



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی و تحلیل سه بعدی جریان تراکم ناپذیر در پمپهای الکترومغناطیس (با سطح مقطع مربعی شکل)

اساتید راهنما:

دکتر خوشنویس

دکتر حامدی

دانشجو:

محمد حسن

اسفند ۱۳۸۶



تشکر و قدردانی

اکنون که به لطف ایزد منان این پایان نامه به پایان رسیده است بر خود واجب می دانم که از زحمات بی دریغ و راهنماییهای سودمند اساتید ارجمند جناب آقای دکتر خوشنویس و جناب آقای دکتر حامدی که همواره نظرات مفیدشان در طول مدت تحصیل راه گشای اینجانب بوده صمیمانه قدر دانی نمایم.

همچنین بر خود لازم می دانم که از آقایان دکتر مغربی و دکتر فرزانه و دکتر هاشمی و دکتر شاهمردان که مرا در این راه یاری نموده اند ، تشکر نمایم و از کلیه پرسنل زحمتکش دانشگاه صنعتی شاهرود بخصوص دانشکده مهندسی مکانیک کمال تشکر و قدر دانی را دارم.

فهرست مطالب

فصل اول

فهرست مطالب

فصل اول

صفحه

پمپهای الکترومغناطیسی	۱
پیشگفتار.....	۱
تاریخچه.....	۲
پمپ مروری بر فناوری پمپ الکترومغناطیسی (EM).....	۲
پمپهای انتقالی.....	۳
پمپ هدایت جریان مستقیم.....	۳
پمپ هدایت جریان تناوبی.....	۹
طرز کار پمپ های الکترومغناطیسی.....	۱۲
اصول عملکردی پمپ.....	۱۲
جهت:.....	۱۲

مزایای پمپ های الکترومغناطیس.....	۱۳
مشخصات فلزات مذاب مورد استفاده در سیستم.....	۱۳
قابلیت های سیستم.....	۱۳
نمودار پمپ	۱۴
پمپ های الکترومغناطیسی دو مرحله ای.....	۱۵
بررسی عملکرد سه پمپ الکترو مغناطیسی طراحی شده در NASA.....	۱۶
خلاصه.....	۱۶
مقدمه.....	۱۸
توضیح طرح.....	۱۹
الف) اصول عملکرد.....	۱۹
ب) چیدمان کلی.....	۲۰
پ) Stator Assembly.....	۲۶
ت) مبدل گرمایی و بدنه (Frame).....	۳۰
ث) Duct.....	۳۴
ج) عایق بندی حرارتی.....	۳۶
ارزیابی طرح.....	۳۶

- الف) ارزیابی مفهوم طرح..... ۳۶
- ب) عملکرد و خصوصیات طرح..... ۴۲
- پ) بحث در مورد پارامترهای اصلی..... ۴۶
- ت) الزامات. Power Conditioning..... ۴۸
- ۱- The synchronous static Frequency divider..... ۴۹
- الف- Silicon controlled Rectifier Circuit..... ۴۹
- ب. pulse generating circuits..... ۴۹
- پ. Frequenc counter or divider..... ۵۵
- ت. Gatin circuit..... ۵۵
- ث. Triggering circuit..... ۵۶
- ۲- ترانسفورماتور ورودی..... ۵۶
- کنترل پمپ..... ۶۰
- کنترل ولتاژ..... ۶۰
- کنترل ولتاژ فرکانس..... ۶۱
- محاسبات عملکردی- مدار Equivalent..... ۶۱

آنالیز هیدرولیک..... ۶۲

محاسبات مکانیکی طرح..... ۶۷

مجرا..... ۶۸

الف) پوشش بیرونی..... ۶۸

۱- فشار اولیه..... ۶۸

۲- فشار ناشی از عقب کشیدن (جمع شدن) متناسب پوشش حلقه..... ۶۸

۳- فشار ناشی از نا پیوستگی شکاف بخش انتهایی ۶۹

۴- فشار ناشی از نا پیوستگی رسانا..... ۷۰

- فشار اولیه..... ۷۱

- فشار ناشی از نا پیوستگی پوشش بیرونی..... ۷۲

۱- واکنش نهایی..... ۷۴

ث) مارپیچ..... ۷۵

ه) لوله های ورود/خروج..... ۷۶

الف) فشار درونی..... ۷۷

۱- واکنش در اتصال **Hastelloy B**..... ۷۹

- واکنش در اتصال اینکونل..... ۸۰

مبدل گرما ۸۶

استرس مبنی بر گسترش دمایی تفاضلی..... ۸۷

۳- خلاصه وضعیت فشار - مبدل گرما..... ۸۷

ث) پوشش مبدل گرما..... ۸۷

۱- عقب کشیدن متناسب..... ۸۸

فصل دوم

معادلات حاکم..... ۹۱

۱-۲ : شرایط مرزی و شرایط اولیه..... ۹۱

۱-۱-۲ : شرایط مرزی در دیواره‌های جامد..... ۹۲

۲-۱-۲ : شرایط مرزی در ورودی..... ۹۳

۳-۱-۲ : شرایط مرزی در خروجی..... ۹۳

۴-۱-۲ : شرایط اولیه..... ۹۵

۲-۲ : الگوریتمهای تحلیل مسائل پایدار..... ۹۵

۱-۲-۲ : روش تراکم پذیری مصنوعی..... ۹۶

۲-۲-۲ : روش معادله پواسون برای فشار..... ۹۷

۳-۲ : نحوه تولید مش..... ۹۸

۴-۲ : معادلات حاکم بر سیال الکترومغناطیس..... ۱۰۰

۱-۴-۲ : نحوه گسسته کردن معادلات حاکم..... ۱۰۱

۲-۴-۲ : صورت گسسته معادلات حاکم در دستگاه مختصات کارترین.....۱۰۱

۲-۵ : نحوه اعمال شرایط مرزی..... ۱۰۴

۲-۶ : نحوه اجرای روش علامتگذاری و سلول..... ۱۰۶

فصل سوم

بررسی چگونگی انتقال حرارت به وسیله پمپهای الکترومغناطیسی.....۱۰۸

چکیده..... ۱۰۸

۱-۳-مقدمه..... ۱۰۹

۲-۳-سیستم سدیم مایع..... ۱۱۱

۳-۳- توضیحات در مورد جریان (سیال) سدیم..... ۱۱۱

۳-۴- مخزن های فشاری (Dump Tanks)..... ۱۱۳

۳-۵- Cold Trap..... ۱۱۵

۳-۶- مخزن فشار شکن (Surge Tank)..... ۱۱۵

۳-۷- سلول آزمایش..... ۱۱۷

۳-۸- پمپ الکترومغناطیسی..... ۱۲۰

- ۳-۹- جریان سنج..... ۱۲۰
- ۳-۱۰- ارتفاع یاب ۱۲۳
- ۳-۱۱- فیلتر..... ۱۲۳
- ۳-۱۲- سردکن ۱۲۳
- ۳-۱۳- بخش یا مقطع یخ زده (Frozen section) یخ زده ، مسدود ۱۲۳
- ۳-۱۴- کنترل و ورودی حلقه نیرو حلقه (مدار) سدیم ۱۲۵
- ۳-۱۵- مدار گرمایی حلقه سدیم ۱۲۵
- ۳-۱۶- کنترل و اندازه گیری حرارت..... ۱۳۳
- ۳-۱۷- سیستم ایمنی..... ۱۳۶
- ۳-۱۸- محدود کردن سدیم (جلوگیری از نشت سدیم)(Sodium Containment)..... ۱۳۶
- ۳-۱۹- شناسایی و جلوگیری از نشت..... ۱۳۸
- ۳-۲۰- سرد کننده اضطراری..... ۱۴۰
- ۳-۲۱- کاهش دهنده فشار گاز..... ۱۴۱
- ۳-۲۲- سیستم شوینده (تصفیه)..... ۱۴۱

فصل چهارم

- نتایج ۱۴۶
- ۴-۱- دقت و حساسیت ۱۴۶

۲-۴- بررسی کلی جریان در پمپ های مغناطیسی ۱۴۸

۳-۴- بررسی اثر پارامترهای میدان جریان و میدان مغنا..... ۱۵۱

مراجع ۱۵۸

علائم و نشانه ها

ارتفاع کانال بر حسب متر	a
پهنای کانال بر حسب متر	b
میدان مغناطیسی بر حسب Wb/m^2 یا T	B
طول مفید بر حسب متر	c
شکست آهن بر حسب متر	d
نیروی محرکه متقابل الکتریکی بر حسب V	E
عامل اصلاحی	fcor
نیرو بر حسب N	F
جریان الکتریکی اصلی بر حسب A	I
جریان میدان بر حسب A	I_{Field}
تعداد دور های پیچیدن سیم	N
فشار بر حسب N/m^2 یا سانتی متر جیوه (Hg)	P
مقاومت الکتریکی بر حسب اهم	R
تنش الکتریکی بر حسب V	V
نرخ حجم گردش بر حسب l/s	W

علائم یونانی

فشار ثابت بر حسب سانتی متر جیوه	AL
نفوذ پذیری مغناطیسی بر حسب $Wb/(Am)$	M

حروف اختصاری

انشعاب	b
مفید	e
تجربی	exp
نظری	teo
دیوار	w
آمپر	A
جریان متناوبی	AC
پمپ القایی خطی حلقوی	ALIP
جریان مستقیم	DC
میدان الکترومغناطیسی	EM
نیروی الکترومغناطیسی	EMF
گالون در دقیقه	GPM
جیوه	Hg
تقسیم شده به درجه سانتیگراد	K
کیلوپاسکال	kPa
میلی گرم بر ثانیه	mg/s
متر بر ثانیه	m/s
سدیم پتاسیم	Nak
لید - تلورید	PbTe
میانگین ریشه به توان ۲	RMS
سیلیکون - ژرمانیوم	SiGe

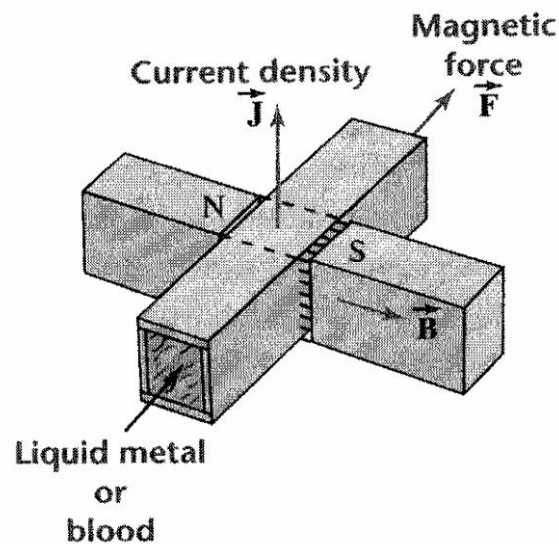
پمپ القایی ماریچ	SIP
مدار سدیم پتاسیم فلزی	SNaKC
سیستمهای نیروی هسته ای کمکی	SNAP
دمابرقی	TE
یادداشت فنی	TM
بردار میدان مغناطیسی	B
کسینوس	Cos
حجم تفاضلی	d^3x
بردار تراکم جریان	j
بزرگی تراکم جریان	j
طول	l
حداکثر میزان جریان و میدان مغناطیسی	Max
نیروی ورودی	P_{IN}
مقاومت	R
سینوس	sin
شتاب مایع، سرعت جریان	u
افت ولتاژ دیوار کانال	Vw
پهنا	w
مختصات طولی (از طول)	x
ضریب سبک	A

ΔP	افزایش فشار کل پمپ
ΔT	تغییرات دمایی بین اتصالات دما برقی
ΔV	تغییرات ولتاژ بین اتصالات دما برقی
η	کارایی الکتریکی پمپ
θ	تفاوت فاز زمان جریان متغیر و میدان مغناطیسی

پمپهای الکترومغناطیسی

پیشگفتار

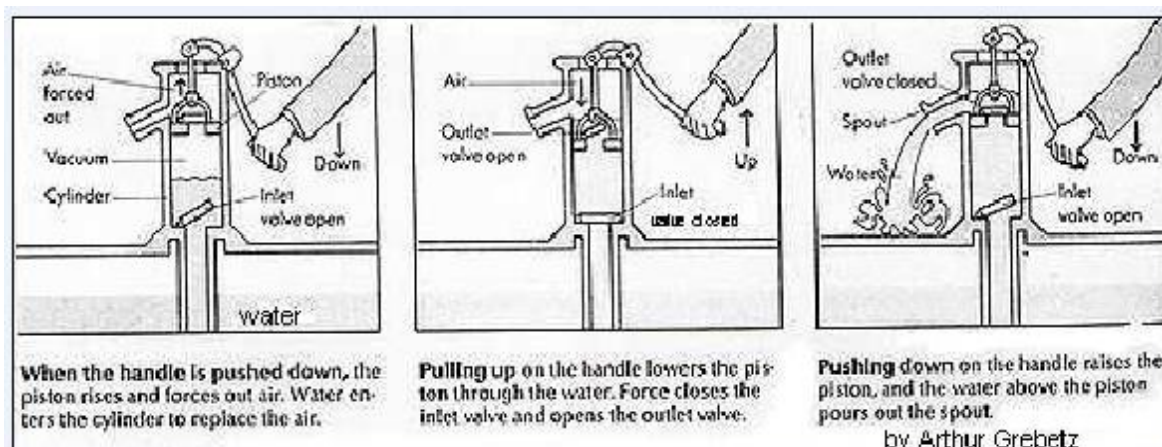
این پمپها عمدتاً جهت انتقال سدیم و پتاسیم مذاب که وظیفه خنک کردن هسته راکتورهای هسته‌ای را دارند استفاده می‌شود. این پمپها متشکل از رسانای الکتریکی و لوله‌های مغناطیسی هستند که این رسانا جریان را به اطراف سیال می‌فرستد سیال بوسیله نیروی جاذبه و دفع مغناطیسی بین سیال میدان مغناطیسی و میدان مغناطیسی لوله‌ها حرکت داده می‌شود.



