_2 + \frac{1}{4}\gamma_4 a_2^3 + \frac{1}{4}\gamma_6 a_1^2 a_2 + \frac{1}{4}a_1^3 (\gamma_8 \cos(\gamma) - \gamma_9 \sin(\gamma)) = 0 \quad (24-3)$$

$$a_2 \beta_2' + \gamma_3 a_2 + \frac{1}{4}\gamma_5 a_2^3 + \frac{1}{4}\gamma_7 a_1^2 a_2 + \frac{1}{4}a_1^3 (\gamma_9 \cos(\gamma) - \gamma_8 \sin(\gamma)) = 0 \quad (25-3)$$

که (') مشتق نسبت به T_2 می باشد. γ_0 و γ به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\gamma_0(T_2) = \sigma_0 T_2 - \beta_1(T_2) \quad (26-3)$$

$$\gamma(T_2) = \beta_2(T_2) - 3\beta_1(T_2) + \sigma T_2 \quad (27-3)$$

بنابراین، راه حل تقریبی مرتبه اول رزونانس داخلی ۳ به ۱ را می توان به صورت تحلیلی به دست آورد:

$$\eta_1 = \varepsilon(a_1 p_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1) + a_2 p_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2))$$

$$V_1 = \varepsilon \left(-\frac{X_p \omega_1^2}{\omega_1^2 + R_0^2} a_1 \Lambda_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1) + \frac{X_p \omega_1 R_0}{\omega_1^2 + R_0^2} a_1 \Lambda_1 \sin(\omega_1 t + \beta_1) \right) \quad (28-3)$$

$$+ \varepsilon \left(-\frac{X_p \omega_2^2}{\omega_2^2 + R_0^2} a_2 \Lambda_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2) + \frac{X_p \omega_2 R_0}{\omega_2^2 + R_0^2} a_2 \Lambda_2 \sin(\omega_2 t + \beta_2) \right)$$

$$+ \varepsilon \frac{z_0 X_p \Omega}{\Omega^2 + R_0^2} (R_o \cos(\Omega t) + \Omega \sin(\Omega t))$$

با مشتق گرفتن از روابط (۲۶-۳) و (۲۷-۳) و جایگذاری β_1 داریم:

$$\dot{\gamma}_0(T_2) = \sigma_0 - \dot{\beta}_1(T_2) \Rightarrow \dot{\beta}_1(T_2) = \sigma_0 - \dot{\gamma}_0(T_2) \quad (29-3)$$

$$\dot{\gamma}(T_2) = \dot{\beta}_2(T_2) - 3\dot{\beta}_1(T_2) + \sigma \Rightarrow \dot{\beta}_2(T_2) = \dot{\gamma}(T_2) + 3\dot{\beta}_1(T_2) - \sigma \quad (30-3)$$

$$\stackrel{3-29}{\Rightarrow} \dot{\beta}_2(T_2) = \dot{\gamma}(T_2) + 3(\sigma_0 - \dot{\gamma}_0(T_2)) - \sigma$$

از جایگذاری (29-3) و (30-3) در معادله (23-3) و (24-3) داریم:

$$\begin{aligned} a_1 \dot{\gamma}_0 = & a_1 \sigma_0 + \alpha_3 a_1 + \frac{1}{4} \alpha_5 a_1^3 + \frac{1}{4} \alpha_7 a_1 a_2^2 + \frac{1}{4} a_1^2 a_2 (\alpha_8 \cos(\gamma) - \alpha_9 \sin(\gamma)) \\ & + \alpha_{11} \cos(\gamma_0) - \alpha_{10} \sin(\gamma_0) \end{aligned} \quad (31-3)$$

$$\begin{aligned} a_2 \dot{\gamma} = & -\gamma_3 a_2 - \frac{1}{4} \gamma_5 a_2^3 - \frac{1}{4} \gamma_7 a_1^2 a_2 - \frac{1}{4} a_1^3 (\gamma_9 \cos(\gamma) - \gamma_8 \sin(\gamma)) + 3\alpha_3 a_2 \\ & + \frac{3}{4} \alpha_5 a_1^3 a_2 + \frac{3}{4} \alpha_7 a_2^3 + \frac{3}{4} a_2^2 a_1 (\alpha_8 \cos(\gamma) + \alpha_9 \sin(\gamma)) + a_2 \sigma \\ & + 3\alpha_{10} \frac{a_2}{a_1} \sin(\gamma_0) + 3\alpha_{11} \frac{a_2}{a_1} \cos(\gamma_0) \end{aligned} \quad (32-3)$$

با قرار دادن $\dot{\gamma} = 0$ ، $\dot{\gamma}_0 = 0$ ، $a'_1 = 0$ و $a'_2 = 0$ پاسخ حالت پایدار را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\begin{aligned} \alpha_2 a_1 + \frac{1}{4} \alpha_4 a_1^3 + \frac{1}{4} \alpha_6 a_1 a_2^2 + \frac{1}{4} a_1^2 a_2 (\alpha_8 \cos(\gamma) - \alpha_9 \sin(\gamma)) + \alpha_{10} \cos(\gamma_0) \\ - \alpha_{11} \sin(\gamma_0) = 0 \end{aligned} \quad (33-3)$$

$$\gamma_2 a_2 + \frac{1}{4} \gamma_4 a_2^3 + \frac{1}{4} \gamma_6 a_1^2 a_2 + \frac{1}{4} a_1^3 (\gamma_9 \cos(\gamma) - \gamma_8 \sin(\gamma)) = 0 \quad (34-3)$$

$$\begin{aligned} a_1 \sigma_0 + \alpha_3 a_1 + \frac{1}{4} \alpha_5 a_1^3 + \frac{1}{4} \alpha_7 a_1 a_2^2 + \frac{1}{4} a_1^2 a_2 (\alpha_8 \cos(\gamma) - \alpha_9 \sin(\gamma)) \\ + \alpha_{11} \cos(\gamma_0) - \alpha_{10} \sin(\gamma_0) \end{aligned} \quad (35-3)$$

$$\begin{aligned} -\gamma_3 a_2 - \frac{1}{4} \gamma_5 a_2^3 - \frac{1}{4} \gamma_7 a_1^2 a_2 - \frac{1}{4} a_1^3 (\gamma_9 \cos(\gamma) - \gamma_8 \sin(\gamma)) + 3\alpha_3 a_2 \\ + \frac{3}{4} \alpha_5 a_1^3 a_2 + \frac{3}{4} \alpha_7 a_2^3 + \frac{3}{4} a_2^2 a_1 (\alpha_8 \cos(\gamma) + \alpha_9 \sin(\gamma)) \\ + a_2 \sigma + 3\alpha_{10} \frac{a_2}{a_1} \sin(\gamma_0) + 3\alpha_{11} \frac{a_2}{a_1} \cos(\gamma_0) \end{aligned} \quad (36-3)$$

معادله (۳۳-۳۶) روابط دامنه های مودال a_1 و a_2 را با توجه به پارامترهای مختلف سیستم نشان می دهد. دامنه ولتاژ برداشت شده را نیز می توان بر اساس معادله ۲۸ و (۳۱-۳۴) بدست آورد. لازم به ذکر است که ارتعاش حالت جفت شده سیستم برداشت انرژی با راه حل های حالت پایدار معادلات (۲۲-۳)، (۲۴-۳)، (۲۹-۳) و (۳۰-۳) و پایداری ارتعاش حالت جفت شده با حل های ثابت معادلات مدولاسیون مطابقت دارد. اگر مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین معادلات مدولاسیون در راه حل های حالت پایدار مربوطه در سمت چپ محور مختلط باشد، ارتعاش پایدار است.

فصل ۴ : ارائه نتایج

۱-۴ مقدمه

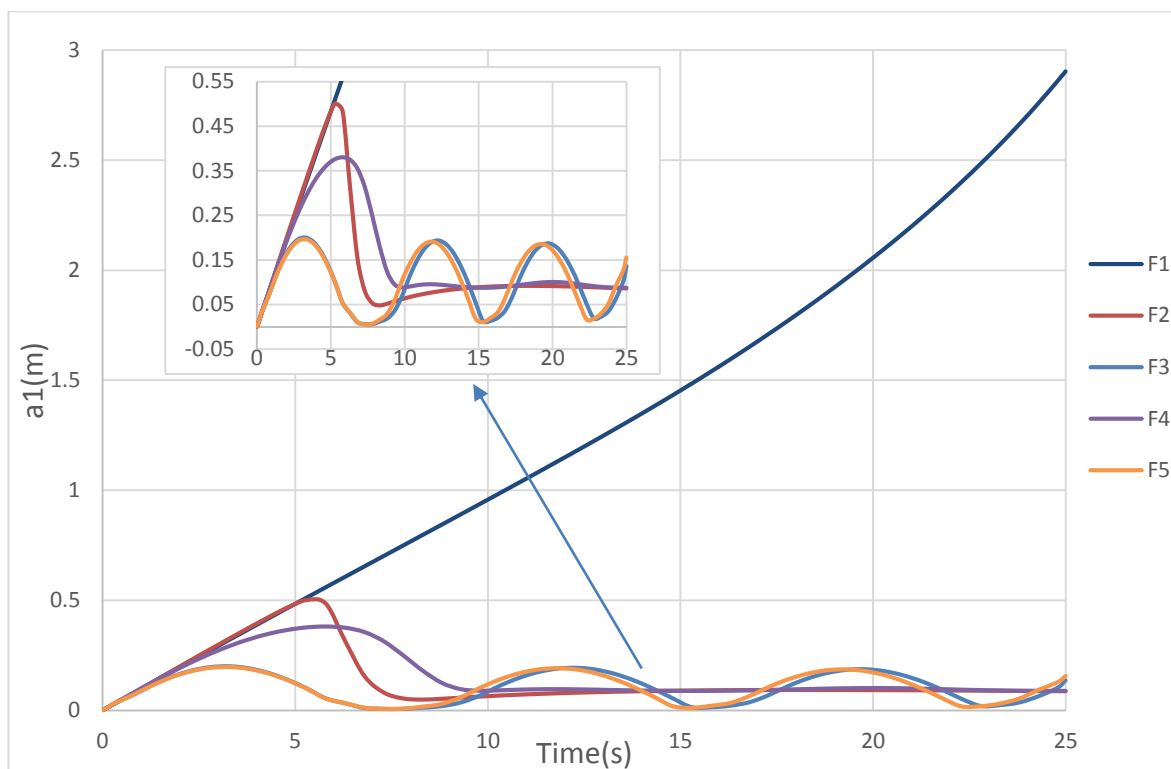
در این بخش ابتدا به بررسی تاثیر پارامترهای سیستم بر عملکرد برداشت کننده انرژی بر اساس راه حل های تحلیلی بررسی شده است. سپس به تجزیه و تحلیل نمودارها ترسیم شده می پردازیم. مشخصات فیزیکی سیستم در جدول ۱-۴ آمده است.

