دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی شیمی

عنوان:

طراحی ترمومکانیکی مخازن تحت فشار نانوکامپوزیتی

به منظور ذخیره سازی گاز هیدروژن

استاد راهنما:

دکتر ابراهیم نعمتی لای

توسط:

مهدیه رادفر

دی ماه ۱۳۹۲

بسمه تعالی

تاریخ:
شماره:
پیوست:

دانشگاه کاشان
دانشکده مهندسی

مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی: دانشجو خانم مهدیه رادفر شماره دانشجویی: ۹۰۱۳۵۴۰۲۰۹

رشته : مهندسی شیمی دانشکده : مهندسی

عنوان پایان نامه : طراحی ترمو مکانیکی مخازن کامپوزیتی به منظور ذخیره سازی گاز هیدروژن

تعداد واحد پایان نامه : ۶ واحد **تاریخ دفاع : ۹۲/۱۰/ ۸**

این پایان‌نامه به مدیریت تحصیلات تکمیلی به منظور بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد ارایه می‌گردد. دفاع از پایان نامه در تاریخ ۹۲/۱۰/ ۸ مورد تأیید و ارزیابی

هیات داوران قرار گرفت و با نمره ۱۹,۷۸ **و درجه** عالی **به تصویب رسید.**

اعضاء هیات داوران

عنوان	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر ابراهیم نعمتی لای	استادیار	
۲- استاد داور داخل دانشگاه	دکتر رضا گل حسینی	استاد یار	
۳- استاد داور داخل دانشگاه	دکتر محمد رضا مزدیان فرد	استادیار	
٤- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد رضا مزدیان فرد	استادیار	

آدرس: کاشان- بلوار قطب راوندی
کدپستی ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷
تلفن ۵۵۵۹۹۳۰-دورنگار ۵۵۵۹۹۳۰
http: www.kashanu.ac.ir

تقدیم به:

پدرم:

الگوی استقامت و صبوری در عصر ناشکیبی

مادرم:

نازنینی که سراسر زندگی اش، درس ایثار و فداکاری است

برادرم:

که همواره در طول تحصیل، تکیه گاه من در مواجهه با مشکلات و وجودش مایه دلگرمی من می باشد.

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

از استاد گرامی و بزرگوار **جناب آقای دکتر نعمتی لای** که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان نامه تقبل نموده اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم.

همچنین از **جناب آقای دکتر مزدیان فرد** و **جناب آقای دکتر گل حسینی** که داوری این پروژه را بر عهده داشتند تشکر می نمایم.

چکیده

امروزه یکی از پدیده‌های زیان‌آوری که بشر با آن روبرو شده ، پدیدهٔ گرم شدن زمین بر اثر تولید بیش از حد گازهای گلخانه‌ای است. یکی از راه‌های کم کردن تولید گازهای گلخانه‌ای استفاده از پیل‌های سوختی در وسایل نقلیه می‌باشد. در حالی‌که، مشکل اصلی در زمینه استفاده وسیع از پیل‌های سوختی، فقدان فناوری موثر برای ذخیره هیدروژن است.

بنابراین لازم است به منظور پیش بینی رفتار مخازن ذخیره کامپوزیتی، زمانی که در شرایط مختلف بارگذاری قرار می‌گیرد، مدل جامعی ارائه شود.

یکی از عوامل مهم در بهینه‌سازی مخازن ذخیره‌سازی گاز هیدروژن، عوامل مکانیکی از جمله تنش‌های مواد سازنده مخزن و نیز جنس این مواد می‌باشد که در این کار سعی شده است با بررسی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌های مختلف و جایگزینی نیمی از فلز سازنده مخزن با این مواد، علی‌رغم هزینه اولیه بالاتر، بخش قابل توجهی از وزن مخزن کاهش یافته و به تبع آن باعث سهولت حمل‌ونقل و کاهش هزینه‌های آن می‌گردد.