شکل ۱

تاریخچه پمپ

اختراع پمپ موثرترین راه جهت انتقال سیال از هزار سال پیش تا به حال بوده است. مصریان باستان با نصب دلو بر روی چرخ آبی روشی برای انتقال آب و آبیاری مزارع خود اختراع کردند. ۲۰۰ سال بعد یک مخترع یونانی یک پمپ جهت انتقال آب ساخت که بصورت عمل متقابل کار می‌کرد یعنی آب را از یک طرف گرفته و دوباره از طرف دیگر پس می‌داد مدتی بعد ارشمیدوس یک ریاضیدان یونانی یک پمپ پیچی اختراع کرد که این پمپ‌ها بصورت یک پیچ بود که رزوهای آن بدور یک استوانه تابیده شده باشد. اکنون ما آنها را به نام پمپهای ارشمیدوسی می‌شناسیم.



مروری بر فناوری پمپ الکترومغناطیسی (EM)

این پمپ‌ها فلز مذاب را که هدایت‌کننده مناسبی برای گرمای درون لوله هستند را حمل کرده و به طرف مبدل حرارتی پمپاژ می‌کند. که این فرایند معادل با عمود کردن یک میدان مغناطیسی بر جریان گذرا درونی فلز و نیروی بدنی (body force) لورنتز بر سیال اعمال میشود $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$. که این حالت یا منجر به تسریع حرکت مایع هنگام عبور از پمپ می‌شود و یا فشار فلز مذاب افزایش می‌یابد.

یکی از ویژگی‌های نسبتاً جهانی این نوع پمپ‌ها ایجاد حفره در سرعت بالغ بر ۱۴/۹ متر بر ثانیه است که باعث القای بی‌ثباتی و نوسان می‌شود و می‌تواند کارایی پمپ را کاهش دهد. پمپ (EM) می‌تواند در دمای بالا کار کند اما می‌توان محدودیت دمای آن را با توجه به جریان عامل و موادی که در ساخت پمپ به کار می‌رود افزایش داد.

روش‌های بسیاری جهت به کارگیری پمپ (EM) اختراع شد که عموماً به دو دسته تقسیم می‌شوند: پمپ‌های هدایت و پمپ‌های القا در راکتورهای سفینه‌های فضایی، از دستگاه مولد انرژی نیروی الکتروسیسته را از گرمای درون راکتور تولید می‌کند برای تامین انرژی لازم جهت راه اندازی پمپ (EM) (استفاده می‌کنند. به هر حال، نوع دیگری از پمپ‌های (EM) به نام پمپ دما برقی (TE) ساخته شد که نیروی الکتروسیسته مورد نیاز خود را جدا از سیستم مولد نیروی راکتور فراهم می‌کند. فعالیت، مزیت‌ها و مشکلات مربوط به طراحی‌های پمپ‌های مختلف در بخش‌های بعدی بررسی خواهد شد.

پمپ‌های انتقال

در این پمپ‌ها جریان مستقیماً از طریق الکترودهایی که به صورت طبیعی به دیواره خارجی مجرای حامل فلز مایع متصل شده‌اند، بر سیال وارد می‌شود. این پمپ شامل دو گونه متفاوت هستند: پمپ جریان مستقیم (DC) و پمپ جریان متناوبی (AC). در هر دو گونه میدان مغناطیسی از طریق همان ویژگی‌های فیزیکی اعمال می‌شود، و در نتیجه همان شرایط اتلاف گرمایی را خواهند داشت. پس از بررسی هر دو نوع، راه‌حل‌های تحلیلی جهت بهبود فشار پمپ و تاکید بر مکانیسم اتلاف، مزیت‌های بالقوه و مشکلات مرتبط با هر فناوری ارائه شد.

پمپ هدایت جریان مستقیم

پمپ جریان مستقیم، شکل ۲، دارای ساده‌ترین نوع طراحی پمپ‌های (EM) می‌باشد که یا از آهن‌های پایدار یا الکترومغناطیس جهت ایجاد میدان مغناطیسی در فلز مایع استفاده می‌کند. دارای

بخش‌های متحرک نیست و می‌تواند به راحتی در طرح پمپ الحاق شود. قطعات مربوط به قطب‌های مغناطیسی عموماً جهت به حداقل رساندن تراوشات سیال مغناطیسی به خارج از سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در شکل ۳ طرح آرمانی پمپ هدایت جریان مستقیم ارائه شد. فلز مایع در مجرای دارای عرض (W)، طول (l) و ارتفاع (S) جریان دارد. میدان مغناطیسی و جریان عمود بر فلز مایع (عمود بر یکدیگر) در بخش‌های ذکر شده یکسان هستند.

شکل ۲: تصویر پمپ هدایت جریان مستقیم

شکل ۳: تصویر آرمانی پمپ هدایت مستقیم جریان

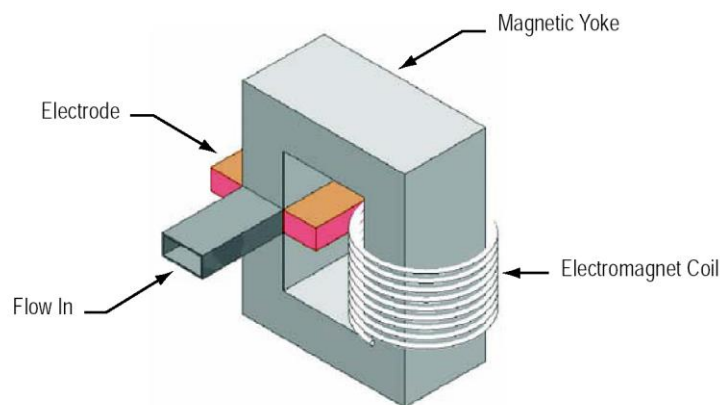


Figure 2. Schematic representation of a DC conduction pump.

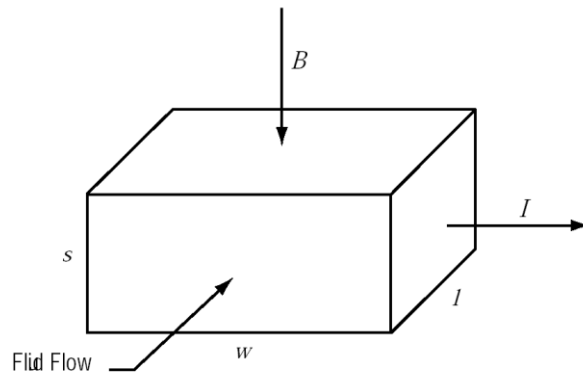


Figure 3. Idealized schematic of a DC EM pump.

وقتی که فلز مایع بین دو الکتروود میدان مغناطیسی قرار دارد پمپ نیروی بدنه لورنتز را بر آن اعمال می‌کند. این کار باعث افت فشار سیال در جهت جریان می‌شود. فرمول یکپارچه سازی نیروی بدنه به شرح زیر است:

$$|F| = \int jBd^3x$$

ژ نماد بزرگی چگالی جریان (برابر با $I/(ls)$ در صورتی که j یکسان باشد) است. یکسان سازی منجر به رابطه زیر خواهد شد:

$$F = \frac{I}{ls} Blsw = IBw$$

نیرو باعث ارتقای فشار می‌شود. این ارتقا معادل $P = \frac{F}{sw} = \frac{IB}{S}$ می‌باشد.

بنا بر مشاهدات افزایش فشار تابع ارتفاع، قدرت میدان مغناطیسی و کل جریان است. این ارتباط در شکل ۴ با مقادیر متغیر فشار دلخواه و جریان ورودی پمپ ارائه شده است. امکان کسب سطحی از B/s نزدیک ۱۰ برای پمپ های EM (10-30 A) با جریان بسیار کم وجود دارد مانند آنهایی که در حال حاضر برای سیستم‌های سوخت‌رسان نیروی محرکه (عامل) پیشران الکتریکی ساخته می‌شود. این مزیت امکان به کارگیری سطوح کم جریان (10-30 A) در تولید فشار بالای 10kPa را ایجاد می‌-

کند. اما، رسیدن به مقادیر بالای B/s هنگام برخورد با جریان‌هایی با سرعت یک گالون در دقیقه موجود در راکتورهای اتمی بسیار سخت‌تر است زیرا مواد لازم در میان کانال‌هایی با عرض و ارتفاعی بزرگتر قرار می‌گیرند. در نتیجه، رسیدن به مقادیر بالای B/s هنگام پرداختن به طراحی در جایی که جریان می‌تواند با نرخ شتاب و ΔP بالا از مرز $A = 100$ بگذرد، سخت‌تر می‌شود.

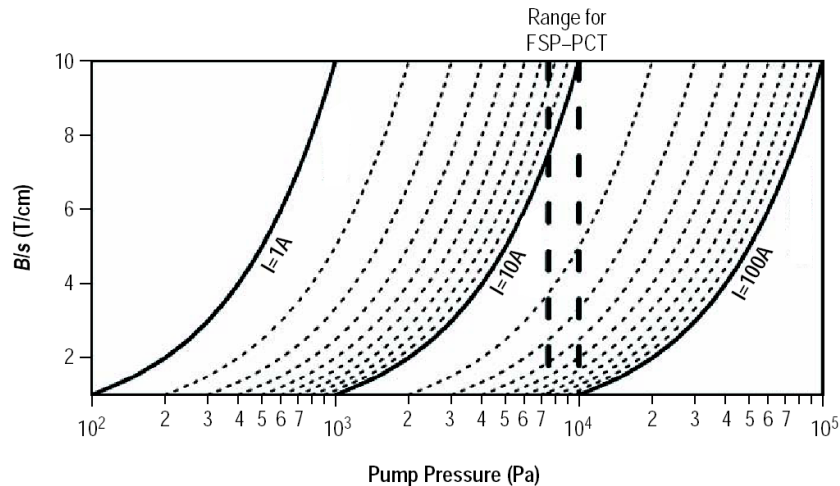


Figure 4. B/s ratio as a function of desired pump pressure for varying values of pump current.

طرح پمپ‌های هدایت DC ساده است و دارای چندین مکانیسم اتلاف هستند که می‌تواند کارایی پمپ را با توجه به نوع سیستم عامل پمپ به شدت کاهش دهد. این مکانیسم‌ها شامل شکست میدان مغناطیسی، جریان‌های دیواره، جریان‌های انتهایی، تاثیر آرمیچر و گرمادهی اهمی می‌باشند. هر کدام از این مشکلات همراه با راه حل پیشنهادی و همچنین مشکلات نصب مطرح خواهد شد.

زمانی که فلز مایع در میان آهنرباها حرکت می‌کند یک EMF پشتی در آن ایجاد می‌شود، که جریانی مخالف جریان اعمال شده دارد. این EMF پشتی در واقع حاصل میدان مغناطیسی و نرخ حجم گردش جریان است و مقیاس اتلاف نیرو $B^2 V^2 / p$ می‌باشد که p در اینجا نماد مقاومت جریان است.

عموما در بسیاری از پمپ‌ها دیواره کانال‌ها از همان موادی ساخته می‌شود که در سایر قسمت‌های سیستم به کار رفته است. در سیستم‌های هسته‌ای از استیل ضدزنگ استفاده می‌شود. با اینکه رسانایی

استیل ضد زنگ بسیار کمتر از رسانایی NaK است، نسبت به موادی که به صورتی الکتریکی عایق کشی می شوند نسبتاً بالا است. در نتیجه دیواره ها به صورت یک عنصر مقاوم در مقابل جریان فلز مایع عمل می کنند و مقدار اندکی از جریان از دیواره ها عبور می کند. برای کاهش این نوع اتلاف باید بدنه پمپ را از یک ماده بسیار مقاوم بسازند که این کار نیز گروهی دیگری از مشکلات را در پی دارد. ماده در حالی که با NaK در تماس است باید تحمل محیطی با دمای بالا را داشته باشد. چون پمپ درون مدار فلز مایع قرار می گیرد، باید روشی به کار گرفته شود تا بر خلاف سایر خش ها موادی که در اتصالات بین بدنه و مجرای استیل ضد زنگ مورد استفاده قرار می گیرد با مواد شیمیایی پوشیده شود. علاوه بر این، باید برای جلوگیری از تراوش الکترودها آن ها را نیز با مواد شیمیایی پوشاند چون آنها باید در دیواره ها نفوذ کنند تا با جریان تماس مستقیم داشته باشند. نیرو پراکنده شده در دیواره ها به مقیاس V_w^2 / R_w هدر می رود. (V_w نماد افت ولتاژ بین الکترودها برابر با تفاوت بین افت فشار IR در سیال و EMF پشتی است که مانند Bu (u شتاب سیال) حرکت می کند.)