جدول ۱، مشخصات فیزیکی سیستم

b (m)	0.135	c_h (N s/m)	27.43
x_α	0.331	c_α (N s/m)	0.001
m_w (kg)	2.049	θ (N/V)	0.00155
m_T (kg)	12.387	C_p (F)	1.2e-7
I_α (kg m ²)	0.0558	R_l (Ω)	1.0e5
k_l (N/m)	2380	ρ_∞ (kg/m ³)	1.225
k_{nl} (N/m)	1500	$c_{l\alpha}$	6.28
ka_l (N m/rad)	1.2	c_s	10.11
ka_{nl} (N m/rad)	0.75	a (m)	-0.5

۲-۴ نتایج

با توجه به نمودارها که با تغییر پارامترهای موثر رسم شده است- همان طور که می بینیم-اثرگذاری ε فقط در نمودارهای $V-t$ می باشد که دامنه V را به همان نسبت در ε ضرب کرده است. همچنین پارامتر U که سرعت هوا می باشد و σ که پارامتر جدا ساز می باشد در a_1 و a_2 بیشترین تاثیر را داشته است. در مورد تاثیر پارامترهای غیر خطی در کنار پارامترهای خطی از مقایسه با نمودارها با پارامترهای خطی می توان نتیجه گرفت که اعمال ارتعاشات غیرخطی می تواند به بررسی دقیق تر برداشت کننده انرژی منجر شده و همان طور که در نمودارها مشخص است میزان اثرگذاری این پارامترها در شرایط یکسان به مراتب بیشتر از حالت خطی می باشد.



شکل ۱۵- نمودار a_2 بر حسب t ، در حالت های مختلف

هر کدام از خطوط نمودار در حالت های مختلفی رسم شده که جدول آن به شرح زیر می باشد:

جدول ۲- راهنمای خطوط نمودار

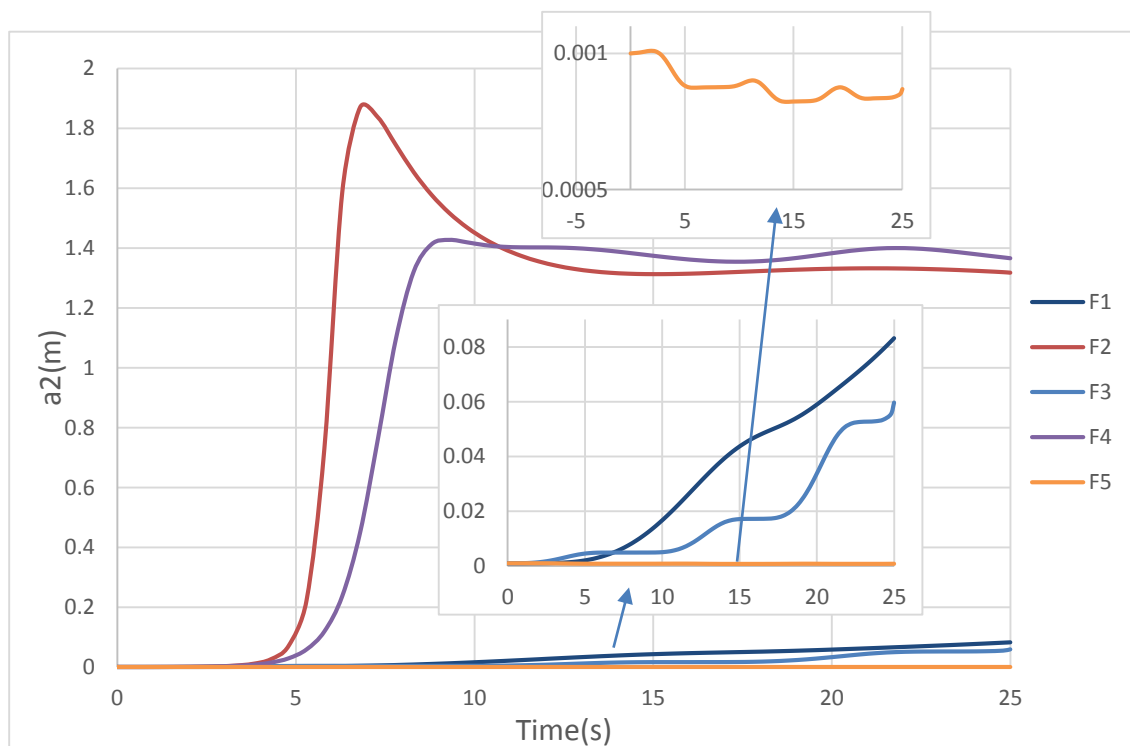
σ	σ_0	ε	z_0	$U(m/s)$	پارامتر شکل نمودار
0	0	1	0.015	2	F1
0	0	0.1	0.015	2	F1
0	0	0.05	0.015	2	F1
0	0	0.01	0.015	2	F1
0	0	0.01	0.015	5	F2
0	0	0.05	0.015	5	F2
1	1	0.05	0.015	5	F3
1	1	0.1	0.015	5	F3
0.5	0.5	0.05	0.15	2.5	F4
1	1	0.05	0.15	5	F5
1	1	0.05	1.5	5	F5

با توجه به نمودار و جدول مشخص می شود که ε در مقادیر a_1 و a_2 تاثیرگذار نیست و اعداد هیچ تغییری نمی کنند.

از مقایسه ی خطوط نمودارها و با توجه به جدول دیده می شود که تغییر سرعت هوا تاثیر قابل توجهی در مقادیر a_1 و a_2 داشته است.

با تغییر σ_0 و σ دیده می شود که شکل نمودار تغییر کرده و در یک بازه متناوب تکرار می شود.

همچنین دامنه تحریک پایه نیز در آن تاثیرگذار نخواهد بود.

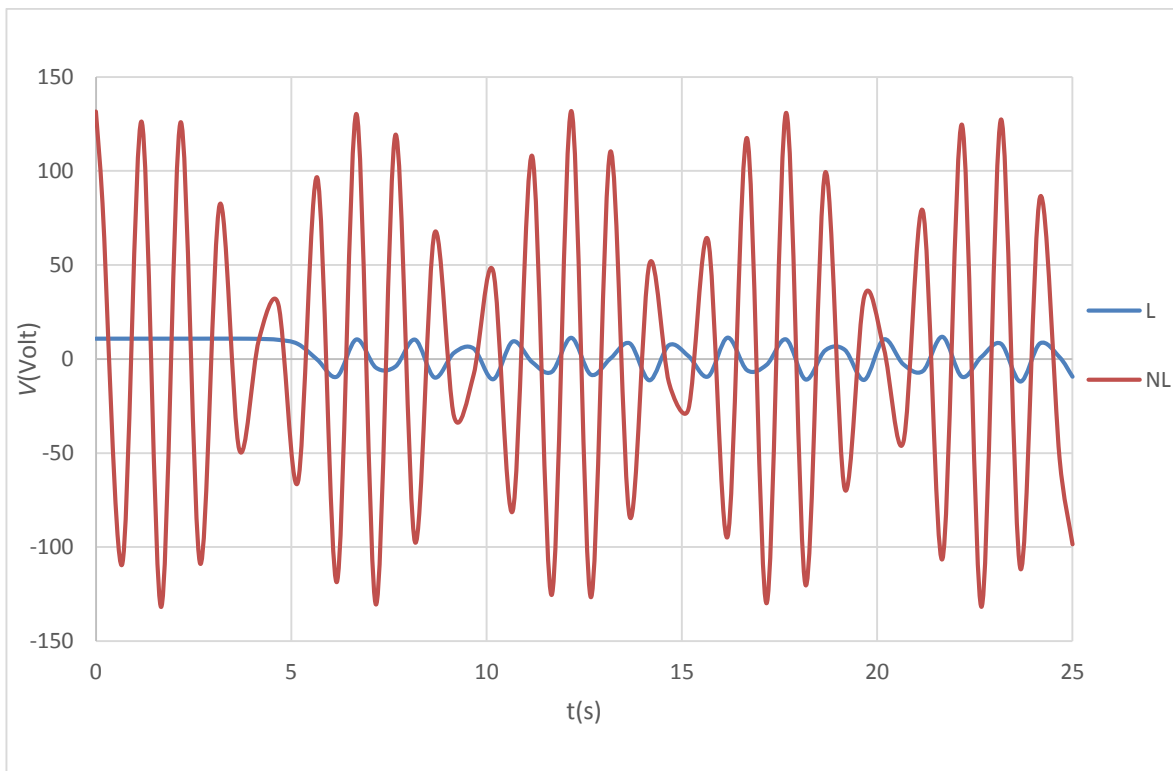


شکل ۱۶، نمودار a_2 بر حسب t ، در حالت های مختلف

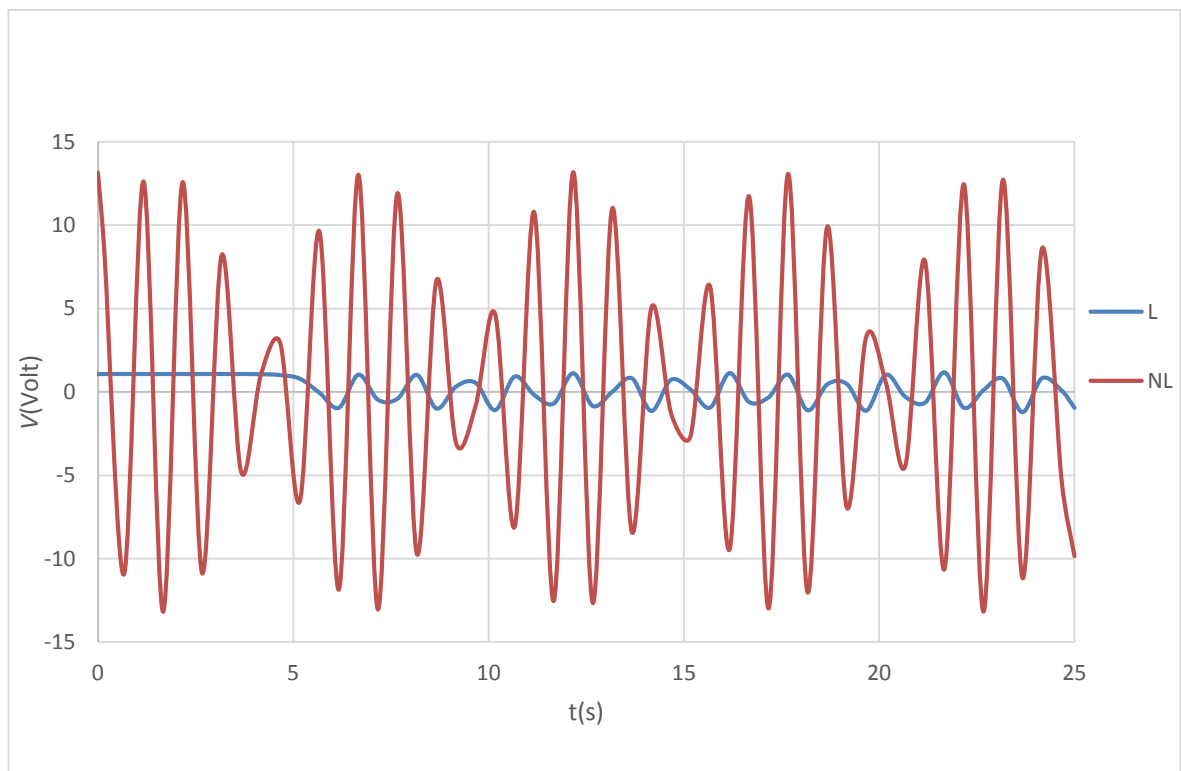
در a_2 نیز همان شرایط گفته شده در مقایسه های a_1 صادق است.

