

۱۱۶۶



۱۹۲۹



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی - مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد نانوفناوری

عنوان:

بررسی خواص سطحی و نواحی مغناطیسی آلیاژهای مغناطیسی نرم آمورف و

نانوبلور(فاینمت) با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و

میکروسکوپ نیروی مغناطیسی

نگارش:

مهرنوش نادری

استاد راهنما:

دکتر محمد کاظم مروج فرشی

استاد مشاور:

دکتر مهدی طهرانچی

آبان ۱۳۸۶

۹۳۲۹۱

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۱۵

کتابخانه تخصصی نانوفناوری



بسمه تعالی

## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان

خانم مهنوش نادری پایان نامه ۸ واحدی خود را با عنوان بررسی خواص سطحی و نواحی مغناطیسی آلیاژهای مغناطیسی نرم آمورف و نانو کریستال (فاینمت) با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و میکروسکوپ نیروی مغناطیسی (MFM) در تاریخ ۱۳۸۶/۸/۲۳ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مواد - نانو فناوری پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمد کاظم مروج فرشی	استاد	
استاد مشاور	دکتر محمد مهدی طهرانچی	استاد	
استاد ناظر	دکتر وحید احمدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر مجید قناعت شعار	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر وحید احمدی	استاد	

۹۳۲۹۱

## دستور العمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

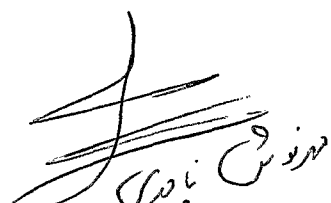
مقدمه: با غنایت به سیاست های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران لازم است اعضای هیات علمی دانشجویان دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان نامه و رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱: حقوق مادی و معنوی پایان نامه ها / رساله های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هر گونه بهره برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین نامه ها و دستورالعمل های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی می باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما نویسنده مسئول مقاله باشند. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان نامه / رساله نیز منتشر می شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین نامه های مصوب انجام می شود. ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره های ملی، منطقه ای و بین المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه / رساله و تمامی طرح های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسید و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هر گونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری خواهد بود.

  
۱۳۸۴/۹/۲۷

**تقدیم به**

**پدرم**

**مادرم**

**وسرزمینم**

**گوهران ارزشمند زندگیم**

## با سپاس فراوان از

اساتید گرانقدر آقایان دکتر محمد کاظم مروج فرشی و دکتر محمد مهدی طهرانچی بخاطر

راهنمایی ها و مساعدت هایشان در انجام پروژه

جناب آقای دکتر امیرعبدالله زاده و جناب آقای دکتر رسول صراف ماموری، خانم مهندس زارع،

آقای مجید محسنی و آقای مهندس کارگر بخاطر کمک های فراوانشان برای به انجام رسیدن کار.

## چکیده

در این کار نمونه مورد بررسی آلیاژ مغناطیسی آهن پایه با ترکیب  $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Cu_1Nb_3$  می باشد که بهترین ترکیب یافت شده برای آلیاژهای فاینمت است. در ابتدا، دمای کریستالیزاسیون نمونه توسط آنالیز حرارتی تفاضلی بدست آمد. سپس نمونه در دماهای مختلف تحت خلاء مورد بازپخت حرارتی قرار گرفت و خواص ساختاری آن توسط XRD بررسی شد. نتایج XRD تشکیل نانوبلورهای FeSi را در دماهای بالاتر از دمای کریستالیزاسیون اولیه با اندازه ۱۰-۲۰ nm نشان می دهد که از رابطه شرر محاسبه شده و نتایج آن در جدول (۱-۳) آمده است. خواص سطحی و مغناطیسی این آلیاژ نیز توسط میکروسکوپ نیروی اتمی و میکروسکوپ نیروی مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن کاهش زبری سطح و نیز کاهش اندازه حوزه های مغناطیسی با بازپخت حرارتی نمونه و در نتیجه بهبود خواص مغناطیسی نرم آلیاژ در دمای بین دمای کریستالیزاسیون اولیه و ثانویه بود. در حالیکه با افزایش دما به بالای دمای کریستالیزاسیون ثانویه با تشکیل فازهای بورید در آلیاژ، خواص مغناطیسی نرم کاهش یافت. وابستگی خواص مغناطیسی به میکروساختار در مواد مغناطیسی نانوساختار توسط مدل ناهمسانگردی تصادفی هرزر بیان شد که برای اندازه ذرات کمتر از طول تبدلی صادق است.