شدت میدان مغناطیسی سیال در بخش های انتهایی پمپ EM کاهش می یابد. جریان های انتهایی، یا جریان هایی که از مسیرهای فرعی یا انشعابات عبور می کنند باعث ناکارآمدی پمپ می شوند و نیروی بدنه ای کمتر از میزان دلخواه بر سیال وارد می کنند. نیروی مغناطیسی را نیز می توان به گونه ای اعمال کرد تا جریان را کاملاً در بر بگیرد اما این کار باعث افزودن بار اضافی به پمپ می شود. راه حل دیگر نصب ورق های عایق در جریان است که بتوانند محل گذر جریان را مرزبندی کنند. اما شناسایی ماده عایقی که بتواند دمای بالای NaK را تحمل کند و همچنین نصب این ورقه ها در مجرا مشکل ایجاد می کنند. می توان با طراحی مناسب میزان اتلاف را نسبت به سایر مکانیسم ها به حداقل رساند.

آرمیچر زمانی که جریان از میان سیال تولید شده عبور می کند، میدان مغناطیسی خود را القا می کند. این میدان اضافی سبب افزایش چگالی سیال مغناطیسی در مسیر بالای بخش انتهایی و کاهش آن در

مسیر پایین بخش انتهایی می‌شود. این افزایش و کاهش کسری از جریان پمپ خواهند بود. میدان مغناطیسی پراکنده سبب ایجاد نیروی بدنه پراکنده و در نهایت افزایش پراکنده فشار خواهد شد. می‌توان اثر آرمیچر را با تغییر اندازه شکاف بین آهنربای‌های پایدار با مسیر بالایی انتهایی آهنرباها که دورتر از مسیر پایینی انتهایی است، خنثی کرد. این عمل باعث ایجاد تعادل بین نیروی‌های میدان‌های مغناطیسی ترکیبی خواهد بود. باید مقدار دقیق تغییر اندازه شکاف جهت جبران اثر آرمیچر را بیشتر مورد بررسی قرار دهیم.

جریان‌های پمپ DC بسته به نرخ حجم گردش دلخواه جریان و سطح ΔP ، می‌تواند بین ۱۰ تا $10000 A$ متغیر باشد. میزان گرمادهی اهمی $I^2 R$ است که نشان می‌دهد تنها راه کاهش سطح پراکندگی گرمایی مقاومت‌زا، طراحی پمپ به گونه‌ای است که بتواند در سطح جریان پایین‌تر نیز کار کند.

Table 1. Loss mechanism scaling in conduction pumps.

Loss Mechanism	Effect of Loss	Loss Scaling
Back-EMF	Power loss	$\sim B^2 \dot{V}^2 / \rho$
Wall currents	Power loss	$\sim (IR - Bu)^2 / R_w$
Armature effects	Nonuniform pressure distribution	$\sim I$
Ohmic heating	Power loss	$\sim I^2 R$

نتایج طراحی در جدول شماره یک ارائه شده است که مکانیسمهای اتلاف متفاوت حاکم بر سیستم عامل پمپ را نشان می‌دهد. برای مثال، اگر نرخ حجم گردش جریان بالا باشد اتلاف EMF پستی نیز بالا خواهد بود. اگر جریان بزرگ باشد گرمادهی اهمی و اثر آرمیچر تبدیل به گودال بزرگ انرژی خواهند شد. در نهایت می‌توان با طراحی دقیق که شرایط ساده ای دارد اتلاف جریان دیواره را کاهش داد. مزیت اصلی این پمپ‌ها سادگی نسبی و قابل درک بودن فیزیک آن است. یعنی می‌توان برای آن

معادلات تخمینی نوشت که بر افزایش فشار کل پمپ و مکانیسم اتلاف بالقوه طراحی حاکم باشند. همچنین، به علت سادگی طراحی بخش‌های زیادی وجود ندارد که ایجاد مشکل کنند و برای به کارگیری در قسمت‌هایی مناسب هستند که ممکن است دسترسی و تعمیر در آن‌ها امکان پذیر نباشد. نقص‌های اساسی که در این نوع پمپ هنگام به کارگیری جریان یا نرخ حجم گردش جریان بالا اتفاق می‌افتد، نیز در جدول شماره ۱ ارائه شده است که نشان می‌دهد در هر سیستم عاملی اتلاف نیرو و کارکرد به شکل جلوگیری کننده‌ای بزرگ می‌شود و طراحی را نامناسب می‌سازد. اتلاف گرمای برخاسته از هدایت سطوح بالای جریان بخش بهبود نیرو به پمپ ممکن است مشکل ایجاد کند و نیاز به سیم کشی قابل توجهی دارد که بخش بزرگی را به طراحی تحمیل می‌کند. می‌توان این مسئله را تا حدی با قرار دادن بخش بهبود نیرو در نزدیکترین نقطه به پمپ کاهش داد اما به یاد داشته باشید که این بخش هر چه بیشتر به راکتور نزدیک شود باید مقاوم تابشی‌اش بیشتر شود. در نهایت، با هنگام در نظر گرفتن این پمپ باید به نیازهای بخش بهبود نیرو از سیستم توجه کنید. پمپ به برق کم ولتاژ (۱۷) و جریان بالا نیاز دارد. باید بخش پردازش نیروی طراحی شود که قادر به برآوردن این نیازها باشد و در صورت به کارگیری این پمپ وجود چنین بخشی الزامی است.

پمپ هدایت جریان تناوبی

در پمپ هدایت جریان مستقیم (شکل ۵) جریان وارد شده به میدان و میدان مغناطیسی اعمال شده از لحاظ زمانی متغیر هستند. چون جریان از لحاظ زمانی متغیر است باید برای جایگزینی جریان ورودی و رساندن میزان ولتاژ به مقدار مورد نیاز پمپ از مبدل‌ها استفاده کنید. علاوه بر این، باید با استفاده از الکترومغناطیس‌ها یک میدان مغناطیسی متغیر زمانی اعمال کنید. این کار سبب پیچیدگی بیشتر، بزرگ و سنگین شدن پمپ AC نسبت به پمپ DC می‌شود و باید از سیستم خنک سازی فعال جهت پراکنده کردن گرمادهی اهمی در مبدل‌ها و سیم پیچ‌های الکترومغناطیس استفاده کنید. به

عبارت دیگر، استفاده از نیروی AC تولید ورودی جریان بالا و ولتاژ کم را که پمپ هدایت برای کار در نرخ حجم گردش جریان بالاتر به آن نیاز دارد، ممکن می‌سازد.

شکل ۵: تصویر پمپ هدایت AC

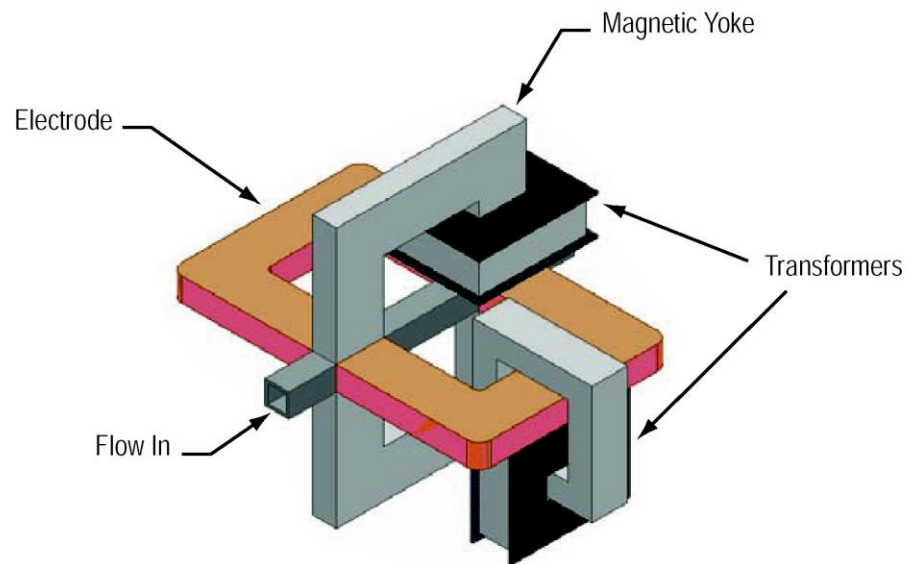


Figure 5. Schematic representation of an AC conduction pump.

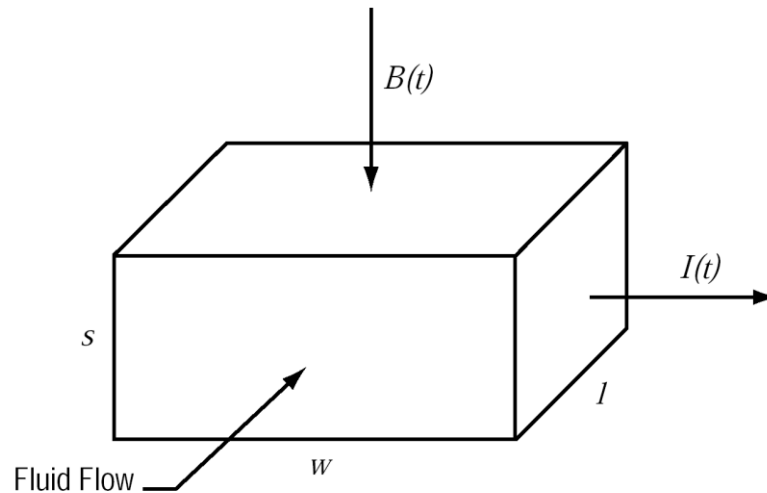


Figure 6. Idealized schematic of an AC EM pump.

شکل ۶: تصویر آرمانی پمپ هدایت AC

همانند پمپ هدایت DC نیروی بدنه لورنتز هنوز مسئول پمپ کردن فلز مایع در سیستم است. اما بر خلاف پمپ‌های DC طبیعت متغیر زمانی بودن میدان مغناطیسی و جریان اعمال شده منجر به تولید نیروی متغیر ناپایدار خواهد شد. اگر میدان مغناطیسی و جریان را ثابت کنیم:

$$B(t) = B_{\max} \sin(\omega t), I(t) = I_{\max} \sin(\omega t \pm \theta)$$

ω نماد بسامد، θ نماد تفاوت فاز بین جریان و میدان مغناطیسی است و نیروی وارد شده به فلز مایع

$$F = B_{\max} I_{\max} \left[\frac{(1 - \cos(2\omega t)) \cos \theta \mp \sin(2\omega t) \sin \theta}{2} \right] w$$

برابر است با:

افزایش فشار نیز معادل معادله زیر خواهد بود:

$$P(t) = \frac{F(t)}{sw} = B_{\max} I_{\max} \left[\frac{(1 - \cos(2\omega T)) \cos \theta \mp \sin(2\omega t) \sin \theta}{2} \right] / s$$

تمام مکانیسم‌های اتلاف موجود در پمپ هدایت DC در پمپ AC نیز موجود است و تا زمانی که دارای مقادیر متغیر زمانی هستند مقیاس RMS اتلاف باید معادل جدول شماره ۱ باشد. علاوه بر

مکانیسم اتلاف موجود در پمپ DC، در پمپ‌های AC جریان‌های گردابی نیز هدر می‌روند. در این پمپ‌ها حلقه‌های جریان بسته وجود دارند که در دیواره پمپ و فلز مایع به علت وجود میدان مغناطیسی متغیر زمانی و عدم انجام عملیات مناسب بر روی فلز مایع القا می‌شوند. جریان‌های گردابی در صفحه‌های عمود بر سیال مغناطیسی حرکت می‌کنند و یا قدرت میدان مغناطیسی و مقاومت معکوس مقایسه می‌شوند.*(۱۱)

یکی دیگر از مکانیسم‌های اتلاف در این پمپ‌ها در اثر تفاوت فاز بین میدان مغناطیسی و جریان ایجاد می‌شود. حتی اگر میدان مغناطیسی و جریان در یک منبع تولید شوند الزاما هم فاز نخواهند بودند. در کل، مقاومت ظاهری موجود در منبع برق پمپ AC که در اثر تولید جریان و میدان مغناطیسی مبدل-ها به وجود می‌آید متفاوت است و سبب تغییر فاز آن‌ها نسبت به یکدیگر می‌شود. با توجه به معادلات قبلی هر تغییر فاز، نیرو و فشار مربوطه اعمال شده بر فلز مایع را کاهش می‌دهد و کارایی پمپ را کم می‌کند. برای مقابله باید از شبکه همخوان مقاومت ظاهری استفاده کرد که وزن کافی را هنگام فعالیت در سطوح بالایی برقی را به سیستم می‌دهد.