در ادامه نمودارهای مربوط به ولتاژ نسبت به زمان آورده که میزان ولتاژ بین دو حالت خطی و غیرخطی با پارامترهای مختلف بررسی شده است. در نمودارهای ۱۹-۳۵، L مربوط به حالت خطی و NL مربوط به

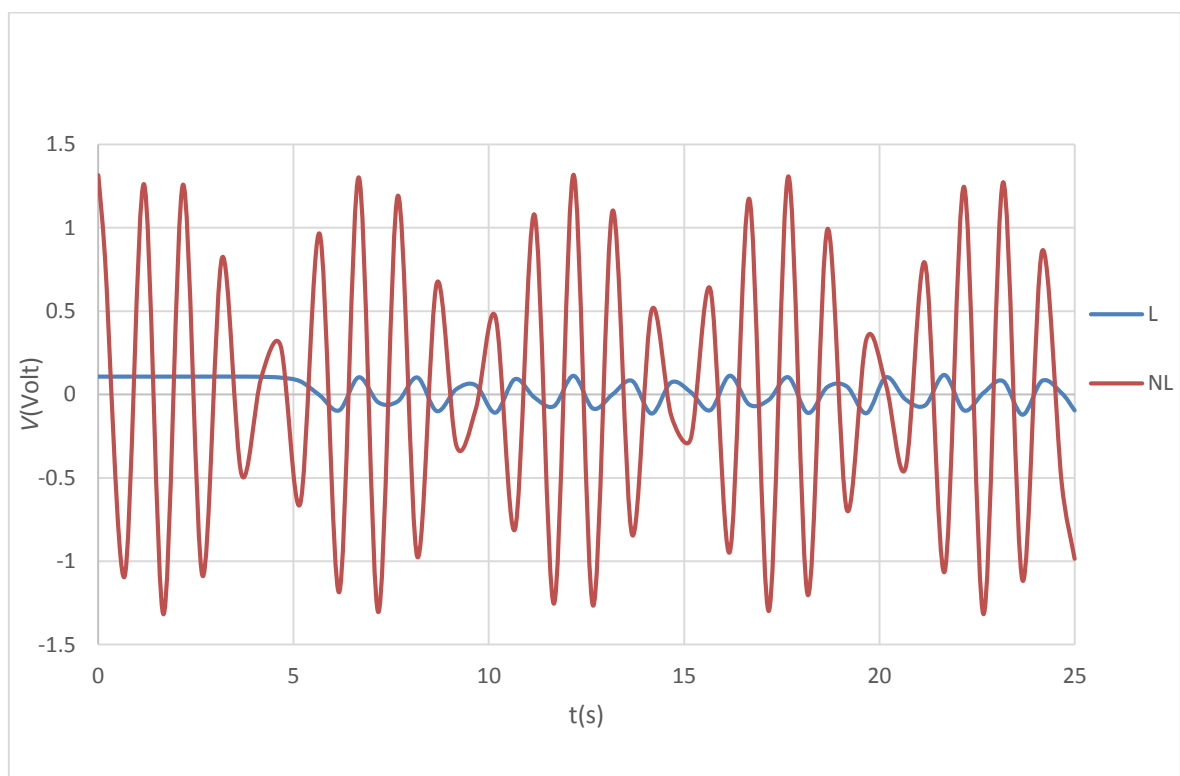
حالت غیرخطی می باشد.



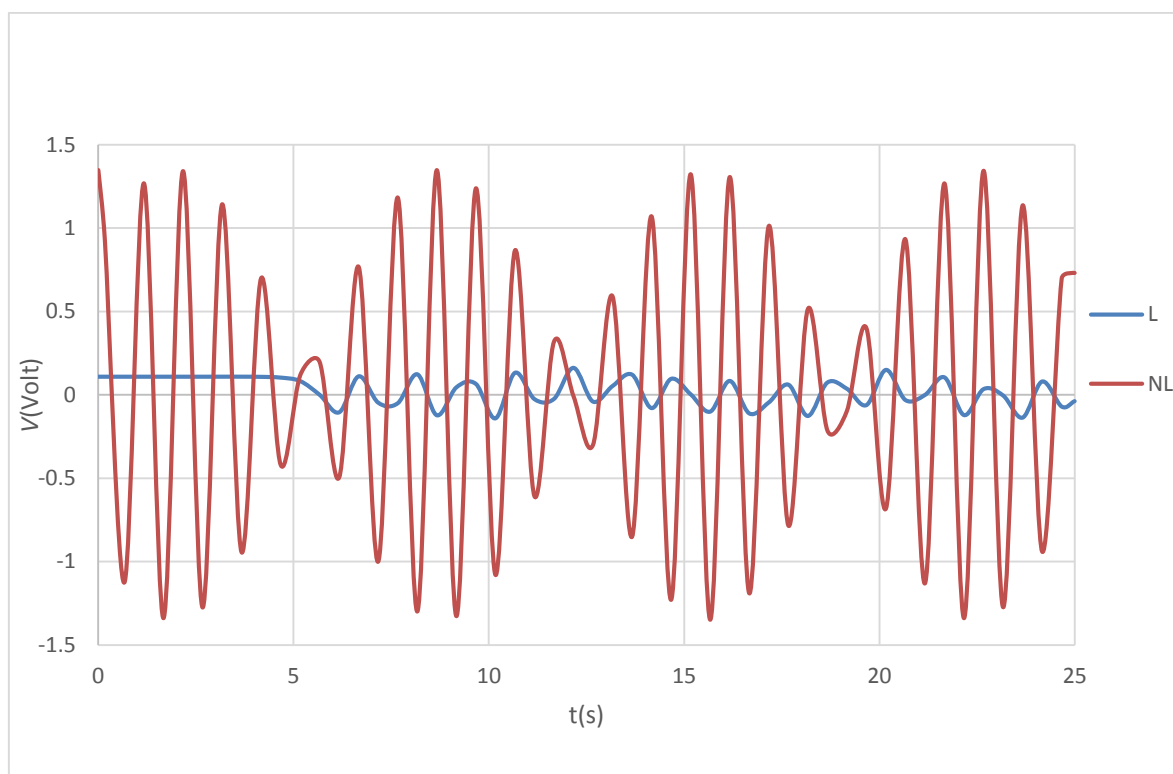
شکل ۱۷، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=1, z_0=0.015, U=2\text{m/s}$



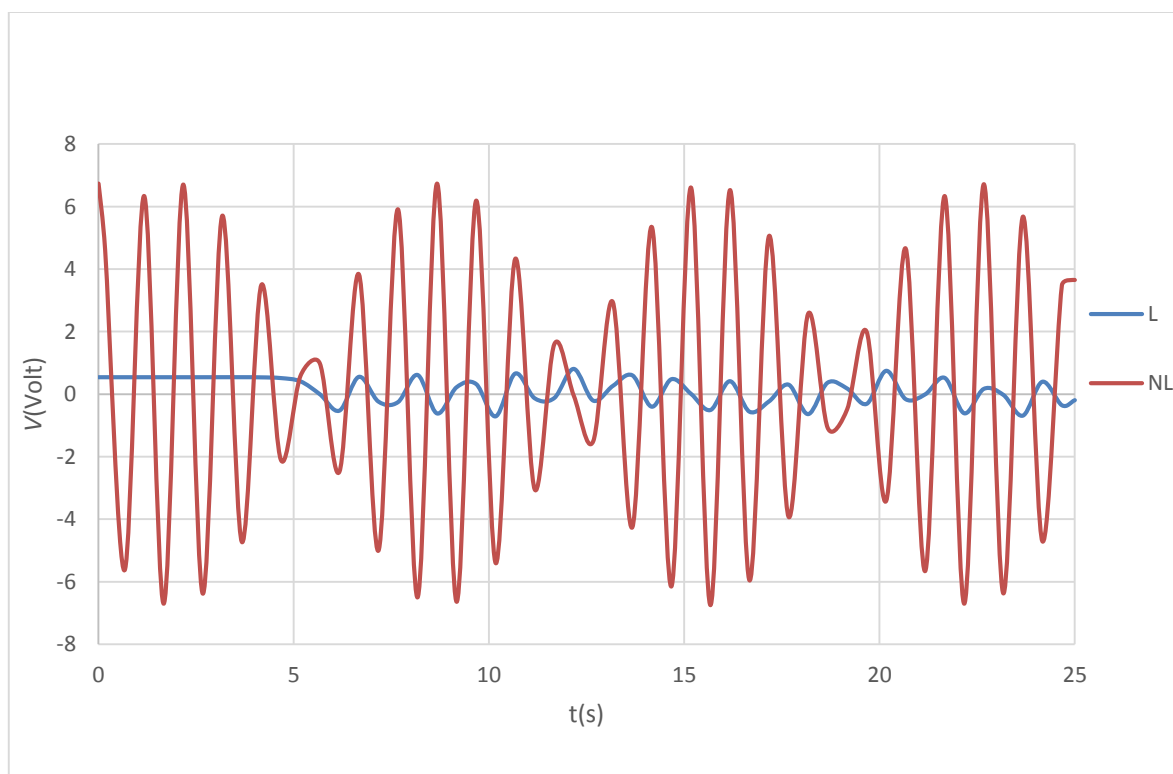
شکل ۱۸، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=2\text{m/s}$



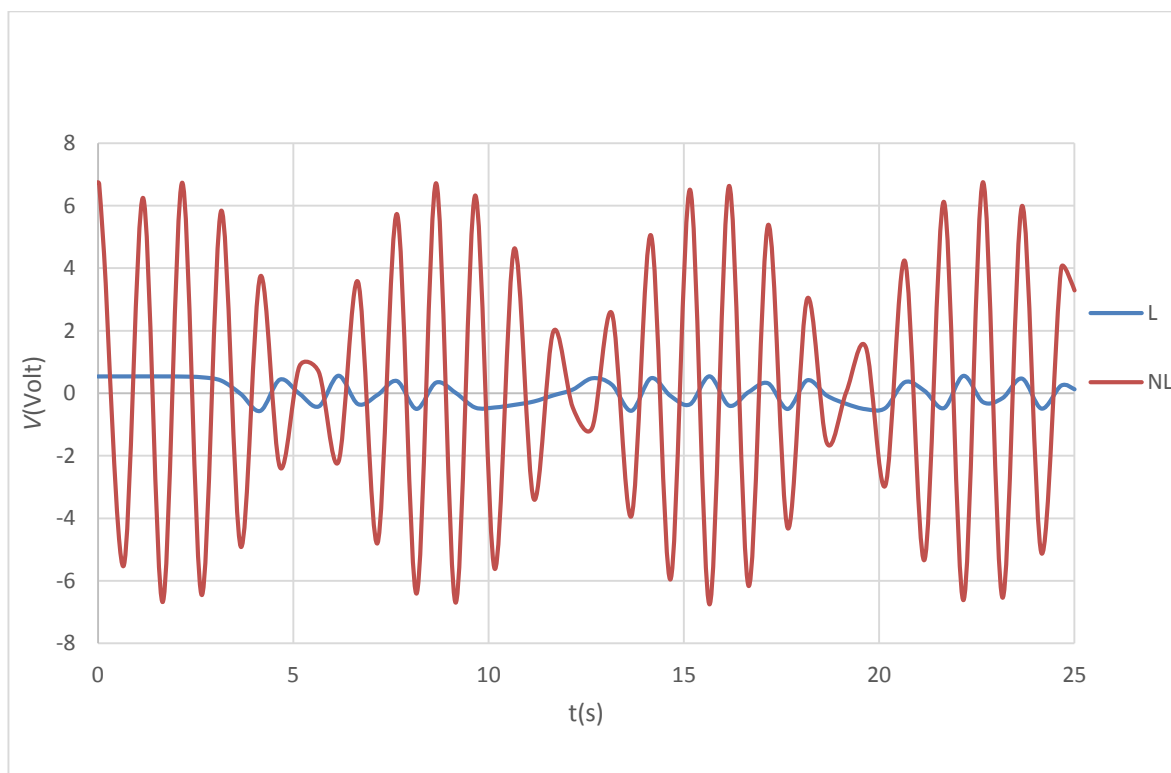
شکل ۱۹، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.01, z_0=0.015, U=2\text{m/s}$



