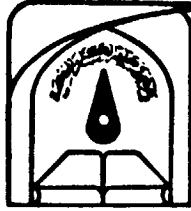


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک  
تبدیل انرژی

ناپایداری ناشی از جریان عرضی سیال در خطوط انتقال برق

حمیدرضا عبدالمحمدی

استاد راهنما:

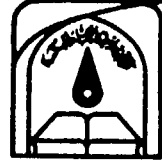
دکتر بهزاد قدیری دهکردی

زمستان ۷۷

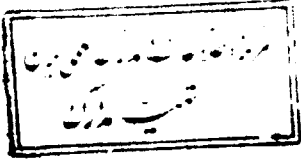
۲۴۹۲۱

۱۰۰۱/۲

۱۳۷۸ / ۴ / ۲۰

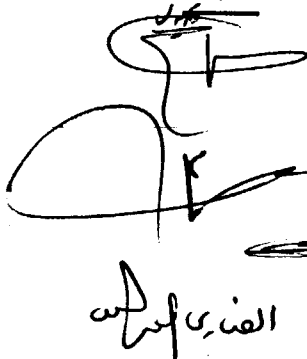


دانشگاه تربیت مدرس



### تاییدیه هیات داوران

آقای حمیدرضا عبدالمحمدی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان ناپایداری ناشی از جریان سیال در خطوط انتقال برق در تاریخ ۷۷/۱۱/۲۱ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک باگرایش تبدیل انرژی پیشنهاد می کنند.

امضاء  
  
الفیاضی

نام و نام خانوادگی

آقای دکتر قدیری

آقای دکتر حیدری نژاد

آقای دکتر نورآذر

آقای دکتر انصاری

اعضای هیات داوران

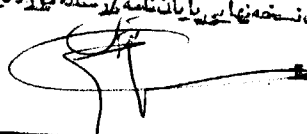
۱- استاد راهنما:

۲- استاد مشاور:

۳- استادان ممتحن:

۴- مدیر گروه:

(یا نماینده گروه تخصصی)

این نسخه به عنوان نسخه نهائی پایان نامه بر سه ساله مورد تأیید است.  
امضای استاد راهنما  




شماره: .....

تاریخ: .....

پیوست: .....

## آیین‌نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)‌های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)‌های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به مرکز نشر دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲ در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:  
و کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته مکانیک است  
که در سال ۱۳۷۷ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم / جناب آقای دکتر صدیقی و مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر — از آن دفاع شده است.

ماده ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های نشریات دانشگاه تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به مرکز نشر دانشگاه اهدا کند دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴ در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه‌شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

ماده ۶ اینجانب حمیدرضا عبدالمحمد دانشجوی رشته مکانیک (تدریس ارشد) مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

تقدیم به :

مادر و پدر عزیز و مهربانم که زحمات ایشان راه زندگی  
را برایم هموار ساخته و همیشه مشوق من بوده‌اند .

## تشکر و قدردانی :

پس از سپاس بی پایان پروردگار دادگستر ، بر خود لازم می دانم از زحمات و رهنمودهای استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر بهزاد قدیری و همچنین کلیه مسئولین دانشگاه بخصوص کادر دانشکده فنی تشکر و قدردانی نمایم .

" عبدالحمیدی "

بهمن ماه ۷۷

## چکیده

---

هدف از انجام این پروژه تعیین شرایط ناپایداری خطوط انتقال برق در اثر جریان باد می‌باشد. لذا اثر جریان عرضی سیال (هوا) روی دو کابل موازی انتقال برق در آرایش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا مکانیزم‌های مختلف ارتعاش مطرح شده است. سپس معادلات حاکم بر کابل پایین دست جریان استخراج گردیده و براساس آن آنالیز پایداری صورت گرفته است. در استخراج و ساده سازی معادلات حرکت از فرض quasi-static استفاده شده است.

با توجه به معیار ناپایداری Routh Hurwitz و نتیجه معادلات حرکت از یک برنامه کامپیوتری جهت تعیین مرز ناپایداری بهره گرفته شده است و سپس نتایج برنامه کامپیوتری به صورت منحنی‌های طراحی برای خطوط موازی انتقال برق ارائه گردیده است.

---

کلمات کلیدی: ارتعاشات ناشی از جریان سیال، خطوط انتقال برق، ناپایداری الاستیک سیال

# فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فهرست جداول

فهرست اشکال و منحنی‌ها

فهرست علائم اختصاری

فصل اول

مقدمه

- ۱-۱- نوسانات ناشی از اغتشاش جریان ..... ۳
- ۱-۲- ارتعاشات در فرکانس طبیعی ..... ۴
- ۱-۳- ناپایداری الاستیک سیال ..... ۴
- ۱-۴- فرض جریان بصورت quasi- static ..... ۶
- ۱-۵- ملاحظات کلی در خطوط انتقال برق و ارتعاشات آنها ..... ۷
- ۱-۶- رژیم‌های آب و هوایی و اقلیمی ایران ..... ۱۰