پمپ از متغیر DC پیچیده‌تر است اما به اندازه کافی ساده هست که بتوان کارایی آن را تحلیل کرد. خاصیت جریان تناوبی پمپ به خاطر استفاده از مبدل‌های تولید جریان بالای ورودی با ولتاژ کم از برق ولتاژ بالا/جریان کوچک ورودی بخش پردازش نیرو را آسان می‌کند. کاهش جریان مورد نیاز سیستم بهبود برق همچنین گرمادهی مقاومت‌زای سیم‌های بین آن و پمپ را کم می‌کند. با اینکه خاصیت متغیر بودن زمانی پمپ AC اتلاف نیرو را در سیم‌های خارجی کاهش می‌دهد، مکانیسم‌های اتلاف ذکر شده در جدول هنوز موجود است. در نتیجه این نوع پمپ نیز در نرخ بالای حجم گردش جریان فلز مایع و سطح جریان بالا بسیار ناکارآمد می‌شود. علاوه بر این، خاصیت متغیر زمانی نیروی ورودی نقص‌های مربوط به خود را دارد. فشار متغیر بر حسب زمان منجر به نوسان کل سیستم می‌شود.

جریان‌های گردابی در سیستم و فاز متفاوت، صدا و ارتعاشات جریان و میدان مغناطیسی را افزایش و منجر به اتلاف بیشتر برق می‌شود.

طرز کار پمپ‌های الکترومغناطیسی

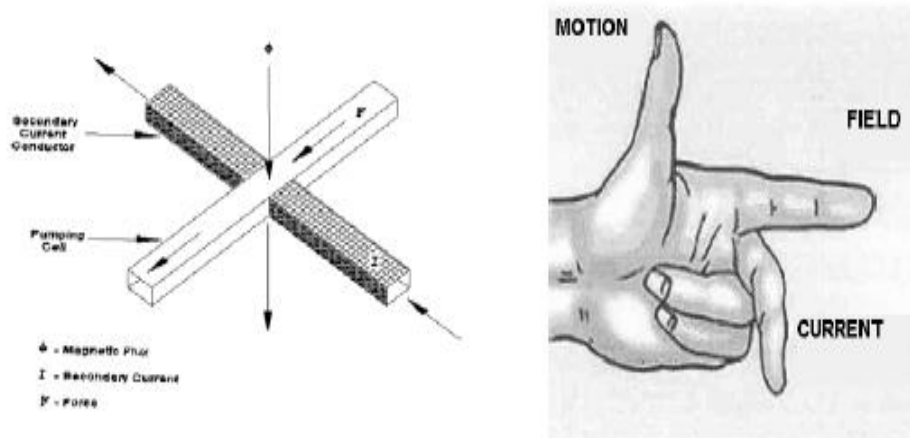
پمپ نشان داده شده در زیر انتقال دهنده سیالات الکتریکی می‌باشد سیال بین کنتاکتورها با سیم پیچ مسی قرار می‌گیرد، اگر یک کنتاکتور در یک میدان مغناطیسی برده شود یک جریان الکتریکی جاری می‌شود که موقعیت آن نسبت به میدان جریان در حالت عمود است. این پمپ از جاذبه مغناطیسی ذرات داخل سیال که در حال حرکت هستند استفاده می‌کنند.

اصول عملکردی پمپ EMP

پمپ‌های الکترومغناطیس از قانون دست چپ فمینگ در موتورهای تبعیت می‌کنند این قانون به وسیله نیروی تولید شده از جریان و شار مغناطیسی توصیف می‌شود. در این گونه پمپها فلز مذاب است که نقش رسانا را بازی می‌کند. وقتی جریان از میان پایه‌های عمودی پمپ عبور می‌کند میدان مغناطیسی یک نیروی قابل توجه به فلز مذاب وارد می‌کند.

جهت:

دیاگرام پائین نشان می‌دهد که جریان و شار چگونه در CEI پمپ الکترومغناطیس دو مرحله‌ای تولید می‌شود.



مزایای پمپ های الکترومغناطیس

با بهره گیری از اینگونه پمپ ها می توان از چندین مزیت عمده برخوردار شد.

۱- در این پمپها بدلیل اینکه می توان مدار را طوری بست که از منبع اصلی سیال تا مقصد ورود سیال یکپارچه باشد مشکل نشتی وجود ندارد.

۲- در این پمپها نیاز به تعمیر و نگهداری نداریم و قابلیت اطمینان بیش از ۲۰ سال می باشد.

۳- ساخت آسان.

۴- عملکرد مداوم و پیوسته در انتقال جریان مذاب در دمای 1600% ($871C^{\circ}$)

۵- بدلیل اینکه هیچگونه قسمت متحرکی در سیستم وجود ندارد (محور، بلبرینگ، تیغه ، پره و غیره) ارتعاشات ، اصطکاک ، فرسایش کاهش می یابد.

۶- زمان از کار افتادگی پائین.

۷- کارکرد بدون سر و صدا.

۸- کنترل جریان از ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ ظرفیت بدون شیر تنظیم .

۹- برگشت جریان بطور کامل در چند لحظه.

مشخصات فلزات مذاب مورد استفاده در سیستم

__ غیر قابل اشتغال ، غیر سمی و سازگار با محیط زیست باشد.

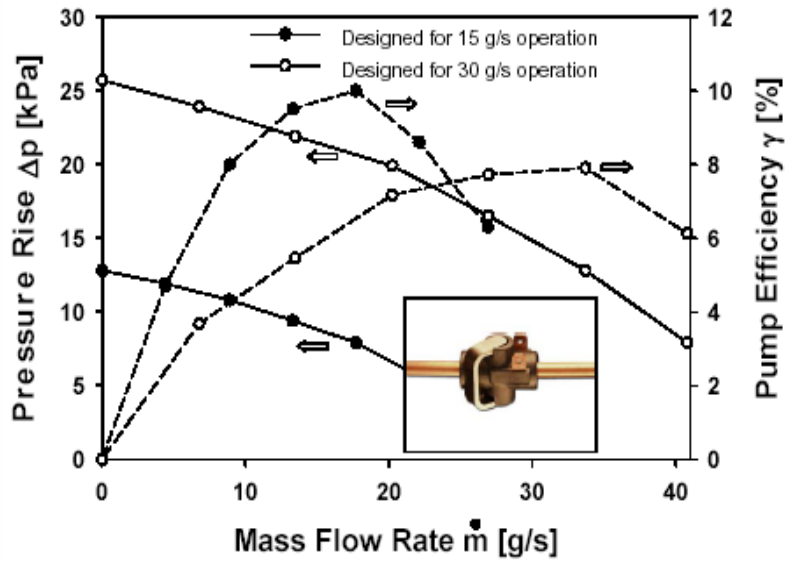
- همانند کاربردهای جیوه مورد استفاده قرار گرفته.

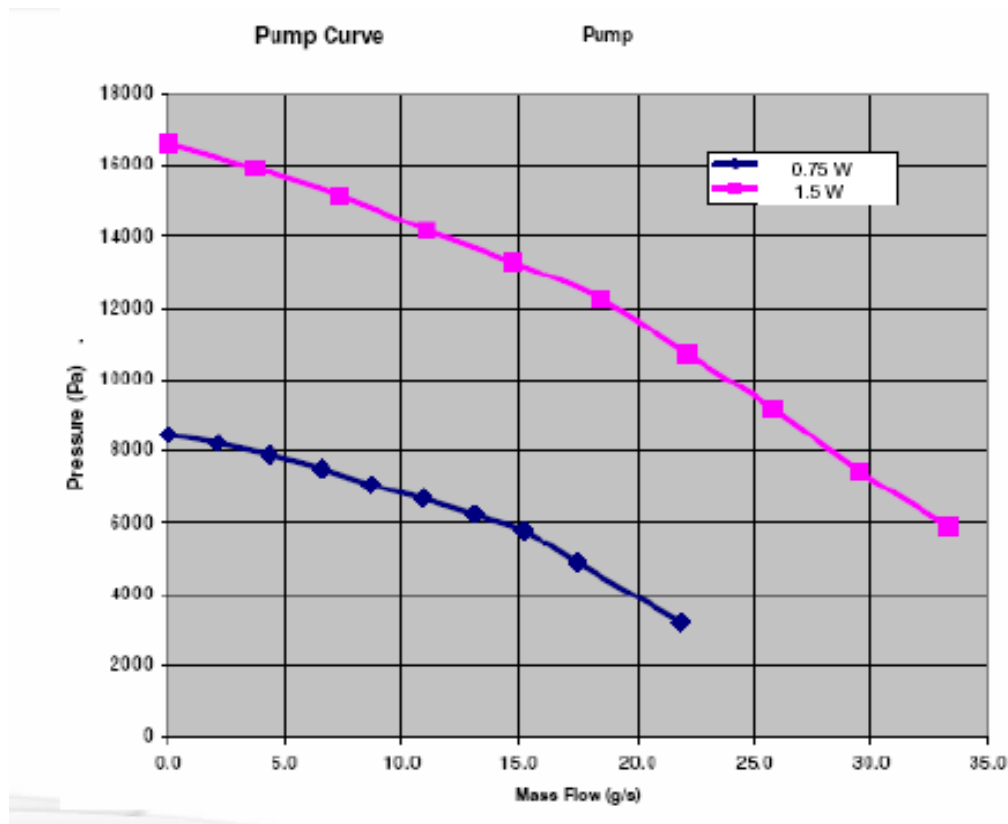
- بالاترین رسانایی را داشته باشد (65) برابر بیشتر از آن.

قابلیت های سیستم

- ۱- بهره برداری ، بدون حرکت ، جهت گیری مستقل.
- ۲- کانالهای طویل با ساخت آسان.
- ۳- مایع خنک کننده Single-Phase (تک فاز) واقعی.

نمودار پمپ





پمپ‌های الکترومغناطیسی دو مرحله‌ای

در اینگونه پمپها دو جریان در ترانسفرماتورهای پیوسته تقویت شده و جریان ثانویه کنتاکتورها را تأمین می‌کنند. جریان از وسط دیواره افقی در قسمت پمپ کننده ما بین فلز مذاب و دیواره بیرونی جاری می‌شود. به این طریق یک جریان پیوسته باریک پمپ شده و از قسمت دیگر پمپ به داخل برگرداننده می‌شود. و همچنین شار مغناطیسی در قسمت چپ کننده بوسیله کویل‌هایی که هر کدام به پایه‌های U شکل که از هسته مغناطیسی آهنی تشکیل شده اند تولید می‌شود.

بررسی عملکرد سه پمپ الکترو مغناطیسی طراحی شده در NASA

چکیده:

این پروژه به منظور تعیین سه طرح ویژه پمپ EM جهت استفاده احتمالی به عنوان پمپهای Boiler feed در Ranking-cycle سیستم های نیروی الکتریکی فضایی آغاز و شرح و توضیح داده شد. سه طرح شامل موارد زیر است.

(۱) پمپ 240psi و 1b/sec برای پتاسیم $1000^{\circ}F$ با استفاده از (لوله) T-111 duct

(۲) پمپ 240psi و 1b/sec برای پتاسیم $1000^{\circ}F$ با استفاده از (لوله) 316SS duct

(۳) پمپ 240psi و 1 b/sec برای پتاسیم $1000^{\circ}F$ با استفاده از (لوله) T-111 duct

طرح مربوط به هر یک از این پمپ ها به طور مفصل توضیح داده شده است. عملکرد (بازده) محاسبه شده و ارزیابی آنها نیز آمده است.

گزینش نهایی انتخاب هر یک از پمپها (با نرخ (یا میزانهای) مختلف) براساس کارایی، قابلیت اعتماد، وزن و قابلیت ساخت صورت گرفت. به طور کلی، کارایی ارتقا یافت.

۱- خلاصه

همانطور که قبلاً گفته شد مطالعه ای به منظور امکان سنجی استفاده از پمپهای الکترومغناطیسی در پمپهای boiler Feed در ranking-cycle کارخانه های نیروی الکتریکی فضایی انجام شد. در این مطالعه سه طرح در نظر گرفته شد.

در مرجع شماره ۱ انواع پمپهای EM جهت کاربردهای فضایی ارزیابی شد. براساس نتایج بدست آمده

در مرجع ۱ و میزان‌های ویژه در نظر گرفته شده در این مطالعه (مثلاً سیال (جریان) پائین و فشار بالا)، یک پمپ EM القایی و سه فازی اسپیرال (Helical) انتخاب شد. این پمپ میزان‌ها (مقادیر) مورد نیاز را برآورده کرده و با وزن کمی که دارد می‌تواند برای دستیابی به عملکردهای مناسب و کارایی نسبتاً بالا، طراحی شود.