کلمات کلیدی : ذخیره سازی هیدروژن، کامپوزیت، نانو کامپوزیت، مخازن تحت فشار

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: روش های ذخیره سازی گاز هیدروژن ۱

مقدمه ۲

۱-۱- فشرده سازی گاز هیدروژن ۴

۱-۱-۱- تردی هیدروژنی ۵

۱-۲- مایع سازی گاز هیدروژن ۶

۱-۳- ذخیره سازی به کمک هیدریدهای فلزی ۹

۱-۴- جذب فیزیکی هیدروژن ۱۳

۱-۴-۱- نانولوله های کربنی ۱۳

۱-۴-۱-۱-انواع نانولوله های کربنی ۱۴

۱-۴-۲- کاربرد نانولوله های کربنی ۱۶

۱-۴-۲-۱- تقویت کننده در کامپوزیت ها ۱۶

۱-۴-۲-۲- کاربرد نانولوله های کربنی در ذخیره سازی هیدروژن ۱۶

فصل دوم: طراحی مخزن ۱۸

مقدمه ۱۹

۲-۱- مخازن تحت فشار ۲۰
۲-۱-۱- مخازن فلزی ۲۰
۲-۱-۲- مخازن کامپوزیت با لایه فلزی حلقه پیچیده ۲۱
۲-۱-۳- مخازن کامپوزیت با لایه فلزی کاملا پیچیده ۲۱
۲-۱-۴- مخازن تمام کامپوزیتی یا مخازن با لایه پلاستیکی کاملا پیچیده ۲۲
۲-۲- اجزاء مخزن استوانه ای ۲۳
۲-۲-۱- پوسته ۲۳
۲-۲-۲- عدسی یا کلاهک ۲۴
۲-۲-۳- دریچه بازدید ۲۴
۲-۲-۴- بازوی لنگری شکل ۲۵
۲-۲-۵- لوله های ورودی و خروجی ۲۵
۲-۲-۶- خروجی هوا ۲۶
۲-۲-۷- لوله تخلیه ۲۶
۲-۲-۸- سر ریز ۲۶
۲-۲-۹- شیر اطمینان ۲۷
۲-۳- جنس مخزن ۲۸
۲-۳-۱- مواد فلزی ۲۸

۲-۳-۱-۱- فولاد کربنی ۲۸
۲-۳-۱-۱- ۱-فولاد های کم کربن ۲۹
۲-۳-۱-۱- ۲-فولاد های میان کربن ۲۹
۲-۳-۱-۱- ۳-فولاد های پر کربن ۳۰
۲-۳-۱-۲- Aluminium-6061-T6 ..... ۳۰
۲-۳-۲- مواد کامپوزیتی ۳۲
۲-۳-۲-۱- الیاف شیشه ای ۳۲
۲-۳-۲-۲- کامپوزیت kevlar ۳۴
۲-۳-۳- مواد نانوکامپوزیتی ۳۵
۲-۴- مخازن تک لایه ۳۶
۲-۴-۱- محاسبه ضخامت مخزن ۳۸
۲-۵- طراحی مخازن کامپوزیتی ۵۳
فصل سوم: بهینه سازی مخازن کامپوزیتی ۷۰
مقدمه ۷۱
۳-۱- ساختار مخزن ۷۱
۳-۱-۱- جداره بیرونی ۷۳
۳-۱-۲- جداره دینامیکی ۷۳

۳-۱-۳- جداره فیلتری ۷۴

۳-۲-طراحی مخزن ۷۴

۳-۳-تجزیه و تحلیل فیزیکی ۷۷

۴-نتیجه گیری ۱۰۰

فهرست منابع و مراجع ۱۰۴

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- نمونه‌ای از نانولوله‌های کربنی ۱۵