## فصل دوم

### بررسی اثر جریان عرضی سیال روی یک استوانه طویل

- ۱۱ ..... ۱-۲- رزیم جریان
- ۱۲ ..... ۲-۲- عدد استروهال
- ۱۳ ..... ۳-۲- ضرایب نیروی جریان پایدار
- ۱۵ ..... ۴-۲- ضرایب نیروی نوسانی سیال
- ۱۶ ..... ۵-۲- استوانه‌های ساکن
- ۱۷ ..... ۶-۲- استوانه‌های نوسانی
- ۱۷ ..... ۷-۲- طول همبستگی
- ۱۷ ..... ۸-۲- اثر میزان اغتشاش در ضرایب نیرو
- ۱۸ ..... ۹-۲- پاسخ استوانه در جریان عرضی سیال

## فصل سوم

- ۲۰ ..... ۱-۳- دو استوانه در جریان عرضی سیال
- ۲۱ ..... ۱-۱-۳- اثر wake و ناپایداری ناشی از آن
- ۲۵ ..... ۲-۱-۳- آنالیز پایداری
- ۲۶ ..... ۲-۳- خطوط موازی انتقال برق
- ۲۷ ..... ۱-۲-۳- معادلات حرکت برای کابل پایین دست جریان
- ۳۰ ..... ۲-۲-۳- آنالیز پایداری

## فصل چهارم

### تجزیه و تحلیل نتایج

- ۳۴ ..... ۱-۴- بحث و نتیجه گیری از منحنی‌ها
- ۳۶ ..... ۲-۴- اثر کمیت های فیزیکی مختلف در ناپایداری
- ۳۸ ..... ۳-۴- مقایسه نتایج با نتایج Price

## فصل پنجم

- جداول

- اشکال و منحنی‌ها

- مراجع

## فهرست علائم و نشانه‌ها

---

a ..... دامنه نوسانات استوانه

$$b = 0.23 [C_D \cdot c(x + x_0)]^{\frac{1}{2}}$$

c ..... قطر کابل

d ..... طول خط‌المركزين دو کابل باندل

$C_D, C_L$  ..... ضرایب پسا و برآ بر اساس جهت جریان

$C'_D, C'_L$  ..... ضرایب پسا و برآی نوسانی

$C_x, C_y$  ..... ضرایب پسا و برآ در دو جهت افقی و عمودی

$f_n$  ..... فرکانس طبیعی کابل

$f_s$  ..... فرکانس پخش گردابه

$F_D, F_L$  ..... نیروهای پسا و برآ

$g, h$  ..... مولفه‌های نیروی سیال در دو جهت  $y, x$

$k_{xx}, k_{yy}$  ..... ضریب فنریت کابل در دو جهت  $y, x$

$k = \frac{\omega_y}{\omega_x} = \left( \frac{k_{yy}}{k_{xx}} \right)^{\frac{1}{2}}$  ..... نسبت فرکانسهای طبیعی کابل در دو جهت  $x, y$

- $L$  ..... طول کابل
- $m$  ..... جرم واحد طول کابل
- $N_{st}$  ..... عدد استروهاال
- $P$  ..... فاصله افقی دو کابل موازی
- $Re$  ..... عدد رنولدز
- $T$  ..... فاصله عمودی دو کابل موازی
- $V, V_{\infty}, U, U_{\infty}$  ..... سرعت محلی جریان آزاد
- $V_{loc}$  ..... سرعت جریان در wake
- $\xi = \frac{V_{loc}}{V}$  ..... نسبت سرعت محلی به سرعت جریان آزاد
- $\alpha$  ..... زاویه حمله
- $\rho$  ..... چگالی سیال ( هوا)
- $\epsilon = \frac{k_{xy}}{k_{xx}}$  ..... ضریب کوپلینگ
- $\Omega_D, \Omega_L$  ..... فرکانس نوسانات استوانه در دو جهت نیروی پسا و برآ

## فهرست جداول

---

عنوان

صفحه

جدول ۱-۲ - نتایج تجربی ضرایب نیرو به صورت تابعی از عدد رینولدز ..... ۴۰

جدول ۲-۲ - طول همبستگی برای استوانه‌ها ی صاف ..... ۴۱

## فهرست اشکال و منحنی‌ها

شکل	صفحه
شکل ۱-۱- مکانیزم‌های مختلف تحریک برای یک استوانه در جریان عرضی سیال	۴۲
شکل ۲-۱- جابجایی اغتشاش در جریان عرضی سیال اطراف استوانه	۴۳
شکل ۳-۱- اشکال مختلف ارتعاش در خطوط انتقال برق	۴۴
شکل ۴-۱- مستهلک کننده ارتعاشات در خطوط انتقال برق	۴۵
شکل ۵-۱- نحوه اتصال کابل به مقره در خطوط انتقال برق	۴۶
شکل ۱-۲- تشکیل خیابان گردابه‌ها در اطراف استوانه در جریان عرضی سیال	۴۷
شکل ۲-۲- a- ارتباط عدد استروهمال و عدد رینولدز	۴۸
شکل ۲-۲- b- عدد استروهمال برای مجموعه‌ای از سیلندرها در آرایش‌های مختلف	۴۹
شکل ۲-۲- c- عدد استروهمال برای یک سیلندر که در کنار سیلندر ساکن قرار دارد	۵۰
شکل ۳-۲- نسبت ضریب پسا برای سیلندر دارای نوسان به ضریب پسا برای سیلندر ساکن بر حسب پارامتر پاسخ	۵۱
شکل ۴-۲- تغییرات ضرایب برآوپسا با دامنه نوسان برای یک سیلندر در حال نوسان	۵۲
شکل ۵-۲- ارتباط ضریب پسای نوسانی و دامنه نوسانات سیلندر	۵۳