چندین طرح و چیدمان برای این نوع پمپ مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت براساس قابلیت اعتماد و انعطاف پذیری (امکان سنجی)، طرح نهایی که شامل یک stator کاملاً لحیم شده و محکم و پر شده از یک مبدل گرمایی گاز بی اثر و یک محوطه کاملاً درزگیر شده و پر شده با گاز بی اثر بود، انتخاب شد. در نتیجه یک پمپ کاملاً درزگیر شده با منطقه stator جدا شده از منطقه لوله duct بوسیله یک قوطی نازک در دهانه stator بدست آمد، این قوطی از ورود گازی های خارجی به stator جلوگیری میکردند. هر سه طرح پمپ EM تجاری قبلی سبک‌تر بوده و کارایی بالاتری داشتند.

پمپ گزینش شده پمپ With net positive suction head پتاسیم $3/25 \text{ lb/sec } 1000^\circ F$

(32/8gpm), 240psi developed head,

Net positive suction head)

می‌باشد.

این پمپ میتواند به طور متوالی و کارایی ۲۰ درصدی با نقطه مشخص شده‌اش همچنین در حرارت بین ۹۰۰ تا $1300^\circ f$ و جریان 1/5 lb/se تا 4/25 lb/sec و تا فشار 250psi کار کند. در طرح نهایی نقطه vpsi تعیین شد هر چند در محدودیت‌های خاص جریان در Npslt و فشار کم 3psi نیز کار کند. سایر خصوصیات عملکردی این پمپ در جدول شماره ۱ آورده است.

خصوصیات مربوط به دو پمپ طراحی شده دیگر در جدول ۲ آورده است.

در این طرح ۵ از سازه‌های حرارتی، الکتریکی، مغناطیسی و مواد عایق بندی با کیفیت بالا استفاده شده است تا پمپ بتواند تحت حرارت‌های بالاتر از $600^{\circ}f$ کار کند. Stator الکترومغناطیسی بوسیله Nak تا $600-700^{\circ}f$ خنک شده و برای عملکرد X تحت حرارت‌هایی تا $1000^{\circ}f$ طراحی شده که در آن از سیم نقره ای nickel-clad، مواد مغناطیسی Hiperco 27 و سیستم عایق بندی الکتریکی inorganic استفاده شده است. لوله میتواند پتاسیم را تا $1300^{\circ}f$ تحمل کرده و جنس آن از آلیاژ T-111 می باشد.

۲- مقدمه

در مرجع شماره ۱، جزئیات مربوط به مطالعه ای که در آن تمامی انواع پمپ‌های EM جهت کاربردهای فضایی مورد بررسی قرار گرفت، آمده است. به علاوه پمپ‌های EM تجاری فراوانی برای حلقه‌های (LOOP) فلزات مایع و کارخانه های تولید نیروی هسته‌ای سدیم سرد شده توسعه یافتند. عملکرد و قابلیت اعتماد همه این پمپ‌ها مناسب بود. تحقیقاتی با هزینه بالا در مورد استفاده مصالح با حرارت بالا در کاربردهای فضایی انجام شد (مراجع ۲ تا ۶). با این پس زمینه ها به نظر میرسد استفاده از پمپ‌های EM برای سیستم های نیروی فضایی به شرط آنکه کارایی را ارتقاء داد و وزن آن کمتر از نمونه‌های پیشین باشد، امکان پذیر است.

به منظور اثبات (امکان سنجی) انعطاف پذیری طرح‌ها، یک مطالعه آنالیزی جهت تعیین سه طرح پمپ قابل اجرا به عنوان پمپ‌های boiler Feed در چرخه ranking سیستم‌های نیروی الکتریکی فضایی انجام شد. این سه پمپ شامل موارد زیر است (صفحه ۳)

- 1) 9 lb/ set flow rate, 240 psi developed head, 1000°F potassium, 7 psi NPSII, using T-111 pump duct material.
- 2) 9 lb/ set flow rate, 240 psi developed head, 1000°F potassium, 7 psi NPSY, using 316 stainless steel pump duct material.
- 3) 3.25 lb/set flow rate, 240 psi developed head, 100Q°F potassium, 7 psi NPSK, using T-111 pump duct material.

صدها متغیر طرحی به منظور تعیین بهترین طرح مورد ارزیابی و آنالیز قرار گرفت. شرح خدمات پروژه شامل یک آنالیز حرارتی و هیدرولیکی، مکانیکی و الکتریکی کامل از طرح‌های نهایی و انتخاب مصالح اصلی مورد نیاز، ارزیابی و انتخاب طرح اصلی و آماده‌سازی نقشه‌های طراحی جهت ساخت و تولید بود.

۳- توضیح طرح

الف) اصول عملکردی

در تمامی پمپ‌های EM، با استفاده از تقابل (interaction) جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی در سیال، یک body force تولید می‌شود.

این body force هنگامی که از ورودی به خروجی پمپ عبور می‌کند، موجب ایجاد فشار در سیال می‌شود. این body force طبق اصول اساسی یک نیرو در یک conductor حامل جریان در میدان مغناطیسی می‌باشد که از اصول عملکردی بسیاری از تجهیزات الکترومغناطیسی رایج می‌باشد.

پمپ EM نیز از همین اصل به روشی مشابه به صورت یک موتور القایی poly phase استفاده می- کند. پمپ شامل یک stator الکترومغناطیسی و لوله (ductassembly) در دهانه stator می باشد وقتی نیرو به هر سه فاز stator وارد میشود، میدان مغناطیسی چرخش در دهانه stator تولید می- شود. میدان مغناطیسی تولید شده ولتاژی را در سیال کاری داخل لوله فراهم آورده و در نتیجه آن جریانها (currents) در سیال جاری می شوند. این جریانها (currents) با میدان مغناطیسی جهت تولید فشار تقابل دارند. تغییر فشار در هر نقطه از سیال متناسب با توان نیروی مغناطیسی و مقدار شدت جریان (currents) عمود بر توان میدان مغناطیسی می باشد. مجموع فشار تولید شده پمپ، انتگرال این فشار در تمام طول محوری عبور جریان در لوله پمپ می باشد.

ب) چیدمان کلی

چیدمان کلی هر سه طرح بیان شده در اینجا یکسان و مشابه هستند. در شکل ۱ طرح کلی مربوط به پمپ 3/25 lb/sec آمده است. در این شکل نشان داده شده است که: جریان (flow) از طریق لوله ورودی ۱۰ وارد لوله پمپ و منطقه حلقوی کوتاهی شده و در سیال (fluid) فشار ایجاد می کند. بعد از عبور از مجرای اسپیرال، سیال از طریق یک لوله خروجی ۱۰ در همان محلی که وارد شده بود از center return برگشته و از پمپ خارج می شود.

دو پیچ اول مجرای اسپیرال دارای مقطع عرضی بزرگتری نسبت به سایر پیچ ها هستند، تا بدینوسیله عملکرد NPSH نسبتاً پایین تری داشته باشند. بدین طریق سرعت سیال در نزدیکی ورودی پمپ کمتر خواهد بود. با تولید فشار در مجرای اسپیرال، سرعت نیز افزایش می یابد. از پیچ دوم اسپیرال در

بقیه مقاطع مجرای اسپیرال سرعت نسبتاً بالا باقی میماند تا در نتیجه آن پمپاژ با کارایی بالاتری فراهم آید.

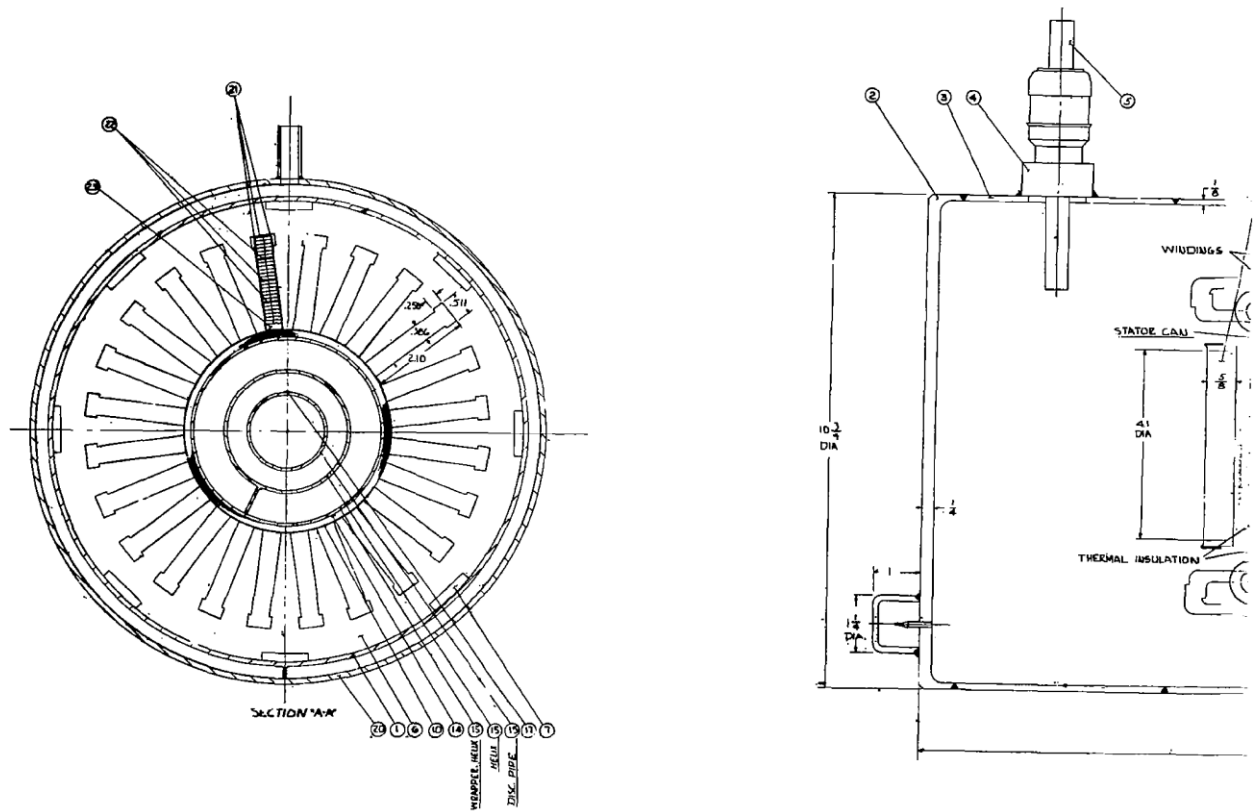
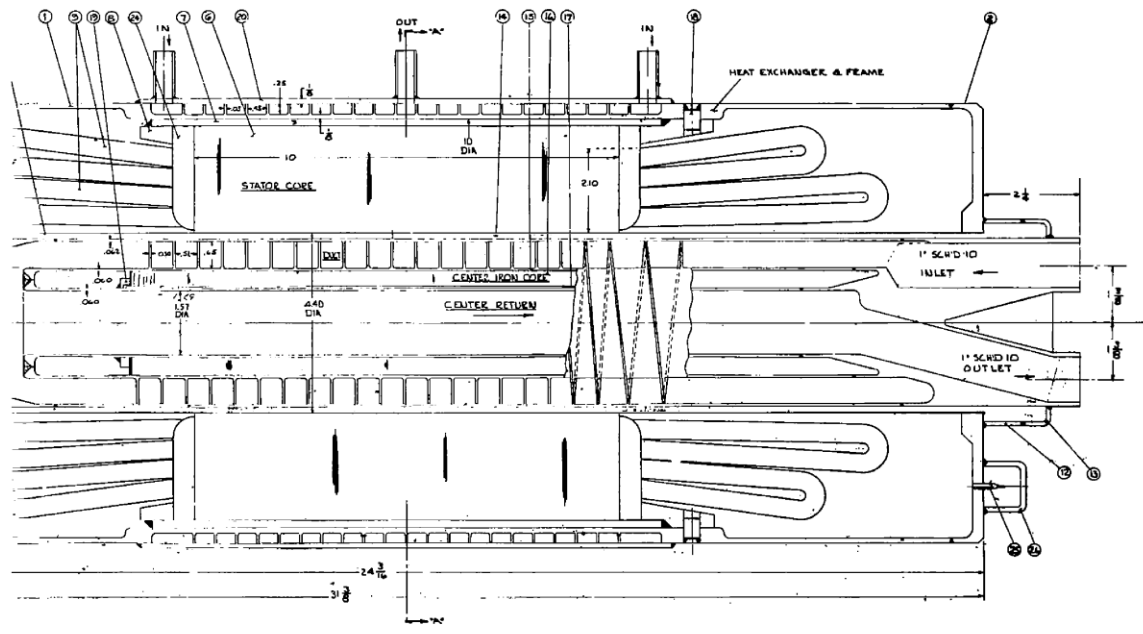


Figure 1. Design Layout (3.)