واژه های کلیدی : نانو بلور، آلیاژ فاینمت ، بازپخت حرارتی

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
-------	------

### فصل اول

#### مقدمه

۱-۱- تاریخچه.....	۲
۱-۲- مواد مغناطیسی نرم و سخت.....	۵
۱-۳- مغناطیس اتمی.....	۶
۱-۴- تقسیم بندی مواد مغناطیسی.....	۸
۱-۴-۱- دیا مغناطیس ها.....	۹
۱-۴-۲- پارا مغناطیس ها.....	۱۰
۱-۴-۳- فرو مغناطیس ها.....	۱۱

### فصل دوم

#### معرفی مواد آمورف و نانوبلور و برخی ویژگی های آنها

۱-۲- مقدمه.....	۱۶
۲-۲- خواص و ویژگی های آلیاژهای مغناطیسی نرم.....	۱۷
۲-۳- آلیاژهای آمورف.....	۲۰
۲-۴- ساختار مواد نانوبلور.....	۲۱
۲-۵- بررسی های ترمودینامیکی و سینتیکی گذار برای مواد آمورف و نانوبلور.....	۲۳



۲۴	۶-۲- بررسی ویژگی های کاربردی آلیاژهای مغناطیسی نرم
۲۶	۷-۲- خواص مغناطیسی مواد نانوبلور
۲۶	۱-۷-۲- وادارندگی مغناطیسی
۲۷	۲-۷-۲- اشباع مغناطیسی
۲۹	۸-۲- کاربردهای آلیاژهای مغناطیسی فاینمت
۳۰	۱-۸-۲- ابزارهای مغناطیسی برای تشخیص وسایل نقلیه پارک شده
۳۱	۲-۸-۲- هسته های توانی پالسی
۳۱	۳-۸-۲- ابزارهای کدینگ برپایه نوارهای مگنتوالاستیک
۳۱	۹-۲- حوزه های مغناطیسی و حرکت دیوار حوزه ها
۳۵	۱۰-۲- سهم انرژی در شکل گیری حوزه
۳۵	۱-۱۰-۲- انرژی تبادل
۳۶	۲-۱۰-۲- انرژی مگنتواستاتیک
۳۷	۳-۱۰-۲- انرژی ناهمسانگردی
۳۹	۴-۱۰-۲- انرژی مگنتوالاستیک
۴۰	۵-۱۰-۲- انرژی دیوار حوزه

## فصل سوم

### نتایج تجربی و بحث

۴۲	۱-۳- مقدمه
۴۴	۲-۳- آنالیز حرارتی تفاضلی

- ۳-۳- میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)..... ۴۶
- ۳-۴- پراش پرتو X فازهای بلوری..... ۴۸
- ۳-۵- روش های مشاهده الگوی حوزه های مغناطیسی..... ۵۰
- ۳-۵-۱- روش بیتر..... ۵۰
- ۳-۵-۲- روش های مگنتوپتیکی..... ۵۱
- ۳-۵-۳- میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)..... ۵۱
- ۳-۵-۴- معرفی میکروسکوپ نیروی مغناطیسی (MFM)..... ۵۲
- ۳-۶- یافتن دمای بلوری شدن..... ۵۴
- ۳-۷- آنالیزهای میکروساختار..... ۵۵
- ۳-۸- بررسی تحولات سطح نمونه در حین فرایند نانوبلوری شدن توسط میکروسکوپ نیروی اتمی..... ۵۸
- ۳-۹- بررسی تغییرات حوزه های مغناطیسی در حین فرایند نانوبلوری شدن توسط میکروسکوپ نیروی مغناطیسی..... ۶۷
- ۳-۱۰- تاثیر نانوبلوری شدن روی اندازه های مغناطیسی..... ۷۵
- ۳-۱۱- اثر نانوبلوری شدن روی مگنتوتنگش نوار..... ۸۱
- ۳-۱۲- اثر زبری سطح روی ضخامت دیوار حوزه های مغناطیسی، اندازه حوزه ها و وادارندگی مغناطیسی..... ۸۲
- ۳-۱۲-۱- زبری سطح و فاکتور دی مغناطش..... ۸۲
- ۳-۱۲-۲- ضخامت دیوار حوزه..... ۸۴
- ۳-۱۲-۳- اندازه حوزه..... ۸۶