- شکل ۲-۶- ارتباط طول همبستگی و دامنه نوسانات سیلندر ..... ۵۴
- شکل ۲-۷- یک سیلندر در جریان عرضی سیال ..... ۵۵
- شکل ۲-۸- نمایش محدوده فقل شدگی نوسانات سیلندر در جریان عرضی سیال ..... ۵۶
- شکل ۲-۹- ارتباط دامنه نوسانات سیلندر با نسبت جرمی، در جریان عرضی سیال ..... ۵۷
- شکل ۳-۱- شکل گردابه‌ها در اطراف یک جفت استوانه در جریان عرضی سیال ..... ۵۸
- شکل ۳-۲- پروفیل سرعت جریان در منطقه Wake ..... ۵۹
- شکل ۳-۳- a - ضریب پسا برای استوانه پایین دست جریان ..... ۶۰
- شکل ۳-۳- b - ضریب برآ برای استوانه پایین دست جریان ..... ۶۱
- شکل ۳-۳- c - ضریب پسا و برآ برای استوانه پایین دست جریان ..... ۶۲
- شکل ۳-۴ - نمایش نیروهای وارد به استوانه پایین دست جریان ..... ۶۳
- شکل ۳-۵ - محدوده ناپایداری برای استوانه پایین دست جریان ( Cooper , 1973 ) ..... ۶۴
- شکل ۳-۶ - توزیع ضرایب پسا و برآی دائمی در منطقه Wake ..... ۶۵
- شکل ۳-۷ - دیاگرام سرعت نسبی جریان روی استوانه پایین دست جریان ..... ۶۶
- شکل ۳-۸- a- ضرایب نیرو برای استوانه پایین دست جریان (کابل با سطح صاف) ..... ۶۷
- شکل ۳-۸- b- ضرایب نیرو برای استوانه پایین دست جریان ،  $Re = 2.1 \times 10^4$  ..... ۶۸
- شکل ۳-۸- c- ضرایب نیرو برای استوانه پایین دست جریان ،  $Re = 3.58 \times 10^4$  ..... ۶۹
- شکل ۳-۸- d- ضرایب نیرو برای استوانه پایین دست جریان ،  $Re = 6 \times 10^4$  ..... ۷۰
- شکل ۳-۸- e- مشتق ضرایب نیروی پسا و برآ برای استوانه پایین دست جریان (با سطح صاف) ..... ۷۱
- شکل ۴-۱- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در شرایط فیزیکی مختلف ..... ۷۲
- شکل ۴-۲- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در شرایط فیزیکی مختلف ..... ۷۳

- شکل ۴-۳- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در شرایط فیزیکی مختلف ..... ۷۴
- شکل ۴-۴- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در شرایط فیزیکی مختلف ..... ۷۵
- شکل ۴-۵- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در شرایط فیزیکی مختلف ..... ۷۶
- شکل ۴-۶- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در شرایط فیزیکی مختلف ..... ۷۷
- شکل ۴-۷- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در شرایط فیزیکی مختلف ..... ۷۸
- شکل ۴-۸- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در شرایط فیزیکی مختلف ..... ۷۹
- شکل ۴-۹- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در شرایط فیزیکی مختلف ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۰- اثر تغییرات قطر کابل در محدوده ناپایداری ..... ۸۱
- شکل ۴-۱۱- اثر سرعت جریان باد در محدوده ناپایداری کابل پایین دست جریان ..... ۸۲
- شکل ۴-۱۲- اثر فرکانس طبیعی کابل در محدوده ناپایداری ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۳- اثر جرم واحد طول کابل در محدوده ناپایداری ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۴- اثر تغییرات نسبت فرکانسهای طبیعی ( $k = \frac{k_{xx}}{k_{yy}}$ ) در محدوده ناپایداری ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۵- اثر تغییرات نسبت کوپلینگ ( $\varepsilon = \frac{k_{xy}}{k_{xx}}$ ) در محدوده ناپایداری ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۶- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان در نسبت فرکانسهای مختلف ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۷- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان ..... ۸۸
- شکل ۴-۱۸- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان (مقایسه نتایج) ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۹- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان (مقایسه نتایج) ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۰- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان (مقایسه نتایج) ..... ۹۱
- شکل ۴-۲۱- محدوده ناپایداری برای کابل پایین دست جریان (مقایسه نتایج) ..... ۹۲