1	HEAT EXCHANGER	HASTELLOY 'B'
2	END SHIELD	INCOSEL
3	LEAD SEAL SUPPL RING	INCOSEL
4	LEAD SEAL SUPPL FL	INCOSEL
5	STUD TERMINAL	INCKEL
6	CORE STATOR	HYPERCO-27
7	BAR BUILDING	CARBON STL
8	WELDING RING	CARBON STL
9	WINDING CONDU	NI-CLAD A _g
10	WDG. BRN. STCO	DBL LAYER ALUMINA
11	CAN. STATOR	INCOSEL
12	END PLATE	INCOSEL
13	SEAL RING	INCOSEL
14	SEAL RING FLG	T-111 ALLOY
15	INSULATION	CL-112 FOL
16	DUCT	T-111 ALLOY
17	CORE CENT IRON	HYPERCO-27
18	KEY	HYPERCO-27
19	DOWEL	HASTELLOY 'B'
20	WELDING RING	T-111 ALLOY
21	SEPARATOR	HASTELLOY 'B'
22	SLOT LINER	ALUMINA
23	SEPARATOR	ALUMINA
24	WEDGE	ALUMINA
25	SPACE BLOCKS	CARBON STL
26	ENVC.ROU.TUBE	INCOSEL
27	CAP. ENVC. TUBE	INCOSEL



P1092-1

/sec Pump, T-111 Duct).

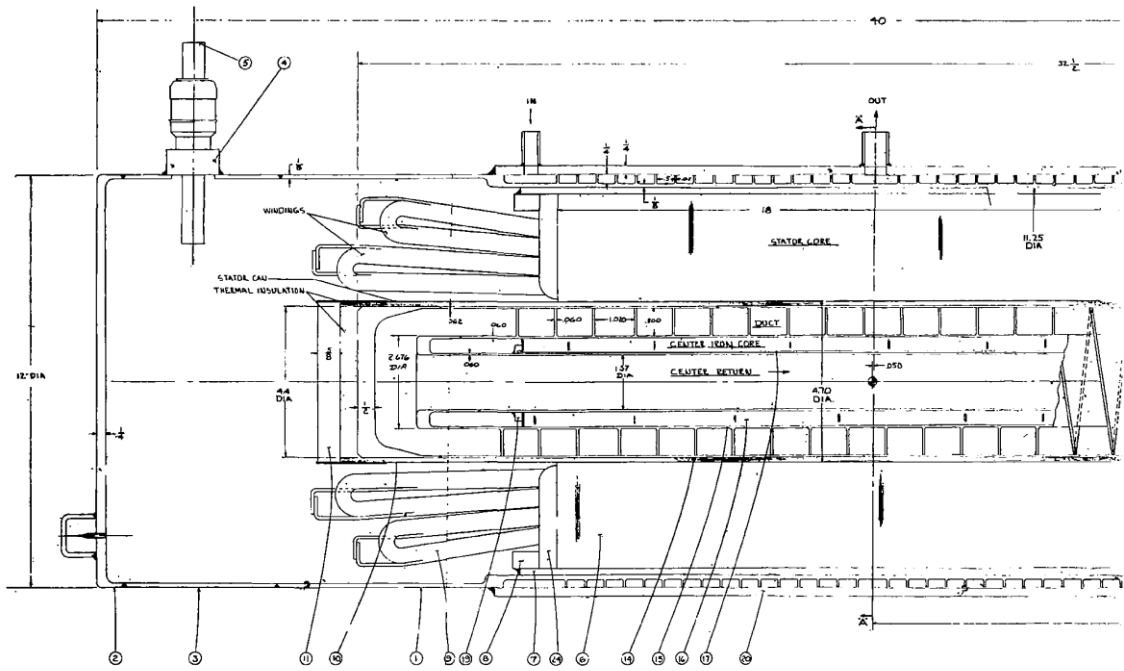
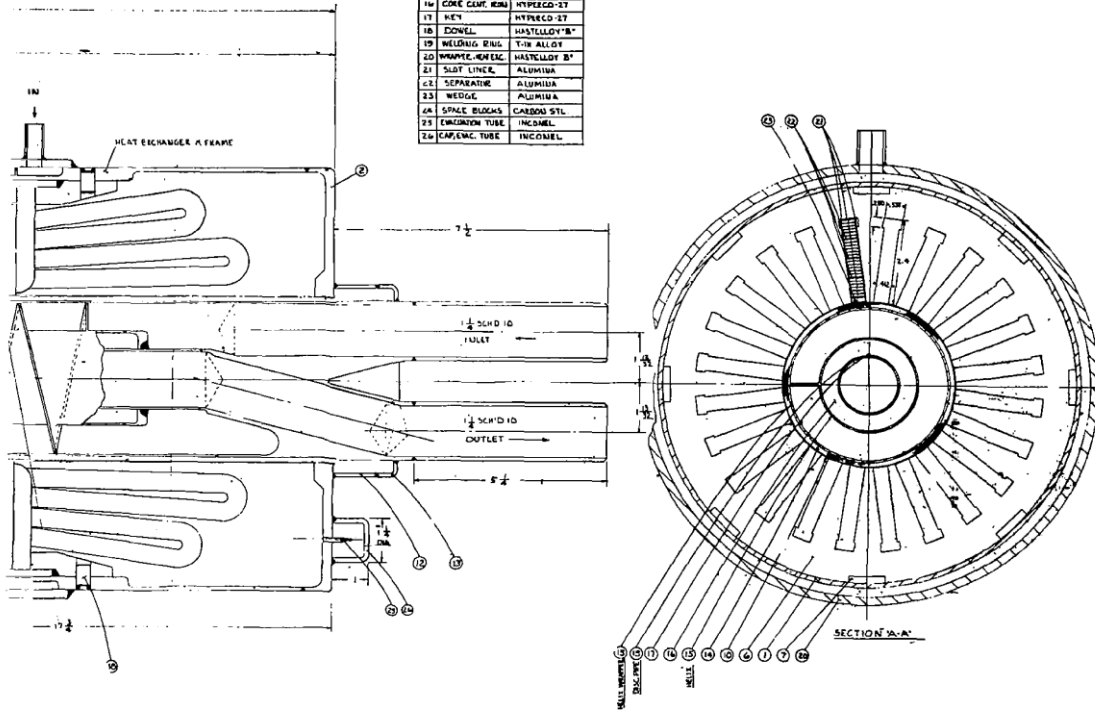


Figure 2. Design Layout (9 lb/s)

LIST OF MATERIALS		
PT	DESCRIPTION	MATL
1	HEAT EXCHANGER	HASTELLOY B ²
2	END SHIELD	INCONEL
3	LEAD TAIL SUPPORT	INCONEL
4	LEAD TAIL SUPPORT FL	INCONEL
5	STUD, TYPICAL	NICKEL
6	CORE, STAGE	HYPERCO-27
7	DRG. BUNDLE	CARBON STL
8	WELDING RING	CARBON STL
9	WINDING CONR.	SI CLAD AS
10	WINDING CONR. STAGE	DRG LINEAR ANODIZ
11	CAN. STAGE	INCONEL
12	END PLATE	INCONEL
13	SEAL RING	INCONEL
14	SEAL RING FLANGE	Ti-6 ALLOY
15	INSULATION	CS FSL FOL
16	DUCT	Ti-6 ALLOY
17	CORE CLAMP HEAD	HYPERCO-27
18	KEY	HYPERCO-27
19	DOWNEL	HASTELLOY B ²
20	WELDING RING	Ti-6 ALLOY
21	WINDING CONR.	HASTELLOY B ²
22	SLOT LINER	ALUMINA
23	SEPARATOR	ALUMINA
24	WEDGE	ALUMINA
25	SPALL BRUSH	CARBON STL
26	CARBON TUBE	INCONEL



mp, T-111 Duct).

P1092-2

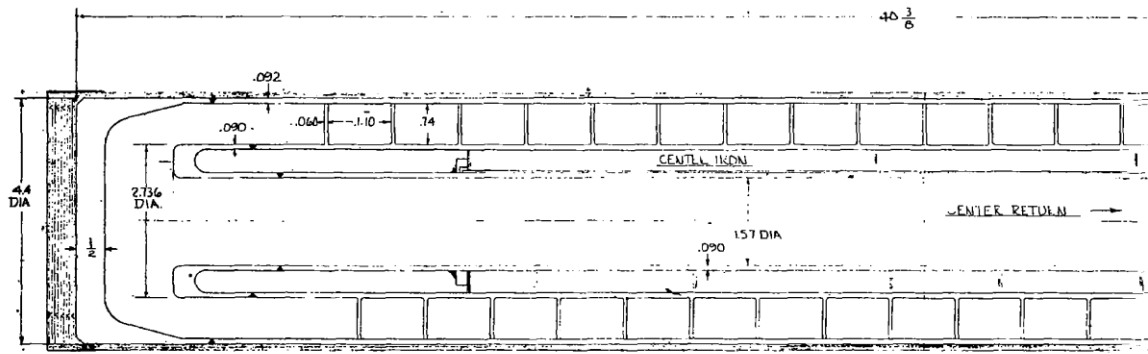
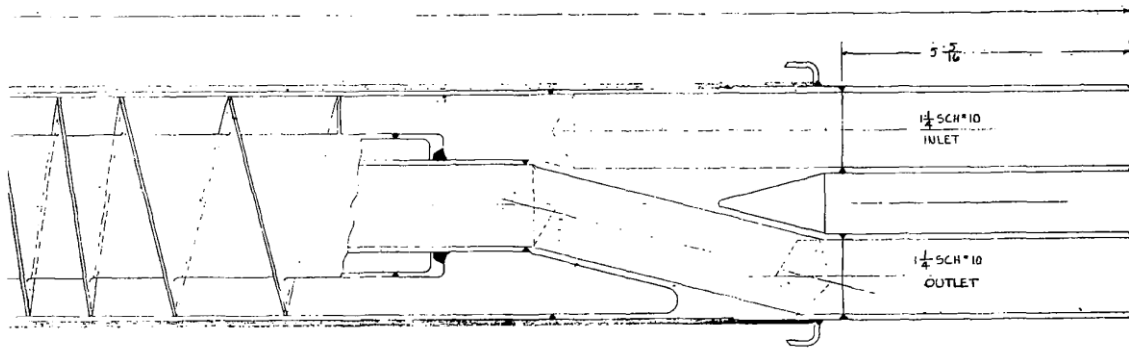


Figure 3. Design



ut (316 SS Duct).

P1092-3

مبدل گرمایی که در اطراف بدنهٔ پمپ قرار دارد، پمپ را خنک می‌کند. این مبدل از یک مجرای اسپیرال تشکیل شده که در مجاورت stator قرار دارد، گرما از طریق هسته stator از windings به بدنه، جاییکه حرارت بوسیله چرخش فلز مایع خنک کننده در مبدل گرمایی برطرف می‌شود، همرفت می‌کند.

Stator core و winding ها کاملاً بوسیله بدنه درزگیری شده پوشش‌های لبه (end shields) و یک قوطی نازک (thin can) داخل (stator bore) عایق شده‌اند. درون منطقه stator با یک گاز بی‌اثر پر شده‌است تا انتقال گرما (همرفت) بین winding ها و لمیناتورهای stator و بدنه تسهیل شود. thin can به همراه stator.cavity (حفره، گودی) به صورت یک محافظ جهت جلوگیری از خروج و ورود گاز از stator به لوله عمل می‌کند.

منطقه بین duct و stator بوسیله عایق حرارتی که شامل چندین لایه rippled metallic foil میباشد، عایق بندی شده‌است. عایق بندی این منطقه یک پشتیبان ثانویه برای stator محسوب می‌شود که قابلیت اعتماد طرح را بالا می‌برد. فشار گاز مورد استفاده در این منطقه (بین duct, stator can) مشابه فشار گاز خود منطقه stator است.

پ) بخش stator

Stator از یک laminated punching stack و Form-wound coilsهایی که چیدمان آنها جهت تشکیل یک میدان مغناطیسی دو قطبی تحت گردش ۶۰ درجه در هر ثانیه، طراحی شده، و

نیروی برق سه فاز تشکیل شده است. انتخاب و ارزیابی مصالح عایق بندی، مغناطیسی و الکتریکی مخصوص قسمت‌های مختلف stator براساس نتایج بدست آمده تحقیقی که قبلاً توسط یک قرار داد دولتی انجام شده بود. در مراجع ۲ تا ۶ نتایج و داده های بدست آمده این تحقیقات آمده است.

Punching stack از لمیناتورهای مغناطیسی تشکیل شده است که مسیر reluctance پائینی را برای شار مغناطیسی مانند stator القایی رایج، فراهم می‌آورد. الزامات مقاومتی لمیناتورهای stator شدید نیست. از آنجائیکه فرکانس نسبتاً پایین است (40cps)؛ اتلاف پایین نیز الزامی نیست. الزام اصلی این است که ماده بتواند خصوصیات مغناطیسی بالایش را در حرارت عملکردی که بین $700,900^{\circ} F$ خواهد بود را حفظ کند. ماده مغناطیسی این لمیناتورها Hiperco 27 با ضخامت تقریبی 0/025 اینچ خواهد بود. عایق بندی بین لمیناتوری (interlaminar insulation) یک عایق آلومینیومپلاسماسا اسپری شده روی هر لمینت می‌باشد. ضخامت این پوشش (عایق) تقریباً بین 0/001-0/002 اینچ است.