۳-۱۲-۴- وادارندگی مغناطیسی ..... ۸۷

## فصل چهارم

### نتیجه گیری

۴-۱- مقدمه ..... ۹۰

۴-۵- نتیجه گیری ..... ۹۱

واژه نامه ..... ۹۳

فهرست منابع ..... ۹۴

## فهرست تصاویر و جداول

صفحه	عنوان
۴	شکل (۱-۱): الف) تصویری از وسوریوم ب) تصویری از ترلا
۱۹	شکل (۱-۲): رویدادهای متوالی نانوکریستالیزاسیون آلیاژهای
۱۶	شکل (۲-۲): ساختار کریستالی $\alpha\text{-Fe (Si)}$
۲۲	شکل (۳-۲): چهارده وجهی نشان دهنده شکل دانه از مقطع مواد
۲۲	شکل (۴-۲): شکل شماتیکی مواد نانوبلور
۲۷	شکل (۵-۲): نفوذپذیری بر حسب اندازه دانه برای آلیاژهای مغناطیسی نرم مختلف
۳۰	شکل (۶-۲): ابزار مغناطیسی برای آشکارسازی وسایل نقله پارک شده
۳۴	شکل (۷-۲): چرخش $180^\circ$ درجه ای ممان های دوقطبی در دیوار حوزه مواد فرومغناطیس
۳۷	شکل (۸-۲): منحنی مغناطش تک کریستال مکعبی آهن و مکعبی نیکل با میدان اعمالی موازی با جهات مختلف کریستالوگرافی
۴۶	شکل (۱-۳): شماتیکی از یک سلول DTA
۴۸	شکل (۲-۳): شماتیکی از پروب AFM
۴۸	شکل (۳-۳): شماتیکی از سیستم اپتیکی آشکارسازی خمش کانتی لیور
۴۹	شکل (۴-۳): سیستم مختصاتی و زوایای خاص اندازه گیری XRD
۵۰	شکل (۵-۳): پهن شدگی پیک XRD برای ذرات کوچک
۵۴	شکل (۶-۳): تیپ MFM در میدان مغناطیسی نمونه
۵۵	شکل (۷-۳): منحنی DTA نوار مغناطیسی $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$

- شکل (۳-۸): الگوی XRD نمونه فاینمت بازیخت شده در دماهای مختلف ..... ۵۷
- شکل (۳-۹): میکروسکوپ پروبی روبشی مدل DME ..... ۶۰
- شکل (۳-۱۰): تصویر سه بعدی AFM ،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه آمورف همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۱
- شکل (۳-۱۱): تصویر سه بعدی AFM ،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $400^\circ$  درجه سانتیگراد همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۲
- شکل (۳-۱۲): تصویر سه بعدی AFM ،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $450^\circ$  درجه سانتیگراد همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۲
- شکل (۳-۱۳): تصویر سه بعدی AFM ،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $500^\circ$  درجه سانتیگراد همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۳
- شکل (۳-۱۴): تصویر سه بعدی AFM ،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $550^\circ$  درجه سانتیگراد همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۳
- شکل (۳-۱۵): تصویر سه بعدی AFM ،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $560^\circ$  درجه سانتیگراد همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۴
- شکل (۳-۱۶): تصویر سه بعدی AFM ،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $575^\circ$  درجه سانتیگراد همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۴
- شکل (۳-۱۷): تصویر سه بعدی AFM ،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $600^\circ$  درجه سانتیگراد همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۵