شکل ۲-۱- نمونه‌ای از مخازن تحت فشار ذخیره گاز هیدروژن ۲۰

شکل ۲-۲- نمونه‌ای از پوسته مخزن ۲۳

شکل ۲-۳- نمونه‌ای از کلاهک مخزن ۲۴

شکل ۲-۴- نمونه‌ای از بازوی لنگری شکل مخزن ۲۵

شکل ۲-۵- نمونه‌ای از شیر اطمینان مخازن ۲۷

شکل ۲-۶- نمودار جرم فلز مخزن بر حسب فشار ۵۰

شکل ۲-۷- نمودار ذخیره جرمی گاز هیدروژن در دمای ۲۳۳ کلوین ۵۰

شکل ۲-۸- نمودار ذخیره جرمی گاز هیدروژن در دمای ۲۷۳ کلوین ۵۱

شکل ۲-۹- نمودار ذخیره جرمی گاز هیدروژن در دمای ۲۹۸ کلوین ۵۱

شکل ۲-۱۰- نمودار ذخیره حجمی گاز هیدروژن ۵۲

شکل ۲-۱۱- نمودار هزینه مخزن به دلار بر حسب فشار مخزن ۵۲

شکل ۲-۱۲-نمودار ذخیره جرمی گاز هیدروژن در مخازن کامپوزیتی در دمای ۲۳۳ کلوین ۶۶

شکل ۲-۱۳- نمودار ذخیره جرمی گاز هیدروژن در مخازن کامپوزیتی در دمای ۲۷۳ کلوین ۶۷

شکل ۲-۱۴- منحنی جرم مخزن کامپوزیتی بر حسب فشار ۶۸

شکل ۲-۱۵- نمودار هزینه مخزن به دلار بر حسب فشار مخزن ۶۸

شکل ۳-۱- نمونه‌ای از مخزن کامپوزیتی طراحی شده ۷۲

شکل ۳-۲- منحنی دانسیته حجمی هیدروژن ذخیره شده بر حسب فشار ۸۹

شکل ۳-۳- منحنی دانسیته جرمی هیدروژن ذخیره شده بر حسب فشار ۸۹

شکل ۳-۴- منحنی دانسیته حجمی هیدروژن ذخیره شده بر حسب فشار ۹۰

شکل ۳-۵- منحنی دانسیته جرمی هیدروژن ذخیره شده بر حسب فشار ۹۰

شکل ۳-۶- منحنی دانسیته حجمی هیدروژن ذخیره شده بر حسب فشار ۹۱

شکل ۳-۷- منحنی دانسیته جرمی هیدروژن ذخیره شده بر حسب فشار ۹۱

شکل ۳-۸- منحنی دانسیته حجمی هیدروژن بر حسب فشار ۹۹

شکل ۳-۹- منحنی دانسیته جرمی هیدروژن ذخیره شده بر حسب فشار ۹۹

شکل ۳-۱۰- منحنی دانسیته حجمی هیدروژن بر حسب فشار ۱۰۰

شکل ۳-۱۱- منحنی دانسیته جرمی هیدروژن ذخیره شده بر حسب فشار ۱۰۰

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۱-۱- اهداف ذخیره سازی هیدروژن در وسایل نقلیه ۴

جدول۱-۲- دانسیته هیدروژن در هیدریدهای مختلف ۱۰

جدول۲-۱- مشخصات مکانیکی فولاد و آلومینیم ۳۱

جدول۲-۲- ترکیبات انواع الیاف شیشه ای بر حسب درصد وزنی ۳۳

جدول۲-۳- خواص فیزیکی فیبرهای کامپوزیتی ۳۵

جدول۲-۴- مشخصات فیزیکی نانولوله‌های کربنی ۳۶

جدول۲-۵- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن فولادی در دمای 233K ۴۱

جدول۲-۶- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن آلومینیم در دمای 233K ۴۲

جدول۲-۷- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن فولادی در دمای 273K ۴۴

جدول۲-۸- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن آلومینیم در دمای 273K ۴۵

جدول۲-۹- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن فولادی در دمای 298K ۴۷

جدول۲-۱۰- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن آلومینیم در دمای 298K ۴۸

جدول۲-۱۱- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن آلومینیم/E-glass در دمای 233K ۵۵

جدول۲-۱۲- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن آلومینیم/kevlar در دمای 233K ۵۷

جدول۲-۱۳- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن آلومینیم/E-glass در دمای 273K ۵۹

جدول۲-۱۴- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن آلومینیم/kevlar در دمای 273K..... ۶۰

جدول۲-۱۵- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن آلومینیم/Nanotube در دمای 233K..... ۶۲

جدول۲-۱۶- نتایج مربوط به ذخیره گاز هیدروژن در مخزن آلومینیم/Nanotube در دمای 273K..... ۶۴