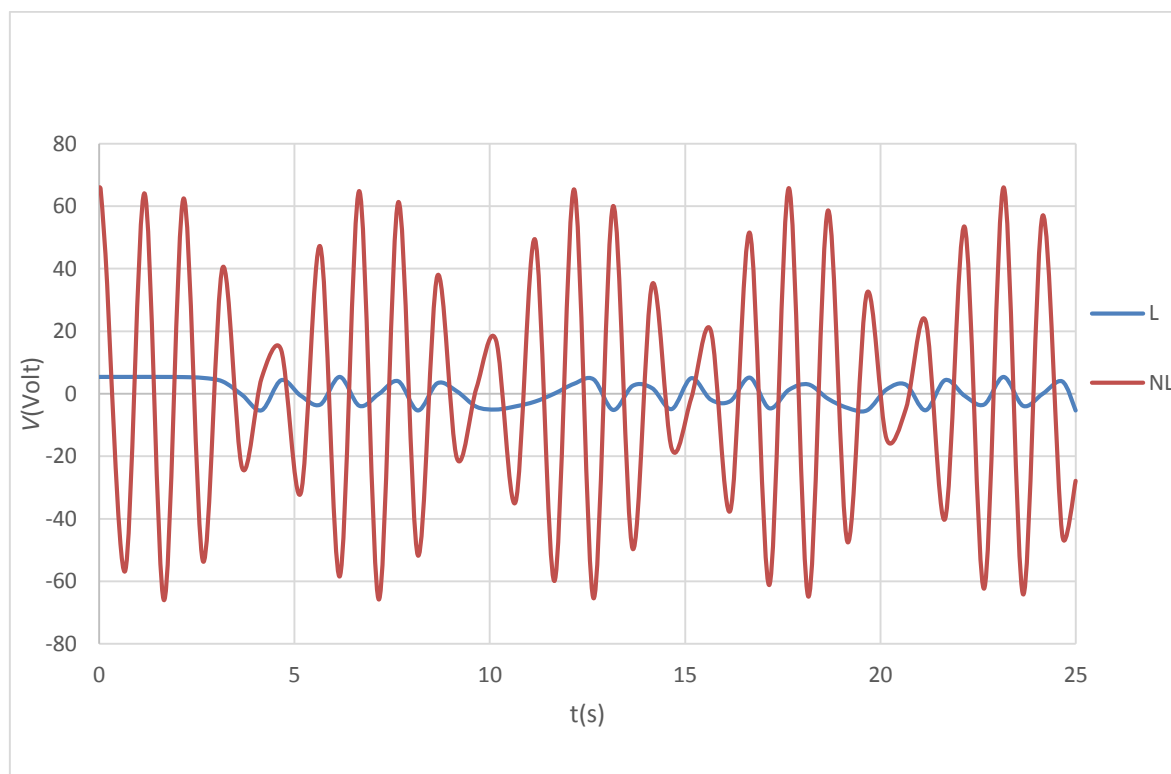
شکل ۲۰، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.01, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$



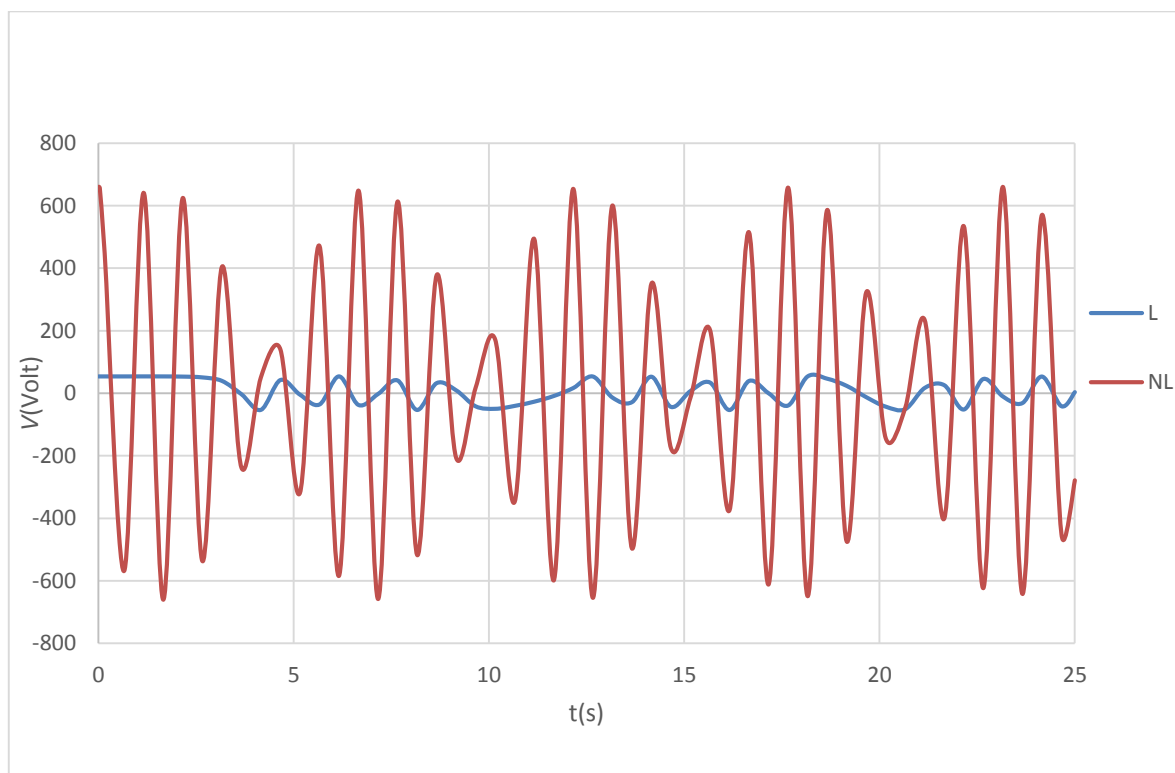
شکل ۲۱، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.05, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$



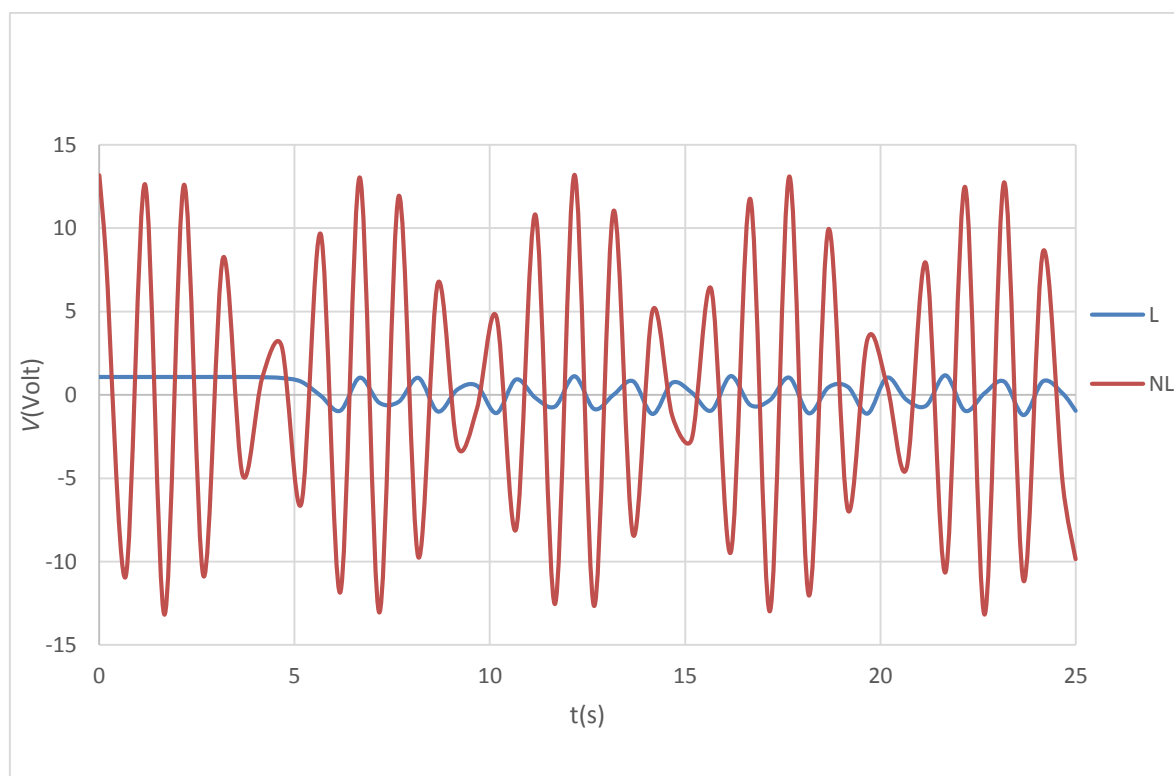
شکل ۲۲، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.05, z_0=0.015, U=2.5\text{m/s}$



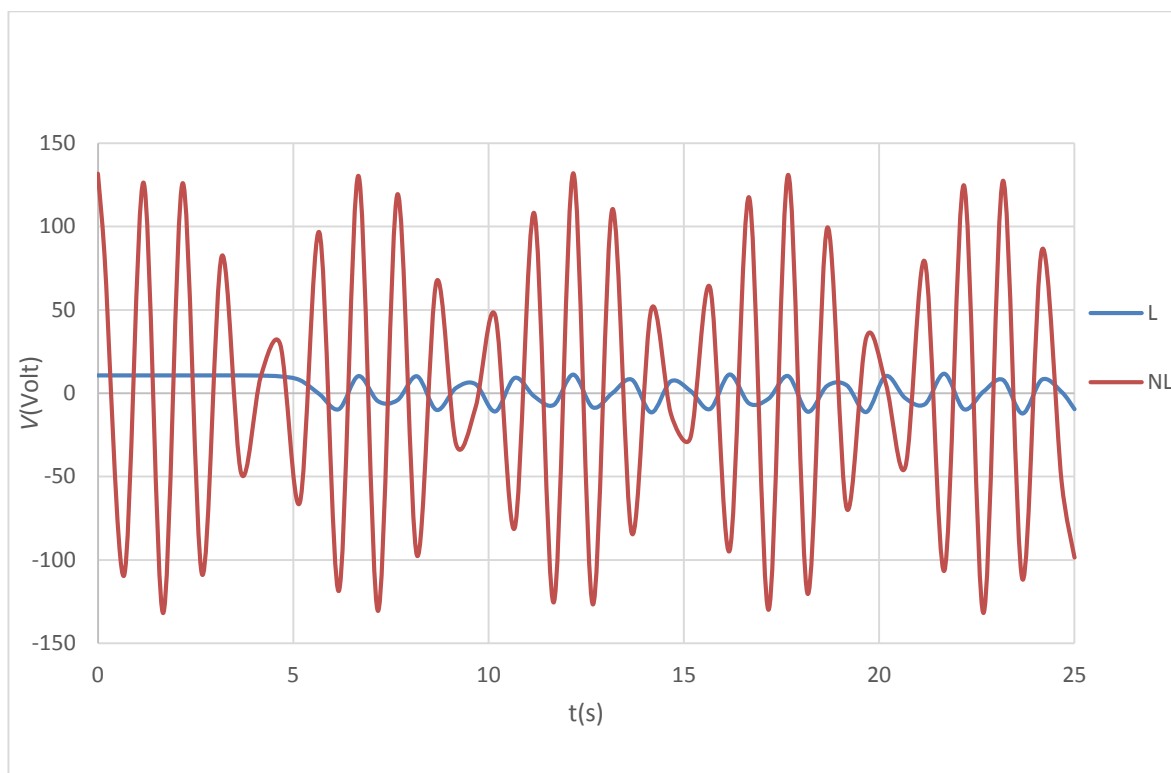
شکل ۲۳، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.05, z_0=0.15, U=2.5\text{m/s}$