- شکل (۳-۱۸): تصویر سه بعدی AFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $65^\circ$  درجه سانتیگراد همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۵
- شکل (۳-۱۹): تصویر سه بعدی AFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $70^\circ$  درجه سانتیگراد همراه با پروفایل خطی ارتفاع آن ..... ۶۶
- شکل (۳-۲۰): تصویر فاز،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در دماهای مختلف ..... ۶۷
- شکل (۳-۲۱): تصویر MFM،  $80\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$  نمونه آمورف ..... ۶۹
- شکل (۳-۲۲): تصویر MFM،  $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $56^\circ$  درجه سانتیگراد و اندازه گیری عرض حوزه ..... ۷۱
- شکل (۳-۲۳): تصویر MFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $40^\circ$  درجه سانتیگراد و اندازه گیری عرض حوزه ..... ۷۲
- شکل (۳-۲۴): تصویر MFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $45^\circ$  درجه سانتیگراد و اندازه گیری عرض حوزه ..... ۷۲
- شکل (۳-۲۵): تصویر MFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $50^\circ$  درجه سانتیگراد و اندازه گیری عرض حوزه ..... ۷۳
- شکل (۳-۲۶): تصویر MFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $55^\circ$  درجه سانتیگراد و اندازه گیری عرض حوزه ..... ۷۳
- شکل (۳-۲۷): تصویر MFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $57.5^\circ$  درجه سانتیگراد و اندازه گیری عرض حوزه ..... ۷۴
- شکل (۳-۲۸): تصویر MFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $60^\circ$  درجه سانتیگراد و اندازه گیری عرض حوزه ..... ۷۴

- شکل (۳-۲۹): تصویر MFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $650^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد و اندازه گیری عرض حوزه ..... ۷۵
- شکل (۳-۳۰): تصویر MFM،  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  نمونه بازیخت شده در  $700^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد و اندازه گیری عرض حوزه ..... ۷۵
- شکل (۳-۳۱): N ذره نانوبلور در حجم  $L_{ex}^3$  ..... ۷۶
- شکل (۳-۳۲): تغییرات محور آسان موضعی با مکان و تغییرات جهت مغناطش در پاسخ به ناهمسانگردی موضعی وجفت شدگی تبادلی ..... ۷۸
- شکل (۳-۳۳): تغییرات مگنتوتنگش با دمای بازیخت حرارتی برای نوار فاینمت ..... ۸۲
- شکل (۳-۳۴): مقدار فاکتور دی مغناطش به عنوان تابعی از نمای زبری سطح ..... ۸۴
- شکل (۳-۳۵): شماتیکی از دیوار بلاخ که t ضخامت نوار و D ضخامت دیوار را نشان می دهد ..... ۸۷
- جدول (۲-۱): ثابت های ناهمسانگردی برای آهن، نیکل و کپالت ..... ۳۸
- جدول (۳-۱): اندازه ذرات پس از باز پخت به مدت یک ساعت در دماهای گوناگون (محاسبه شده با رابطه شرر از الگوهای XRD) ..... ۵۹

فهرست علائم و نشانه ها

a	پارامتر شبکه
A	سختی تبدالی
$A_{am}$	سختی تبدالی فاز آمورف
$A_{cr}$	سختی تبدالی فاز کریستالی
$\alpha$	ثابت میدان متوسط
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	کسینوس زاویه بین بردار مغناطش و میدان اعمالی
B	القای مغناطیسی
$B_s$	القای مغناطیسی اشباع
$B_I$	تابع بریلوئن
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	کسینوس زاویه بین بردار مغناطش و جهت میدان اشباع
c	سرعت نور
C	ثابت کوری
$\chi$	پذیرفتاری مغناطیسی
D, Dg	اندازه دانه
E	انرژی
e	بارالکتریکی
$E_{ex}$	انرژی تبدالی
$E_k$	انرژی ناهمسانگردی
$E_{mag}$	انرژی مگنتواستاتیک
$E_{me}$	انرژی مگنتوتنگش
$E_w$	انرژی دیوار حوزه
g	فاکتور شکافتگی اسپکتروسکوپیک
h	ثابت پلانک
H	شدت میدان مغناطیسی
Hc	وادارندگی مغناطیسی
$H_d$	میدان دی مغناطش
J	عدد کوانتومی ممنوم زاویه ای کل