جدول۳-۱- ضریب تراکم پذیری بر حسب فشار..... ۷۹

جدول۳-۲- مشخصات فیزیکی مخزن..... ۸۰

جدول۳-۳- مشخصات فیزیکی دیواره بیرونی ۸۰

جدول۳-۴- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۸۱

(L=209cm ، T=5cm ، t_{out}=1cm ، D=25 ، V_{total}=111Lit ، m_{total}=83kg)

جدول۳-۵- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۸۲

(L=23.19cm ، T=5cm ، t_{out}=1cm ، D=50 ، V_{total}=111Lit ، m_{total}=83kg)

جدول۳-۶- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۸۳

(L=209cm ، T=5cm ، t_{out}=1.5cm ، D=25 ، V_{total}=111Lit ، m_{total}=83kg)

جدول۳-۷- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۸۴

(L=209cm ، T=5cm ، t_{out}=2cm ، D=25 ، V_{total}=111Lit ، m_{total}=83kg)

جدول۳-۸- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۸۵

(L=92.03cm ، T=1cm ، t_{out}=1cm ، D=35 cm، V_{total}=111Lit ، m_{total}=83kg)

جدول۳-۹- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۸۶
(L=92.03cm ، T=5cm ، t_{out}=1cm ، D=35 cm، V_{total}=111Lit ، m_{total}=83kg)
جدول۳-۱۰- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۸۷
(L=92.03cm ، T=10cm ، t_{out}=1cm ، D=35 cm، V_{total}=111Lit ، m_{total}=83kg)
جدول۳-۱۱- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۸۸
(L=92.03cm ، T=15cm ، t_{out}=1cm ، D=35 cm، V_{total}=111Lit ، m_{total}=83kg)
جدول۳-۱۲- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۹۲
(L=109cm ، T=5cm ، t_{out}=1cm ، D=25 cm، V_{total}=62 Lit ، m_{total}=55.6kg)
جدول۳-۱۳- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۹۳
(L=109cm ، T=5cm ، t_{out}=1.5cm ، D=25 cm، V_{total}=62 Lit ، m_{total}=55.6kg)
جدول۳-۱۴- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۹۴
(L=109cm ، T=5cm ، t_{out}=2cm ، D=25 cm، V_{total}=62 Lit ، m_{total}=55.6kg)
جدول۳-۱۵- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۹۵
(L=109cm ، T=1cm ، t_{out}=1cm ، D=35 cm، V_{total}=62 Lit ، m_{total}=55.6kg)
جدول۳-۱۶- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۹۶
(L=109cm ، T=5cm ، t_{out}=1cm ، D=35 cm، V_{total}=62 Lit ، m_{total}=55.6kg)
جدول۳-۱۷- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۹۷

(L=109cm ، T=10cm ، t_{out}=1cm ، D=35 cm، V_{total}=62 Lit ، m_{total}=55.6kg)

جدول۳-۱۸- دانسیته هیدروژن ذخیره شده در مخزنی با دیواره بیرونی کربنی ۹۸

(L=109cm ، T=15cm ، t_{out}=1cm ، D=35 cm، V_{total}=62 Lit ، m_{total}=55.6kg)

فهرست علائم اختصاری (Abbreviation)

a	Bennedict-Webb-Rubin equation constant, atm l^3 mol-^{3}
A	Bennedict-Webb-Rubin equation constant, atm l^2 mol^{-2}
b	Bennedict-Webb-Rubin equation constant, l^2 mol^{-2}
B	Bennedict-Webb-Rubin equation constant, atm l mol^{-1}
c	Bennedict-Webb-Rubin equation constant, atm K^2 l^3 mol^{-3}
C	Bennedict-Webb-Rubin equation constant, atm K l^2 mol^{-2}
D	Tank Diameter, cm
F_S	Factor of safety, dimensionless
L	Tank length, cm
T_{pr}	Reduced temperature
P_c	Critical pressure
m_{dyn}	Dynamic wall mass, kg
m_{gas}	Gaseous hydrogen mass, kg
m_{H2dyn}	Absorbed hydrogen mass in the dynamic wall, kg
m_{outer}	Outer wall mass, kg
m_{total}	System mass, kg
$m_{H2total}$	Total hydrogen mass in the system, kg
$S_{ysingle}$	Yield strength of single walled pressure vessel, MPa
z	Compressibility factor of hydrogen, dimensionless
α'	Bennedict-Webb-Rubin equation constant, l^3 mol^{-3}
γ	Bennedict-Webb-Rubin equation constant, l^2 mol^{-2}
Ψ	Ratio of the mass of the gas to the mass of the shell