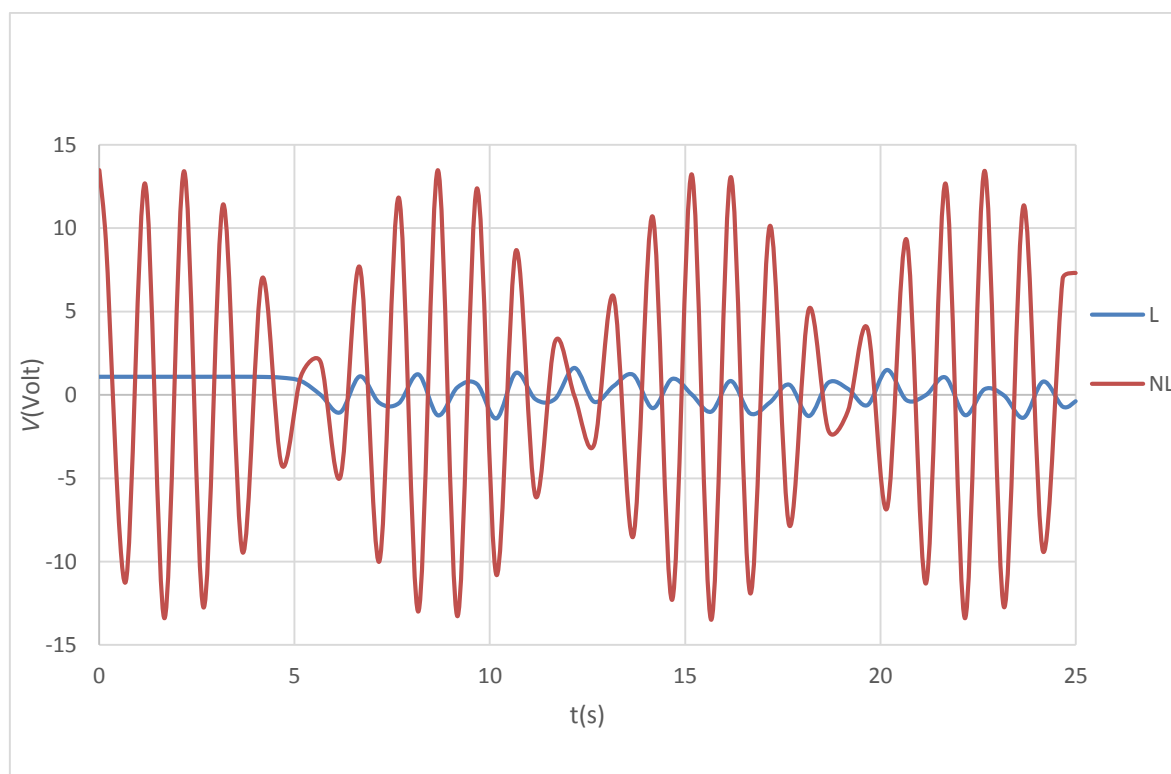
شکل ۲۴، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.05, z_0=1.5, U=2.5\text{m/s}$



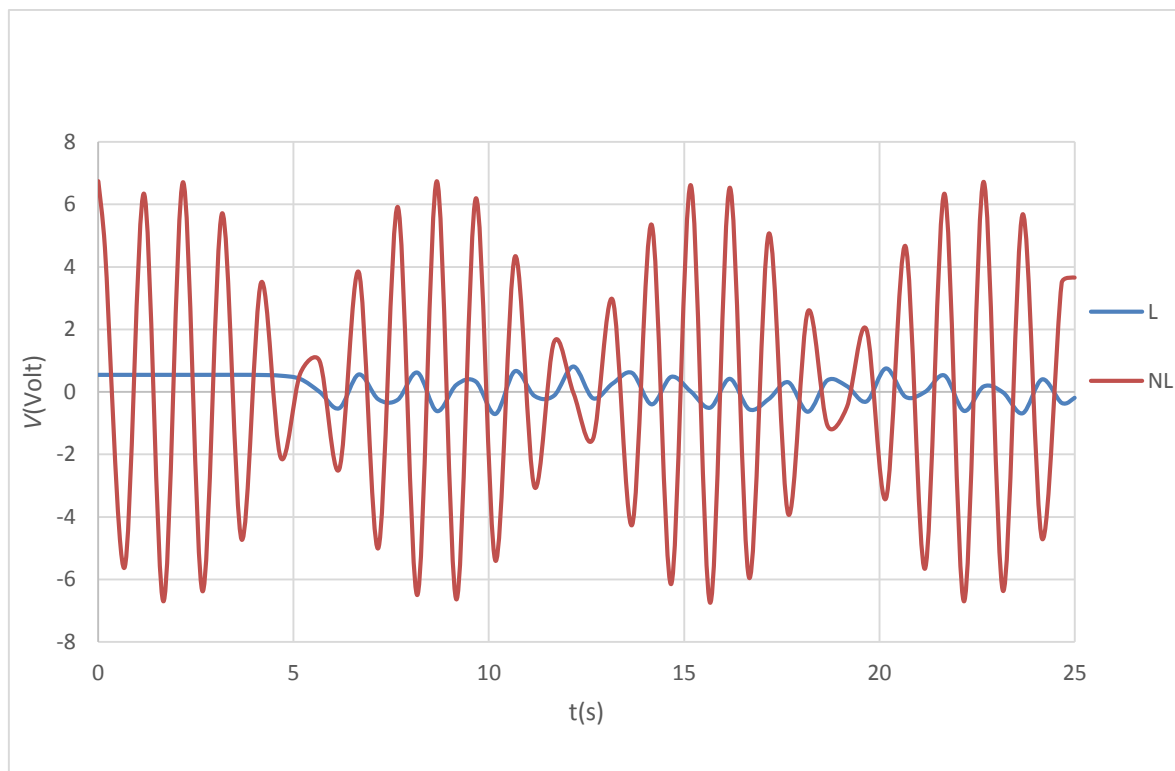
شکل ۲۵، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=2\text{m/s}$



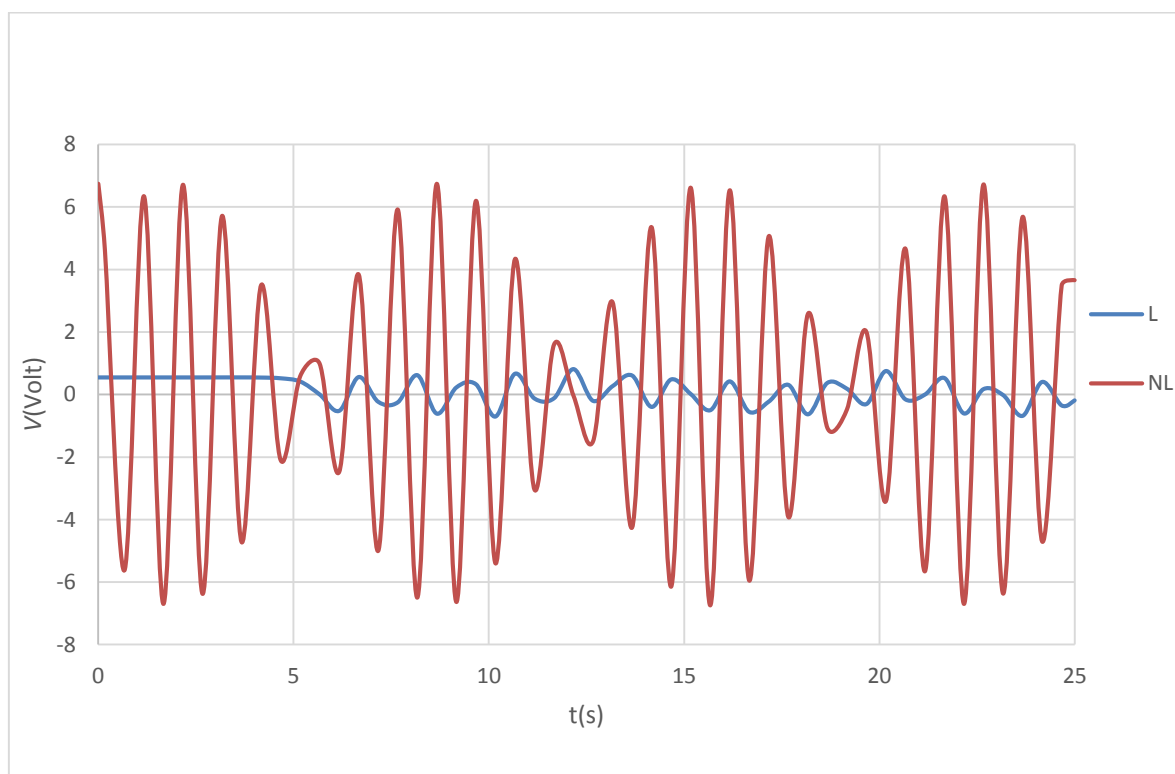
شکل ۲۶، نمودار v بر حسب t , $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=1, z_0=0.015, U=2\text{m/s}$



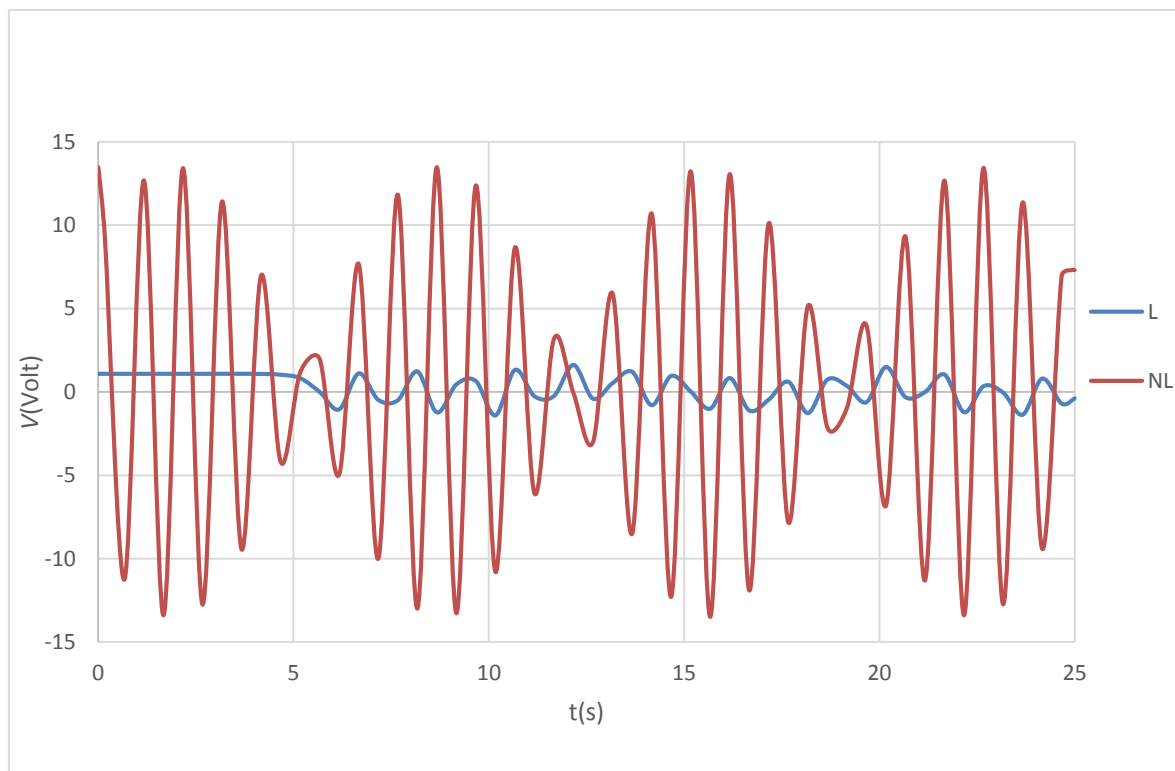
شکل ۲۷، نمودار v بر حسب t , $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$