$K$	ثابت ناهمسانگردی
$k_B$	ثابت بولتزمن
$k_1$	اولین ثابت ناهمسانگردی برای شبکه مکعبی
$K_2$	دومین ثابت ناهمسانگردی برای شبکه مکعبی
$K_u$	ناهمسانگردی مغناطیسی تک محوری
$K_{eff}$	ناهمسانگردی مغناطیسی موثر
$L$	ممنتوم زاویه ای چرخشی
$L_{ex}$	طول تبادل
$l$	طول
$l_d$	ضخامت دیوار حوزه
$\lambda$	مگنتوتنگش
$M$	مغناطش
$M_s$	مغناطش اشباع
$m$	ممان مغناطیسی
$m_e$	جرم الکترون
$\mu$	نفوذپذیری مغناطیسی
$\mu_B$	مگنترون بوهر
$\mu_i$	نفوذپذیری ذاتی
$\mu_0$	نفوذپذیری مغناطیسی خلاء
$N$	تعداد اتم ها در واحد حجم
$N_d$	فاکتور دی مغناطش
$\varphi$	زاویه
$r$	شعاع
$S$	عدد کوانتومی ممنتوم زاویه ای اسپین اتمی
$T$	دما
$T_c$	دمای کوری
AFM	میکروسکوپ نیروی اتمی
DTA	آنالیز حرارتی تفاضلی
MFM	میکروسکوپ نیروی مغناطیسی
XRD	پراش پرتو X

فهرست واحدها

T (تسلا)	B	القای مغناطیسی
T (تسلا)	B <sub>s</sub>	القای مغناطیسی اشباع
بدون واحد	$\chi$	پذیرفتاری مغناطیسی
J (ژول)	E	انرژی
Am <sup>-1</sup> (آمپر بر متر)	H	شدت میدان مغناطیسی
Am <sup>-1</sup> (آمپر بر متر)	H <sub>c</sub>	وادارندگی مغناطیسی
Am <sup>-1</sup> (آمپر بر متر)	H <sub>d</sub>	میدان دی مغناطش
J/m (ژول بر متر)	K	ثابت ناهمسانگردی
m (متر)	l	طول
Am <sup>-1</sup> (آمپر بر متر)	M	مغناطش
Am <sup>2</sup> (آمپر بر متر مربع)	m	ممان مغناطیسی
Am <sup>-1</sup> (آمپر بر متر)	M <sub>s</sub>	مغناطش اشباع
Hm <sup>-1</sup> (هانری بر متر)	$\mu$	تراوایی مغناطیسی
K (کلوین)	T	دما
K (کلوین)	T <sub>c</sub>	دمای کوری

مقادیر ثابت های فیزیکی

$2/998 \times 10^8$ m/s	c	سرعت نور در خلاء
$-1/602 \times 10^{-19}$ e	e	بار الکتریکی
$6/626 \times 10^{-34}$ Js	h	ثابت پلانک
$1/381 \times 10^{-23}$ J/K	$k_B$	ثابت بولتزمن
$9/109 \times 10^{-31}$ Kg	$m_e$	جرم الکترون
$9/274 \times 10^{-24}$ Am <sup>2</sup> (=J/T)	$\mu_B$	مگنترون بوهر
$1/165 \times 10^{-29}$ m/A		
$1/257 \times 10^{-6}$ H/m	$\mu_0$	نفوذ پذیری خلاء

فصل اول

**مقدمه**