فصل اول

روش های ذخیره سازی

هیدروژن

مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی، کم شدن منابع فسیلی، افزایش آلودگی محیط زیست و پدیده گرم شدن زمین ناشی از تولید روز افزون گازهای گلخانه‌ای نیاز به جایگزینی سوخت‌های فسیلی روز به روز جدی‌تر می‌شود. بهترین راه حل برای مسائل فوق جایگزینی بنزین با سوختی پاک مانند هیدروژن است. این ماده در مقایسه با سایر سوخت‌ها می‌تواند با راندمانی بالاتر و آلایندگی کمتر مورد استفاده قرار گیرد. گاز هیدروژن با حداکثر راندمان احتراق، سوخته شده و واکنش احتراق آن به طور نسبتا کاملی انجام می‌شود.

هیدروژن یکی از سوخت‌های ایده‌آل برای ابزارهایی چون پیل‌های سوختی است اما مشکل اصلی در زمینه استفاده وسیع از پیل‌های سوختی، فقدان فناوری موثر برای ذخیره هیدروژن است. هیدروژن در شرایط عادی گاز است و فضای بسیار زیادی اشغال می‌کند. این امر در کاربردهای ثابت مشکلی ایجاد نمی‌کند، زیرا با استفاده از فناوری‌های فعلی می‌توان این ماده را در مخازن بزرگ در فشار کمی بالا نگهداری کرد. اما برای اینکه بتوان از این فناوری در کاربردهای سیار همانند خودروها استفاده کرد، باید راهی برای ذخیره ارزان، ایمن، موثر و فشرده این گاز پیدا کرد. این ماده دارای بیشترین مقدار دانسیته انرژی (۱۲۰ MJ/kg) است، که تقریبا سه برابر دانسیته انرژی بنزین (۴۴/۵ MJ/kg) و سوخت دیزل (۴۲/۵ MJ/kg) می‌باشد[۱].

در پیل‌های سوختی ۵ کیلوگرم هیدروژن جهت مسافت ۵۰۰ کیلومتر کافی می باشد[۲]. همچنین در واکنش هیدروژن با اکسیژن ماده سمی تولید نمی‌شود، ولی در اثر واکنش با هوا ماده سمی اکسید نیتروژن تولید می‌شود.

نحوه ذخیره‌سازی هیدروژن به صورت ایمن همراه با دانسیته حجمی و وزنی بالا بسیار حائز اهمیت است. هیدروژن در دما و فشار طبیعی، یک گاز است و به این علت، انتقال و ذخیره آن از سوخت‌های مایع دیگر، دشوارتر است. یک کیلوگرم هیدروژن گازی در دمای محیط و فشار یک اتمسفر در حدود ۱۱ مترمکعب فضا اشغال می‌کند[۳]. لذا جهت کاهش این حجم زیاد به منظور استفاده کاربردی از هیدروژن لازم است از روش‌های زیر برای ذخیره‌سازی استفاده شود :

۱- فشرده‌سازی گاز هیدروژن
۲- مایع‌سازی گاز هیدروژن
۳- جذب فیزیکی روی مواد جاذب
۴- ذخیره‌سازی در فلزات (به صورت هیدرید)

ذخیره‌سازی هیدروژن در مخازن تحت فشار به طور وسیع مطالعه شده است و در کارهای انجام شده فقط دانسیته جرمی با اهداف DOE[1] مطابقت داشته است. اما در این کار با گزارش نتایج بدست آمده اثبات شده است دانسیته جرمی و حجمی گاز هیدروژن ذخیره شده با اهداف DOE مطابقت دارد.

در این فصل خلاصه‌ای از روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن که در حال حاضر یا در آینده‌ای نزدیک مورد استفاده قرار خواهند گرفت، بررسی می‌شود.

[1] Department of Energy