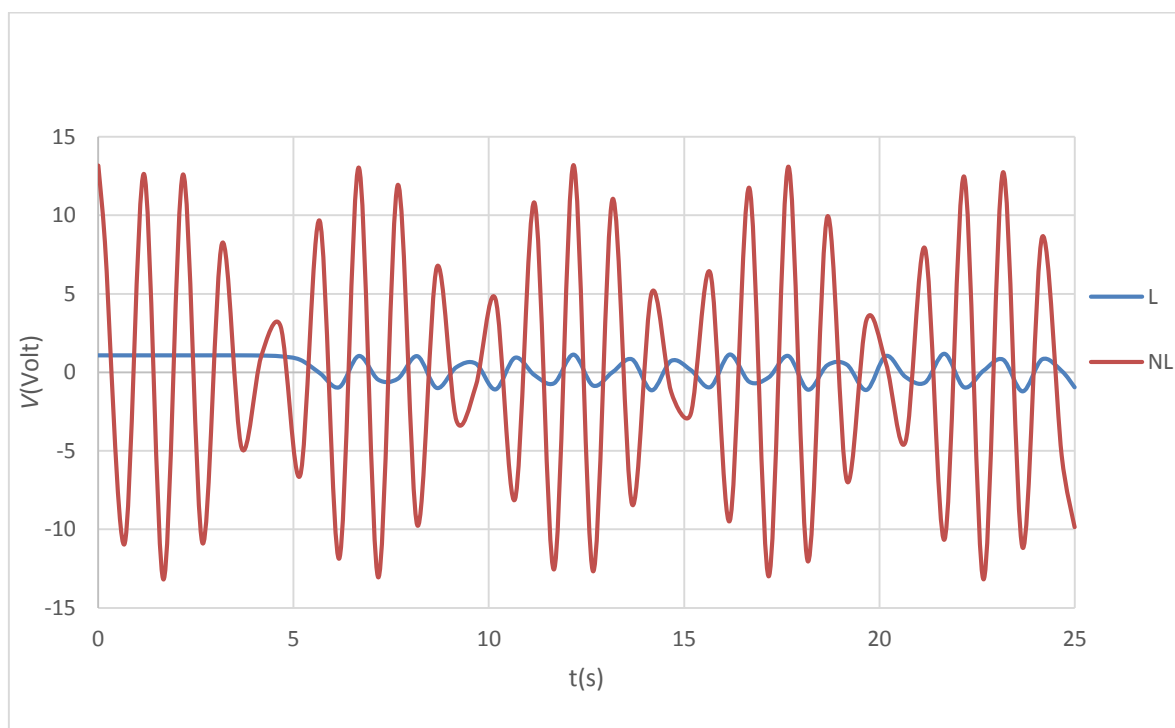
شکل ۲۸، نمودار v بر حسب t , $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.05, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$



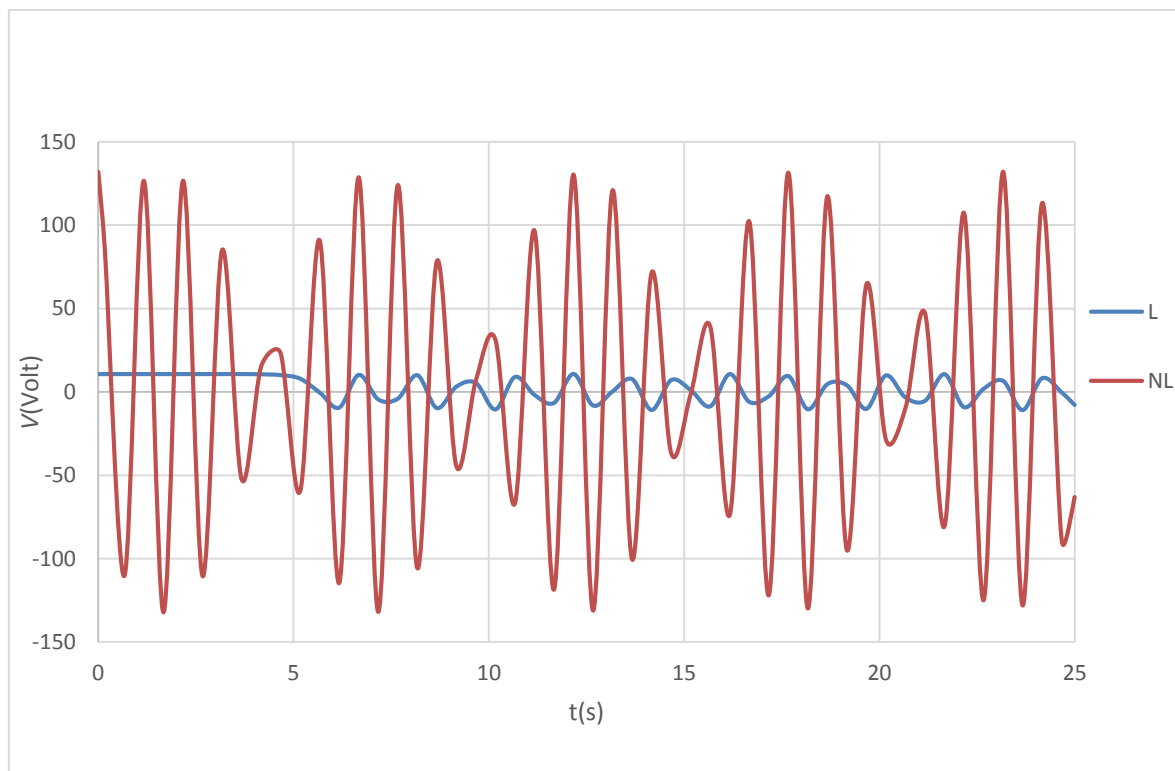
شکل ۲۹، نمودار v بر حسب t , $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.05, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$



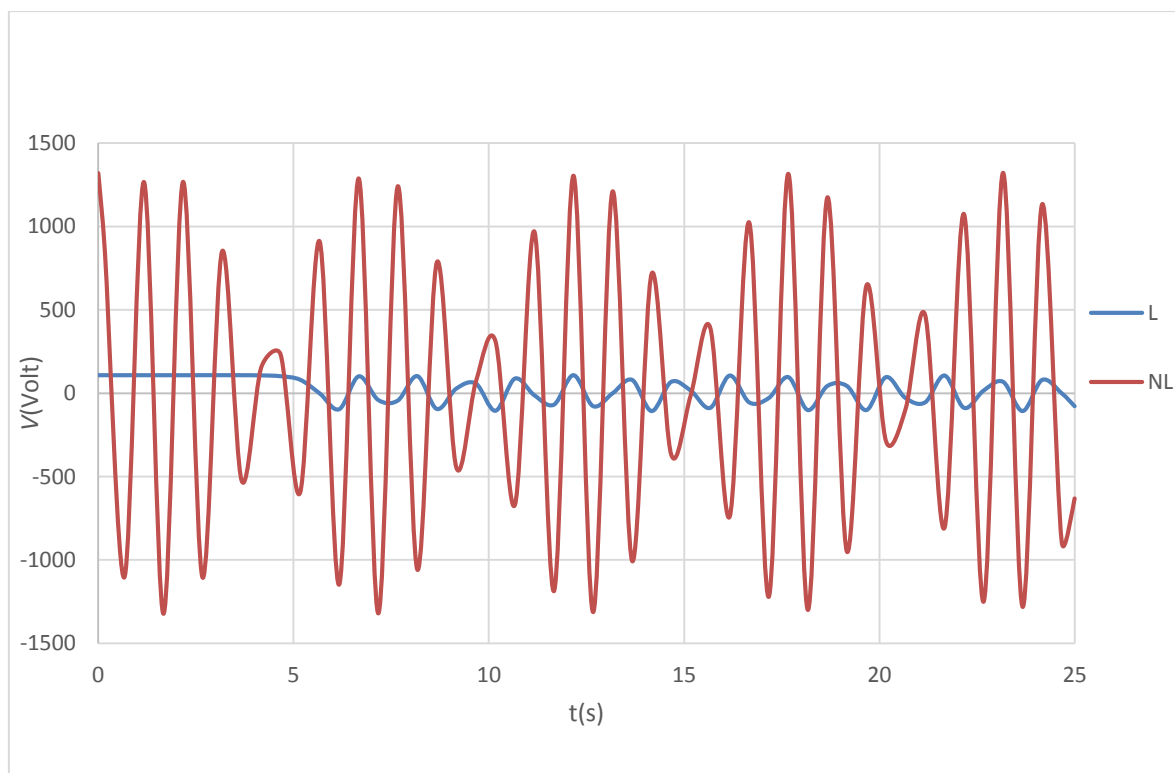
شکل ۳۰ نمودار v بر حسب t , $\sigma=1, \sigma_0=1, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$



شکل ۳۱، نمودار v بر حسب t , $\sigma=0.5, \sigma_0=0.5, \varepsilon=0.1, z_0=0.015, U=5\text{m/s}$



شکل ۳۲، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=0.15, U=2.5\text{m/s}$

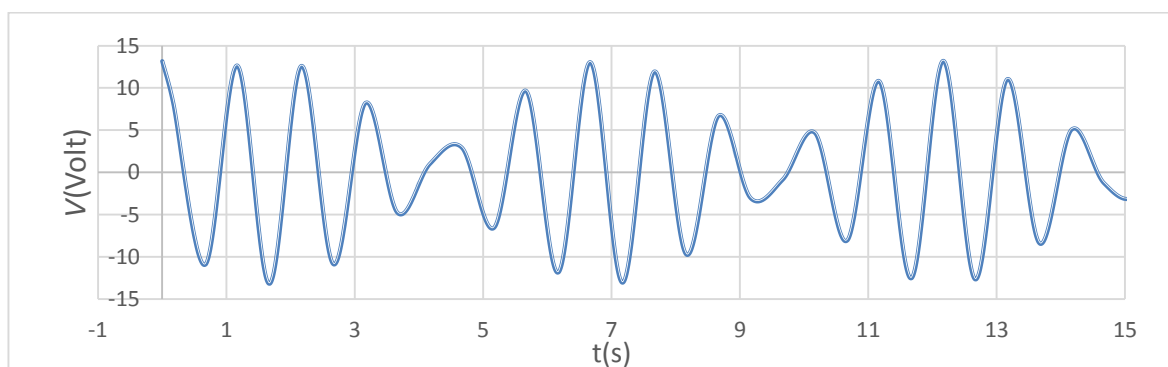


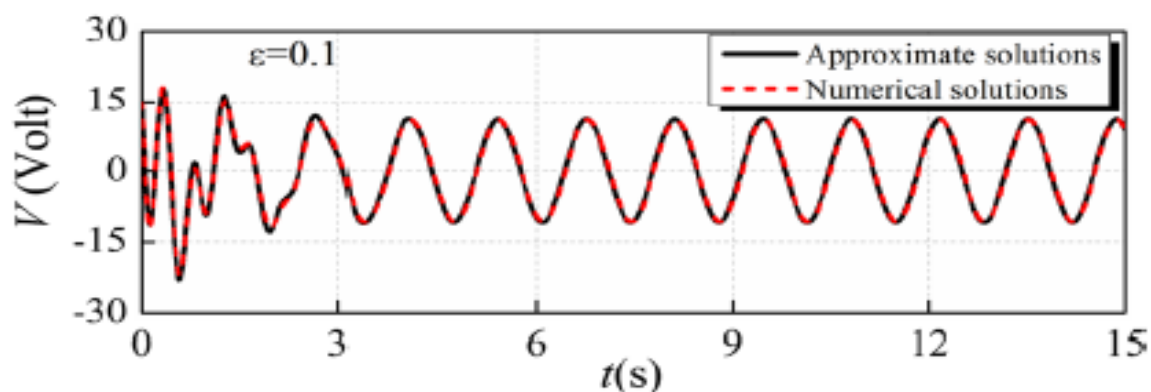
شکل ۳۳، نمودار v بر حسب t ، $\sigma=0, \sigma_0=0, \varepsilon=0.1, z_0=1.5, U=2.5\text{m/s}$

همان‌طور که در شکل‌های ۱۹-۳۵ دیده می‌شود تغییر پارامترها به جز z_0 و ε تاثیر چندانی بر ولتاژ خروجی نداشته است.