دهانه (قطر) stator هر پمپ 91b/secd یکسان است؛ دهانه پمپ 3/25 lb/sec مشابه است فقط برخی ابعاد خاص آن متفاوت است مقایسه ای بین ابعاد اصلی و مهم در زیر آمده است

پمپ 3/25/b/sec (اینچ)	پمپ 9/b/sec (اینچ)	
10"	18"	طول دهانه
4/1"	4/4"	قطر (punching)bore
10"	11/25"	قطر بیرونی (punching)
0/386"	0/412"	عرض شیار (stot)
2/1"	2/4"	عمق شیار (stot)

همین ابعاد برای سایر پمپ‌ها در شکل ۱ و ۲ و ۳ و ۶ آمده است.

با استفاده از میله‌های شماره ۸ با مقطع مستطیل شکل لمیناتورهای stator با همدیگر نگه داشته می‌شوند. این میله‌ها به طور یکنواخت در فضای بیرونی punching stack قرار گرفته و انتهای آنها یک welding ring جوش خورده تا دسته‌ای از لمیناتورهای کاملاً فشرده به هم فرآهم آید. هسته stator در قسمت بیرونی دارای یک بست میانی (interference) با بدنه پمپ است تا بدین طریق از انتقال مناسب حرارت از stator به مبدل گرمایی اطمینان حاصل شود. به علاوه، دو dowel pin از بدنه به یکی از welding ringها داخل شده تا stator core در جای مناسب خود قرار گیرد.

Form wound coilها در داخل شیارهای ۲۴ هسته stator قرار گرفته‌اند. ماده رسانا نیز یک سیم نقره‌ای با پوشش سیکل خواهد بود که مقطع عرضی نیکل ۲۰ درصدی دارد. این ماده رسانای الکتریکی مناسبی را تحت حرارت‌های کاری $900-1000^{\circ}F$ فراهم می‌آورد. رسانای الکتریکی این ماده از جمله فاکتورهای اصلی دخیل در کارایی نسبتاً بالای پمپ است. از جمله سایر خصوصیات این رسانای حرارتی، قدرت فیزیکی، قدرت creep, ruptue، مقاومت نسبت به اکسیداسیون در طول عملکرد نرمال و censing، پایداری حرارتی diffusion و سهولت ساخت و استفاده در روند تولید می‌باشد. در آینده، بعد از آنکه الزامات گردش حرارت (همرفت) تعیین شد، خصوصیات خستگی creep, ruptue به بررسی جدید در سایه الزامات تعیین شده نیاز خواهند داشت. عایق بندی conductor، یک پوشش Anadur است، مگر آنکه از شیشه S glass به جای شیشه E استفاده شود. شیشه S خصوصیات فیزیکی بهتری در حرارت $900-1000^{\circ}F$ دارد. خصوصاً اگر یک پوشش دابل Anadur

استفاده شود، این طرح مناسب برای بکارگیری برای موتورهای صنعتی، تسهیلاتی و کاربردهای خاص می‌شود و شیشه دابل به جای شیشه تکی به عنوان conductor مورد استفاده قرار می‌گیرد.

عایق بندی slot، جداکننده‌های coil (separators) و slot wedgeها از جنس فولاد خاص 99/5 درصدی است که Solid Molded باشند. می‌توانید در شکل های ۴ و ۵ تصاویر را ببینید. عایق slot سه تکه است، تکه پایینی U شکل و دو ورق کناری (Side sheet) در شکل نشان داده شده است. یک لوله U شکل از لحاظ ساخت و اجرا عملی نیست. عایق Slot و جداکننده‌ها ضخامت تقریبی 0/25 اینچ دارند، در حالیکه ضخامت wedgeها در هر طرح 1/8 تا 3/16 اینچ است.

میتوان coilها را در هسته stator قرار داد تا یک winding تک لایه یا دابل مانند شکل ۶ برای پمپ 3/25 lb/sec و یا پمپ 9lb/sec (شکل ۷) تشکیل داد. برای winding تک لایه یک coil در شیارهای stots مناسب قرار گرفته و برای winding دابل (دولایه) دو coil در شیارهای stots مناسب قرار گرفته است.

پیچ و خم coil های مورد استفاده در winding دو لایه نصب winding تک لایه است ولی از لحاظ عملکردی، چیدمان هر دو یکسان است. طرح کلی آمده در شکل ۱ و ۲ چیدمان دو لایه را نشان می‌دهد. در چیدمان یک لایه فقط winding delineation تغییر کرده است.

در شکل‌های ۴ و ۵ ابعاد مقاطع عرضی coil برای چیدمان دو لایه آمده است .

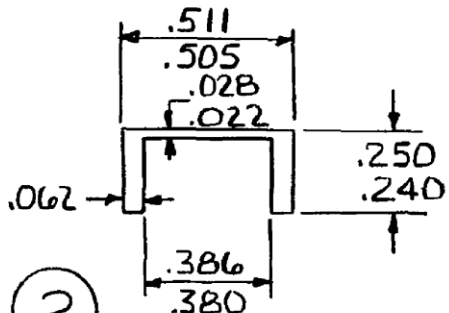
در طرح مربوط به 9lb/sed هر coil از ۴ پیچ سیم با مقطع مستطیل شکل تشکیل شده لایه دابل دو پیچی است .

ابعاد سیم $0/075'' \times 0/165$ است که با Anadur پوشش دهی شده‌اند. هر coil طرح $3/2511b/sec$ از چهار پیچ لایه دوپبل دو پیچی با سیم مقطع مستطیل شکل و ۶ سیم با ابعاد $0/063'' \times 0/150''$ با عایق Anadur تشکیل شده است. Stator winding تکمیل شده از 24coil (در صورت لایه دوپبل ۴۸ تا) تشکیل شده است که هر coil ۱۰ دندانه دارد و $5/6$ Pitch تولید می‌کند.

در پمپ $9 lb/sec$ stator winding دارای ۳۲ پیچ در هر فاز بوده و به یک اتصال دلتایی ۳ فازی، متصل است. در پمپ $3/25 lb /sec$ stator winding دارای ۳۲ پیچ بوده و به اتصال سه فازی متصل است.

ت) بدنه و مبدل گرمایی

در اطراف stator core، بدنه و مبدل گرمایی وجود دارد. فلز مایع خنک کننده، Nak در مجرای اسپیرال در مبدل گرمایی می‌گردد تا گرمای همرفت شده از windingها را برطرف کند.

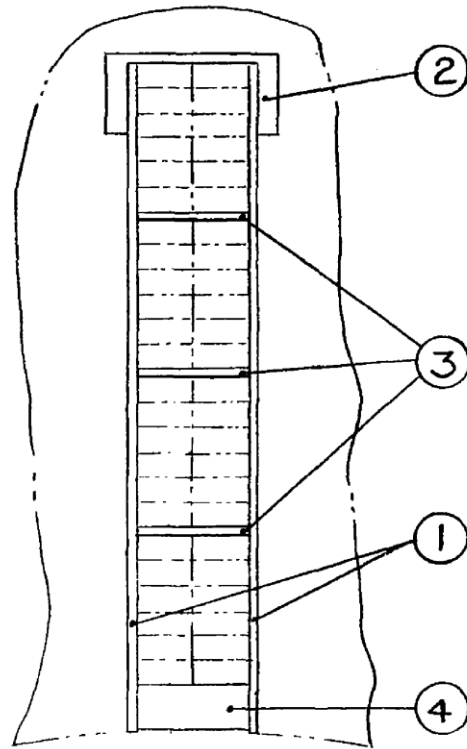


② TUBE: LENGTH=10"
 MAT'L: 99.5% ALUMINA
 SOLID MOLDED

① SHEET:
 HEIGHT = 2.075
 LENGTH = 10"
 THICKNESS = .022-.028
 MAT'L: 99.5% ALUMINA
 SOLID MOLDED

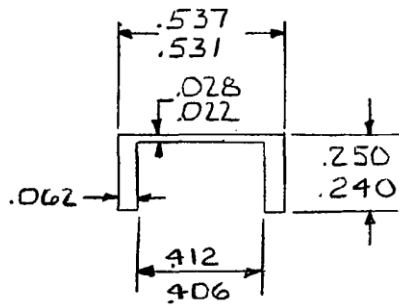
③ SEPARATOR:
 THICKNESS: .022-.028
 WIDTH: .324-.327
 LENGTH: 10"
 MAT'L: 99.5% ALUMINA
 SOLID MOLDED

④ WEDGE:
 THICKNESS = .136-.142
 WIDTH = .324-.327
 LENGTH = 5"
 MAT'L: 99.5% ALUMINA
 SOLID MOLDED



P1092-4

Figure 4. Slot Insulation (3.25 lb/sec Pump)

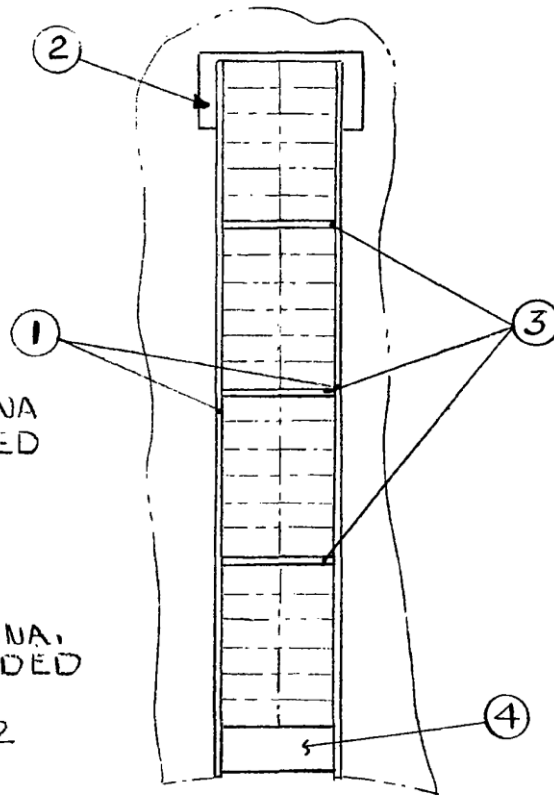


② TUBE:
 LENGTH = 18"
 MAT'L : 99.5% ALUMINA
 SOLID MOLDED

① SHEET:
 HEIGHT = 2.375
 LENGTH = 18"
 THICKNESS = .022-.028
 MAT'L : 99.5% ALUMINA
 SOLID MOLDED

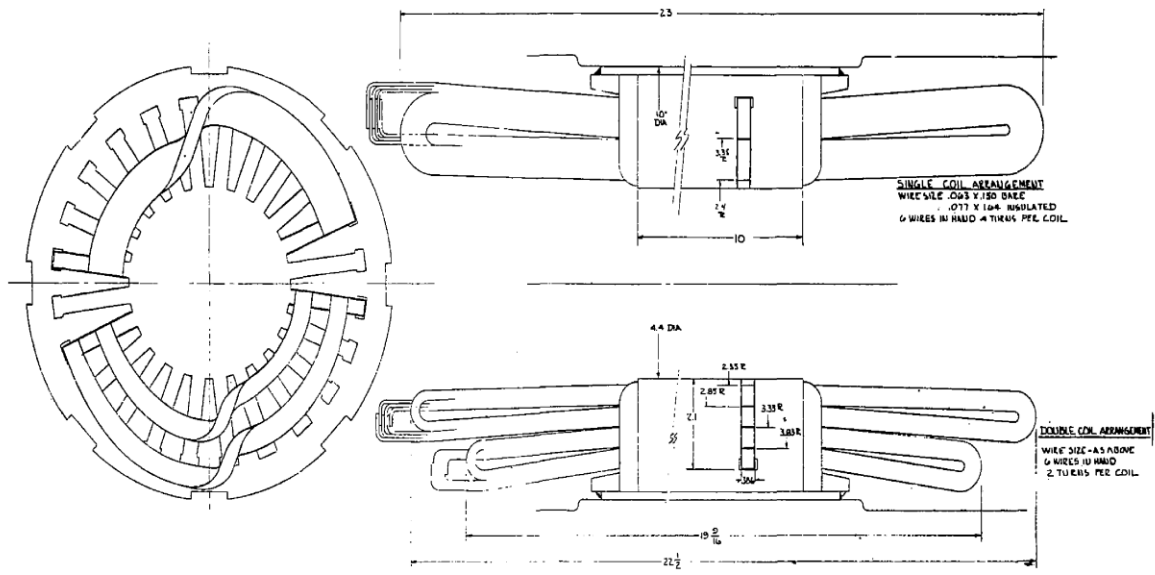
③ SEPARATOR:
 THICKNESS = .022-.028
 WIDTH = .350-.353
 LENGTH = 18"
 MAT'L = 99.5% ALUMINA,
 SOLID MOLDED

④ WEDGE:
 THICKNESS = .136-.142
 WIDTH = .350-.353
 LENGTH = 4 1/2"
 MAT'L = 99.5% ALUMINA, SOLID MOLDED



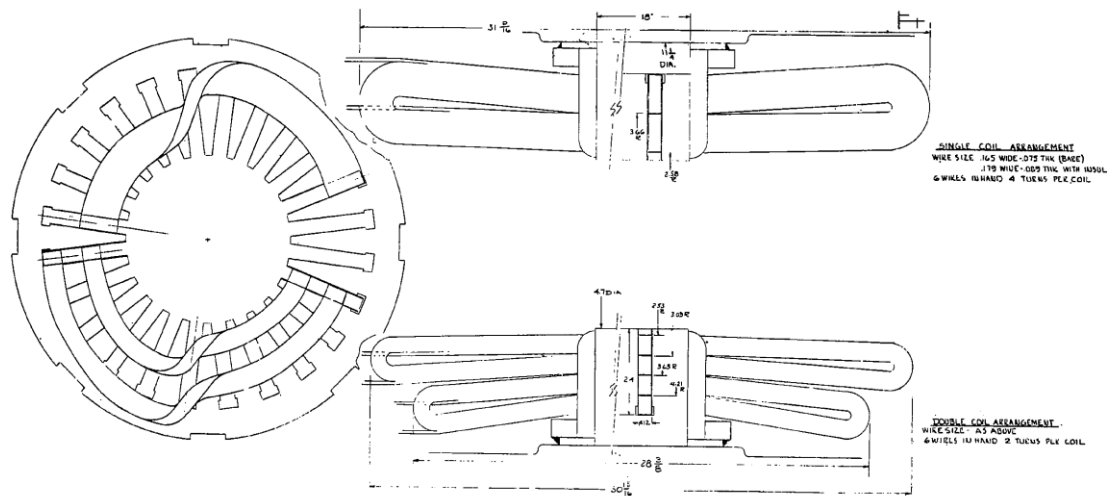
P1092-5

Figure 5. Slot Insulation (9 lb/sec Pump)



P1092-6

Figure 6. Punching and Coil Layout (3.25 lb/sec Pump).