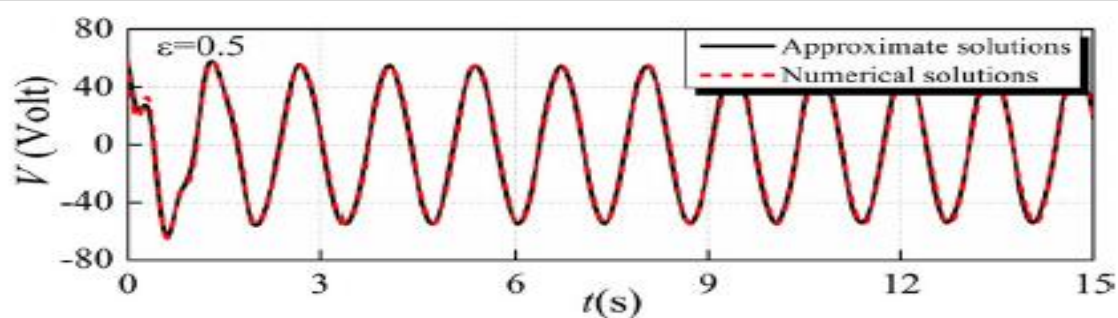
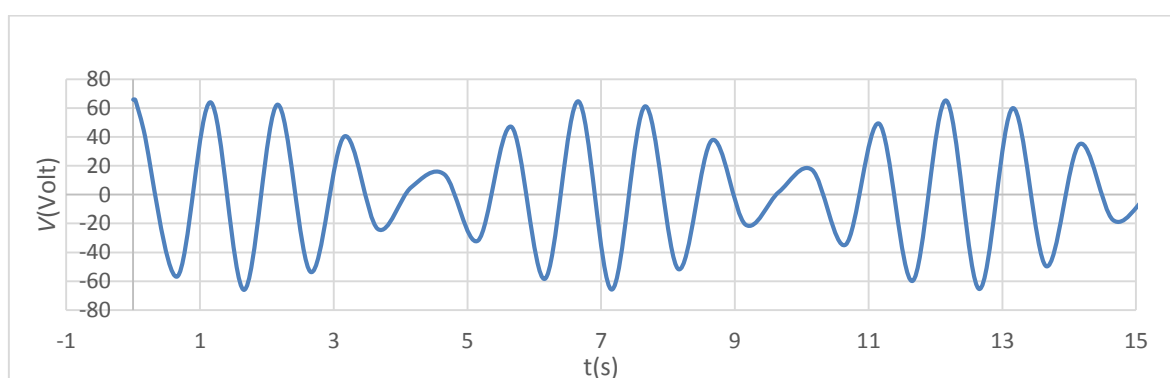
از مقایسه شکل ۳۲ و ۳۳ که در آن σ و σ_0 تغییر کرده‌اند می‌توان دریافت که گام زمانی آن‌ها اندکی تغییر کرده‌است. با مقایسه نمودارها با می‌توان دریافت که با تغییر z_0 ، دامنه ولتاژ نیز تغییر کرده است. همچنین از مقایسه حالت‌های خطی با حالت غیرخطی می‌توان به اینکه پی برد که میزان ولتاژ خروجی در مدت زمان مشابه در حالت غیرخطی بسیار بیشتر از حالت خطی بوده که در تمامی نمودارها به وضوح قابل مشاهده است.

برای صحت سنجی ولتاژ بر زمان، در ادامه مقایسه نمودارهای بدست آمده در این کار و کار قبلی صورت گرفته در مقاله [۴۵] که به صورت خطی محاسبه شده، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌نماییم، روند کلی شبیه بوده و تفاوت آن ناشی از اعمال ترم غیر خطی می‌باشد.





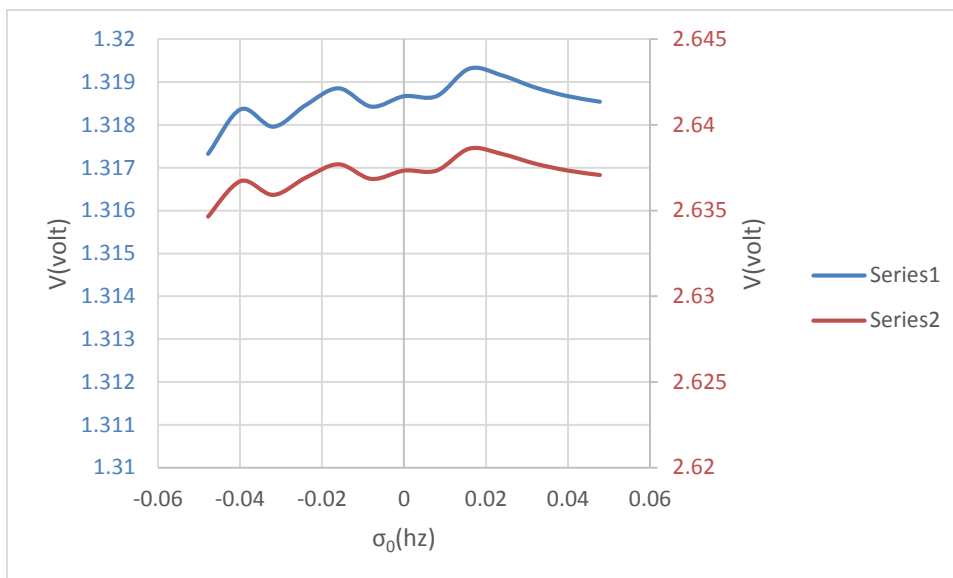
شکل ۳۴، مقایسه ولتاژ غیر خطی با مقاله برای $\varepsilon=0.1$ و $z_0=0.015$, $U=2.22\text{m/s}$, $\sigma=0.001$, $\sigma_0=0.0155$



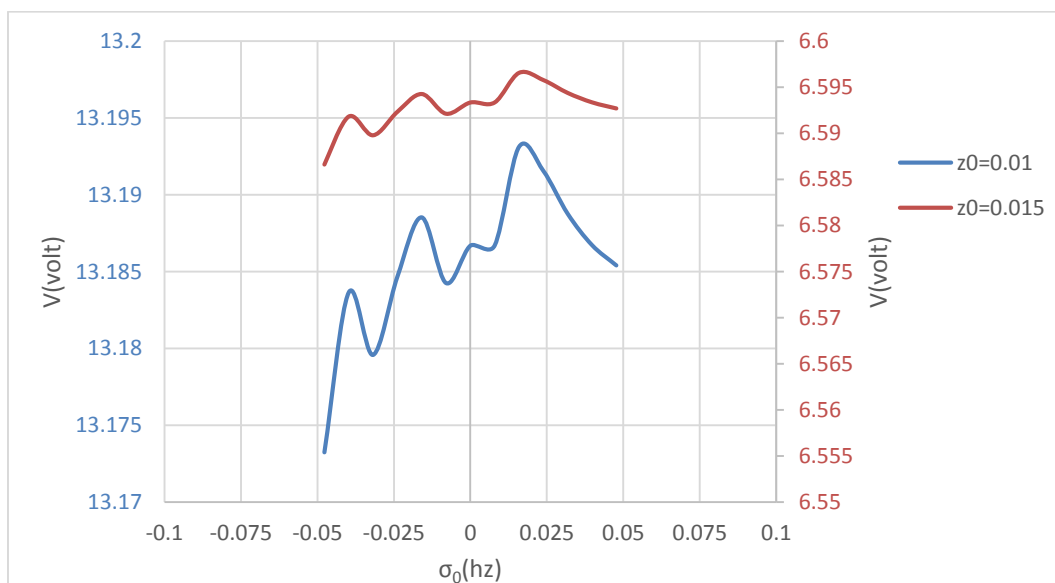
شکل ۳۵ مقایسه ولتاژ غیر خطی با مقاله برای $\varepsilon=0.5$ و $z_0=0.015$, $U=2.22\text{m/s}$, $\sigma=0.001$, $\sigma_0=0.0155$

همچنین نمودارهای $V-\sigma$ برای دامنه‌های مختلف آورده شده است. همانطور که قبلاً هم اشاره شد دامنه

بر روی مقدار ولتاژ اثر مستقیم دارد با تغییر دامنه میزان ولتاژ هم به همان نسبت تغییر می‌کند.



شکل ۳۶، نمودار $V-\sigma_0$ در دامنه‌های ۳ و ۱/۵ میلیمتر



شکل ۳۷ نمودار $V-\sigma_0$ در دامنه‌های ۱۰ و ۱۵ میلیمتر

فصل ۵ : نتیجه گیری و ارائه شهادت

۱-۵ نتیجه گیری

هدف از این مطالعه، بررسی رزونانس داخلی ناشی از ارتعاشات غیر خطی برای واکاوی بیشتر پتانسیل برداشت انرژی تحت تحریکات همزمان پایه و جریان می باشد. راه حل های تحلیلی تقریبی برداشت انرژی با رزونانس داخلی از طریق روش مقیاس های چندگانه به دست می آیند. اثرات پارامترهای غیرخطی به صورت تحلیلی بررسی شد و نتایج زیر حاصل می شود:

برتری طراحی رزونانس داخلی غیرخطی در مقایسه با مورد رزونانس داخلی خطی نشان داده شده است. همچنین دامنه ولتاژ خروجی در حالت پایا غیرخطی و پهنای باند برداشت کننده انرژی غیرخطی در طول زمان ثابت از حالت خطی بالاتر است.

۲-۵ پیشنهادات

با توجه به اهمیت برداشت انرژی و ارتعاشات در مباحث مختلف به ویژه هوافضا و ایرفویل که مدل این پایان نامه بود می توان موارد زیر را جهت بررسی های تکمیلی انجام داد:

- بررسی انواع ایرفویل ها با اشکال مختلف
- بررسی ایرفویل تحت زاویه های حمله متفاوت
- تست تونل باد و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تئوری

- [١] S. Priya and D. J. Inman, *Energy harvesting technologies*. Springer, .٢٠٠٩
- [٢] C. Wei and X. Jing, "A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. ٧٤, pp. ١-١٨, ٢٠١٧, doi: ١٠.١٠١٦/j.rser..٢٠١٧,٠١,٠٧٣
- [٣] A. Kingatua, "The how and why of energy harvesting for low-power applications," *All About Circuits*, vol. ٢٣, .٢٠١٦
- [٤] P. Laura, J. Pombo, and E. Susemihl, "A note on the vibrations of a clamped-free beam with a mass at the free end," *Journal of Sound and Vibration*, vol. ٣٧, no. ٢, pp. ١٦١-١٦٨, .١٩٧٤
- [٥] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. Da Silva, D. Patel, and S. Roundy, "PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking," *Computer*, vol. ٣٣, no. ٧, pp. .٢٠٠٠, ٤٢-٤٨
- [٦] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE Pervasive computing*, vol. ٤, no. ١, pp. ١٨-٢٧, .٢٠٠٥
- [٧] M. Kishi *et al.*, "Micro thermoelectric modules and their application to wristwatches as an energy source," in *Eighteenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings, ICT' ٩٩* (Cat. No. ٩٩TH٨٤٠٧), ١٩٩٩: IEEE, pp. .٣٠١-٣٠٧
- [٨] G. J. Snyder and E. S. Toberer, "Complex thermoelectric materials," in *Materials for sustainable energy: a collection of peer-reviewed research and review articles from Nature Publishing Group*: World Scientific, ٢٠١١, pp. .١٠١-١١٠
- [٩] A. Mohammadnia, A. Rezanian, B. M. Ziapour, F. Sedaghati, and L. Rosendahl, "Hybrid energy harvesting system to maximize power generation from solar energy," *Energy Conversion and Management*, vol. ٢٠٥, p. ١١٢٣٥٢, .٢٠٢٠

- [١٠] N. Elvin and A. Erturk, "Introduction and methods of mechanical energy harvesting," in *Advances in Energy Harvesting Methods*: Springer, ٢٠١٣, pp. ٣-١٤
- [١١] N. Elvin and A. Erturk, *Advances in energy harvesting methods*. Springer Science & Business Media, ٢٠١٣
- [١٢] M. Liu, W.-C. Tai, and L. Zuo, "Vibration energy-harvesting using inerter-based two-degrees-of-freedom system," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. ١٤٦, p. ١٠٧٠٠٠, ٢٠٢١
- [١٣] L. Zhao and Y. Yang, "An impact-based broadband aeroelastic energy harvester for concurrent wind and base vibration energy harvesting," *Applied Energy*, vol. ٢١٢, pp. ٢٣٣-٢٤٣, ٢٠١٨
- [١٤] M. F. Mahmood, S. L. Mohammed, and S .K. Gharghan, "Energy harvesting-based vibration sensor for medical electromyography device," *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun*, vol. ٩, ٢٠٢٠
- [١٥] B. Ambrozkiewicz, G. Litak, and P. Wolszczak, "Modelling of electromagnetic energy harvester with rotational pendulum using mechanical vibrations to scavenge electrical energy," *Applied Sciences*, vol. ١٠, no. ٢, p. ٦٧١, ٢٠٢٠
- [١٦] O. Ben Dali *et al.*, "Cantilever-based ferroelectret energy harvesting," *Applied Physics Letters*, vol. ١١٦, no. ٢٤, p. ٢٠٢٠, ٢٤٣٩٠١
- [١٧] A. Yousefpour, A. Haji Hosseinloo, M. Reza Hairi Yazdi, and A. Bahrami, "Disturbance observer-based terminal sliding mode control for effective performance of a nonlinear vibration energy harvester," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. ٣١, no. ١٢, pp. ١٤٩٥-١٥١٠, ٢٠٢٠
- [١٨] M. Deterre *et al.*, "Energy harvesting system for cardiac implant applications," in ٢٠١١ *Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)*, ٢٠١١: IEEE, pp. ٣٨٧-٣٩١
- [١٩] D. Huang, S. Zhou, Q. Han, and G. Litak, "Response analysis of the nonlinear vibration energy harvester with an uncertain parameter," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, vol. ٢٣٤, no. ٢, pp. ٢٠٢٠, ٣٩٣-٤٠٧

- [٢٠] S. P. Beeby *et al.*, "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting," *Journal of Micromechanics and microengineering*, vol. ١٧, no. ٧, p. ١٢٥٧, .٢٠٠٧
- [٢١] A. Bibo and M. Daqaq, "Investigation of concurrent energy harvesting from ambient vibrations and wind using a single piezoelectric generator," *Applied Physics Letters*, vol. ١٠٢, no. ٢٤, p. ٢٤٣٩٠٤, .٢٠١٣
- [٢٢] W. Yang and S. Towfighian, "Internal resonance and low frequency vibration energy harvesting," *Smart Materials and Structures*, vol. ٢٦, no. ٩, ٢٠١٧, doi: ١٣٦١-٦٦٥/١٠,١٠٨٨X/aa٧٩١d.
- [٢٣] L. Zhang, A. Abdelkefi, H. Dai, R. Naseer, and L. Wang, "Design and experimental analysis of broadband energy harvesting from vortex-induced vibrations," *Journal of Sound and Vibration*, vol. ٤٠٨, pp. ٢١٠-٢١٩, .٢٠١٧
- [٢٤] A. L. Cottrill *et al.*, "Ultra-high thermal effusivity materials for resonant ambient thermal energy harvesting," *Nature communications*, vol. ٩, no. ١, pp. ١-١١, .٢٠١٨
- [٢٥] Q. Xia, Y. Chen, C. Yang, B. Chen, G. Muhammad, and X. Ma, "Maximum efficiency point tracking for an ocean thermal energy harvesting system," *International Journal of Energy Research*, vol. ٤٤, no. ٤, pp. ٢٦٩٣-٢٧٠٣, .٢٠٢٠
- [٢٦] C. Yu, S. H. Yang, S. Y. Pak, J. R. Youn, and Y. S. Song, "Graphene embedded form stable phase change materials for drawing the thermo-electric energy harvesting," *Energy Conversion and Management*, vol. ١٦٩, pp. ٨٨-٩٦, .٢٠١٨
- [٢٧] M. Tholl *et al.*, "Subdermal solar energy harvesting—A new way to power autonomous electric implants," *Applied Energy*, vol. ٢٦٩, p. ١١٤٩٤٨, .٢٠٢٠
- [٢٨] H.-X. Zou *et al.*, "Mechanical modulations for enhancing energy harvesting: Principles, methods and applications," *Applied Energy*, vol. ٢٥٥, p. ١١٣٨٧١, .٢٠١٩
- [٢٩] Y.-H. Shin *et al.*, "Automatic resonance tuning mechanism for ultra-wide bandwidth mechanical energy harvesting," *Nano Energy*, vol. ٧٧, p. ١٠٤٩٨٦, .٢٠٢٠

- [۳۰] Y. Zhang, A. Luo, Y. Wang, X. Dai, Y. Lu, and F. Wang, "Rotational electromagnetic energy harvester for human motion application at low frequency ", *Applied Physics Letters*, vol. ۱۱۶, no. ۵, p. ۰۵۳۹۰۲, .۲۰۲۰
- [۳۱] Y. Yang, L. Zhao, and L. Tang, "Comparative study of tip cross-sections for efficient galloping energy harvesting," *Applied Physics Letters*, vol. ۱۰۲, no. ۶, p. ۰۶۴۱۰۵, .۲۰۱۳
- [۳۲] N. Kong and D. S. Ha, "Low-power design of a self-powered piezoelectric energy harvesting system with maximum power point tracking," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. ۲۷, no. ۵, pp. ۲۲۹۸-۲۳۰۸, .۲۰۱۱
- [۳۳] J. Caban, G. Litak, B. Ambrozkiewicz, L. Gardyński, P. Stączek, and P. Wolszczak, "Impact-based piezoelectric energy harvesting system excited from diesel engine suspension," *Applied Computer Science*, vol. ۱۶, no. ۳, .۲۰۲۰
- [۳۴] A. Erturk, W. Vieira, C. De Marqui Jr, and D. J. Inman, "On the energy harvesting potential of piezoaeroelastic systems," *Applied physics letters*, vol. ۹۶, no. ۱۸, p. ۱۸۴۱۰۳, .۲۰۱۰
- [۳۵] M. Mishra, P. Mahajan, and R. Garg, "Piezoelectric Energy Harvesting System Using Railway Tracks," in *Innovations in Electrical and Electronic Engineering*: Springer, ۲۰۲۰, pp. ۲۴۷-۲۵۹
- [۳۶] M. R. Sarker, R. Mohamed, M. H. M. Saad, M. Tahir, A. Hussain, and A. Mohamed, "A Hybrid Optimization Approach for the Enhancement of Efficiency of a Piezoelectric Energy Harvesting System," *Electronics*, vol. ۱۰, no. ۱, p. ۷۵, .۲۰۲۱
- [۳۷] Y. Cha, H. Kim, and M. Porfiri, "Energy harvesting from underwater base excitation of a piezoelectric composite beam," *Smart materials and Structures*, vol. ۲۲, no. ۱۱, p. ۱۱۵۰۲۶, .۲۰۱۳
- [۳۸] L. Dong *et al.*, "Cardiac energy harvesting and sensing based on piezoelectric and triboelectric designs," *Nano Energy*, p. ۱۰۵۰۷۶, .۲۰۲۰

- [٣٩] L. Dong *et al.*, "Multifunctional pacemaker lead for cardiac energy harvesting and pressure sensing," *Advanced healthcare materials*, vol. ٩, no. ١١, p. ,٢٠٠٠٠٥٣ .٢٠٢٠
- [٤٠] H. Wu, A. Tatarenko, M. Bichurin, and Y. Wang, "A multiferroic module for biomechanical energy harvesting," *Nano Energy*, p. ١٠٥٧٧٧, .٢٠٢١
- [٤١] M. Li and X. Jing, "Novel tunable broadband piezoelectric harvesters for ultralow-frequency bridge vibration energy harvesting," *Applied Energy*, vol. ٢٥٥, p. ١١٣٨٢٩, .٢٠١٩
- [٤٢] M. Zhang, G. Hu, and J. Wang, "Bluff body with built-in piezoelectric cantilever for flow-induced energy harvesting," *International Journal of Energy Research*, vol. ,٤٤no. ٥, pp. ٣٧٦٢-٣٧٧٧, .٢٠٢٠
- [٤٣] A. Givois, C. Giraud-Audine, J.-F. Deü, and O. Thomas, "Experimental analysis of nonlinear resonances in piezoelectric plates with geometric nonlinearities," *Nonlinear Dynamics*, vol. ١٠٢, no. ٣, pp. ١٤٥١-١٤٦٢, .٢٠٢٠
- [٤٤] L .Chen and W. Jiang, "A piezoelectric energy harvester based on internal resonance," *Acta Mechanica Sinica*, vol. ٣١, no. ٢, pp. ٢٢٣-٢٢٨, .٢٠١٥
- [٤٥] H. Liu and X. Gao, "Vibration energy harvesting under concurrent base and flow excitations with internal resonance," *Nonlinear Dynamics*, vol. ٩٦, no. ٢, pp. ١٠٦٧-١٠٨١, .٢٠١٩

Abstract

In this study, nonlinear modeling and vibration analysis of an airfoil have been studied to investigate the potential of piezoelectric energy absorbers under simultaneous ground and current excitations. At first, an airfoil under the concurrent base and flow excitations were investigated as a two-degree nonlinear system with linear and torsional stiffnesses and related equations have been driven. Then nonlinear stiffnesses in the vertical direction (immersion) (k_l & k_{nl}), and torsional linear and nonlinear torsional stiffnesses (k_{a_l} & $k_{a_{nl}}$) are simultaneously added to the relevant model. A piezoelectric energy absorber is then connected to a two-degree nonlinear freedom system. Perturbation and numerical methods have been used to study the vibrational and nonlinear resonance responses of the system. Using simulation results, we have extracted the system responses and examined the effect of various physical parameters on them.

Keywords: nonlinear vibration, internal resonance, piezoelectric, energy harvesting, concurrent excitations



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

Energy harvesting for nonlinear vibration of airfoil under concurrent base and flow excitations with internal resonance

By: Ali Kargozarfard

Supervisor:

Dr. Habib Ahmadi

Dr. Kamran Foroutan

Feb 2022