P1092-7

Figure 7. Punching and Coil Layout (9 lb/sec Pump).

جنس مواد به کاررفته برای بدنه پمپ وجدول گرمایی Hastelloy B می باشد که مقاومت کافی تحت حرارت های کاری را داشته و از جمله مواد مناسب برای خنک کننده مایع (Nak) در مبدل بود و ضریب گرمایی انبساط آن مناسب با جنس هسته stator که Hiperc027 است، می باشد و بدین ترتیب انتقال گرمایی مناسبی بین هسته و مبدل گرمایی تحت حرارت عملکردی بدست می آید. جنس بدنه پمپ میتواند Inconel نیز باشد، محافظ های انتهایی (end shields) و stator can در stator bare نیز میتواند از جنس Inconel باشد تا ساخت و اتصال قطعات ساده تر شود. در شکل ۲ ابعاد مربوط به بدنه و مبدل گرمایی آمده است.

ث) Duct

از آنجا که لوله T-111 تنش مجاز بالایی تحت حرارت عملکردی دارد، رعایت حداقل ضخامت لوله برای ساخت محدود و بیشتر به همجنسی یا سنخیت مواد (material homogeneity) توجه می شود. طول محوری لوله اسپیرال این طرح تقریباً ۲۲ اینچ و طول کلی شامل رابط ورودی و خروجی تقریباً ۴۰ اینچ است. قطر بیرونی لوله ۴/۴ اینچ است. ابعاد مقطع عرضی مجرای اسپیرال نیز در شکل ۲ آمده است.

لوله T-111 طرح 3/25lb/sec در شکل ۱ آمده و با لوله T-111 بالایی آن یکسان است جز در مورد قطر بیرونی که 1/4 اینچ است و طوری محوری مارپیچ ۱۳ اینچ و طول کلی ۳۱ اینچ است. ابعاد مقطع عرضی مجرای جریان (Flaw) نیز کمی متفاوت است.

لوله فولادی ضد زنگ ۳۱۶ پمپ 9lb/sec در شکل ۳ آمده است این لوله قابل تعویض با لوله T-111 می‌باشد؛ مثلاً قطر بیرونی و طول کلی یکسان دارد و میتواند درست در همان Stator bore قرار گیرد. در هر دو مدل طرح پمپ 9lb/sec از یک طرح یکسان stator استفاده می‌شود. به خاطر محدودیت‌های تنش فولاد ضد زنگ، ضخامت دیوار تا تقریباً 0/90 اینچ افزایش می‌یابد. جهت مطابقت این افزایش ضخامت دیواره، مجرای اسپیرال جریان کم عرض‌تر (کم عمق‌تر) و عریض‌تر می‌گردد. بدین‌ترتیب محوطه‌ای با مقطع عرضی و سرعت سیال یکسان حفظ می‌شود به دلیل مقاومت الکتریکی بالاتر فولاد ضد زنگ نسبت به T-111، اتلاف الکتریکی در آن کمتر است (حتی اگر دیواره های لوله ضخیم تر باشد) و به همین دلیل کارایی کلی پمپ نیز کمی بیشتر است.

اولین پیچ در هر دو لوله فولادی ۳۱۶ و لوله T-111، دارای مقطع عرضی نسبتاً بزرگتری هستند تا سیال‌های با سرعت کم در ورودی دچار مشکل نشده و به این طریق عملکرد با NpsH کمتری صورت گیرد. مقطع عرضی دومین پیچ به تدریج کوچکتر شده و بعد همان مقطع برای سایر پیچ‌های مجرای اسپیرال رعایت (حفظ) می‌شود. سرعت متغیر سیال با بکارگیری یک pitch دبل helix همراه است. این helix در دو پیچ اول دارای یک pitch، ۱/۸۶ اینچی و برای سایر پیچ‌های لوله T-111 پمپ 9lb/sec دارای pitch، ۱/۰۸ اینچ است. لوله فولادی ضد زنگ ۳۱۶ پمپ 9lb/sec دارای پیچ ۲ اینچی در دو پیچ اول و ۱/۱۶ اینچی در بقیه پیچ‌ها می‌باشد. لوله T-111 پمپ 3/25lb/sec، دلوله اول pitch 0/85 و بقیه پیچ‌ها 0/57 اینچ است.

Pitch سایر پیچ ها (اینچ)	Pitch دو پیچ اول (اینچ)	پمپ
1/08	1/86	9lb/sec
1/16	۲	9lb/sec فولادی
0/57	0/85	3/25lb/sec

یک هسته مرکزی آهنی بین مسیر اسپیرال و لوله بازگشت مرکزی قرار گرفته است. این هسته از لمیناتورهای (واشرها) Hiperc 27 با یکسان و لمیناتور میانی (interlaminar) یکسان به عنوان لمیناتورهای stator core تشکیل شده است. این سمیناتورها در کنار یکدیگر قرار گرفته و درلبه‌ها توسط یک رینگ (ring) جوش خورده به لوله بازگشت مرکزی (center return pipe) لوله محکم شده اند.

ج) عایق بندی حرارتی

عایق حرارتی بین duct و stator از چندین لایه نوارهای لمینتی فویل‌های فلزی موج‌دار (rippled medlic foil) تشکیل شده است. توصیه می‌شود که از نوارهای با عرضی تقریباً 0/5 اینچ و ضخامت 0/002 اینچ و موج‌های با ارتفاع 0/010 تا 0/015 اینچ استفاده شود. جنس فویل cb- 1% zr (یا فلز دیرگداز مشابه دیگری) برای لوله های T-111 میباشد. فویل فولاد ضد زنگ نیز برای لوله های ضد زنگ ۳۱۶ مناسب است. منطقه عایق حرارتی بوسیله یک bimetallic sleeve که بین محافظ انتهایی (end shield) و duct جوش خورده، درزگیری می‌شود (شکل ۲۱) سپس این منطقه تخلیه و با آرگن پر می‌شود.

۴- ارزیابی طرح

الف- ارزیابی مفهومی طرح

به منظور حذف تلفات حرارتی پمپ EM در محیط‌های فضایی به طرح‌های ویژه‌ای نیاز است، به همین دلیل چندین مفهوم و چیدمان طراحی برای پمپ القایی اسپیرال EM (helical induction EMPump) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

دو طرح اولیه مورد بررسی به قرار زیر هستند.

۱. Statorهای پرشده با گاز (stator های گازی)

۲. Statorهای باز (open-space stators)

در Statorهای گازی از رسانای حرارتی گاز که در تمام خلل و فرج بین conductorها و slotها و محل‌های دیگر در حفره های winding وجود دارد. استفاده میشود تا بدین وسیله همرفت از winding ها به جدول گرمایی (heat exchanger) با سهولت بیشتری صورت گیرد. در Statorهای باز، انتقال حرارتی با همرفت جامدات از windingها به heat sink صورت می‌گیرد و به همین خاطر است که تماس مناسب آنها بدون وجود هیچ حفره‌ای، اهمیت دارد. برحسب این دو طرح، از پنج چیدمان خنک‌کننده stator (stator cooling) با انعطاف پذیری و قابلیت انتقال حرارتی مختلف استفاده شد. ارزیابی طرح براساس شرایط آن: 240 head developed psi و جریان پتاسیم پمپ 9lb/sec تحت حرارت $1000^{\circ}F$ با Vpsi net positive suction head. قرار داشت. این پنج چیدمان در نظر گرفته شده در زیر آمده است.

۱- طرح‌های اسپیرالی درزگیری شده (Hermetically sealed designs)

الف) پمپ canned (canned pump)

ب) خنک کننده همرفتی (conduction cooling) یا بلوک‌های انتقال حرارت

(Heat transfer Blocks)

پ) conductor خنک کننده مایع مذاب (Liquid Metal Cooled Conductors) یا

(Conductor Tubing)

با کنار هم قرار گرفتن تمامی طرح‌های اسپیرالی، می‌توان تمام پمپ EM را با یک گاز پرکننده

(Canned pump) استفاده کرد یا اینکه فقط stator cavity به صورت canned درآید

(canned stator).

در طرح canned EM pump تمامی پمپ توسط یک محافظ درگیری شده اسپیرالی

(hermetically sealed shell) احاطه می‌شود، لوله (duct) از یک طرف وارد این محافظ شده و با

یک collar به آن وصل می‌شود.

طرح canned stator با طرح canned pump متفاوت است: از این لحاظ که دو سیلندر هم مرکز

در هر طرف درزگیری شده‌اند طوری که فقط stator را در برگیرند.

Can استوانه‌ای درونی (inner cylindrical can) در داخل stator bore قرار گرفته و از آنجایی

که در میدان مغناطیسی گردش (چرخش) می‌باشد، اتلاف جریان گردابی در آن وجود دارد. به منظور

کاهش این تلفات از طرح دیواره بسیار نازک و یک ماده با مقاومت الکتریکی بالا برای

stator can استفاده می‌شود.

Canned stator به سازه پشتیبان اضافه جهت نگهداری pump duct در جای خودش نیاز دارد. اگر

stator can نازک بخشی از آلودگی را برای گاز در stator cavity تشکیل دهد. طرح canned

pump با دیواره ضخیم‌تر، قابل اعتمادتر است ولی دیواره نازک این مزیت را دارد که stator region را از duct جدا میکند. و در نتیجه از خروج گازهای دیگر از قسمت winding به duct جلوگیری می‌شود. از نقطه نظر انتقال حرارتی statek (statek heat transfer)، هر دوی این طرح‌ها یکسان هستند، زیرا هر دو براساس رسانش گرمایی گاز در stator cavity واقع در میانجی‌ها (interfaces) و فضاهای بهتری بین قطعات یا قسمت‌های جامد قرار دارند.

در statorهای باز میتوان گاز را با یک potting compand جایگزین کرد. این ترکیب به صورت مایع داخل این فضاهای خالی ریخته شده، و آنها را پر می‌کند و این فرنت را دارد که windingها به صورت یک بلوک جامد در می‌آورد.

از آنجائیکه اکثر ترکیب‌های potting، رسانش گرمایی بیشتر از گازها دارند، انتقال حرارتی در پیچ‌های انتهایی بهتر صورت می‌گیرد، ولی این در صورتی است که همه حفره‌ها و فضاهای خالی کاملاً پر شوند. هم‌اکنون، هیچ ترکیب potting وجود ندارد که بتواند مثل گاز، فضاها را پر کند و انبساط گرمایی لازم را جهت جلوگیری از ترک خوردن یا قطع تماس با stator core، conductor داشته باشد، در چیدمان خنک کننده همرفت winding، از اصل به کارگیری فشار تماس مثبت بین سطوح مسطح کندانسور شور الکتریکی و ضخامت مسطح سرامیکی استفاده شده است که به عنوان کندانسورهای حرارتی و عایق الکتریکی عمل کنند. اکسید های فلزی مثل الومین یا بریلیا، می‌تواند به عنوان میانجی‌هایی برای این بلوک‌های انتقال حرارتی استفاده شوند. این میانجی‌های فلزی می‌تواند به نازکی

و به ضخامت عایق الکتریکی باشد. در طراحی سعی می‌شود تا این بلوک‌های حرارتی در لبه پیچ‌ها جائیکه بتوانند به عنوان سازه پشتیبانی winding نیز استفاده شوند، قرار گیرند.

در قسمتهای انتهایی stack و یا در مجاورت انتهای پیچ‌ها نیز می‌توان این المانهای حرارتی را قرار داد. در طرح کنونی پمپ EM دو قطبی، برای هر سیم پیچی از چندین پیچ استفاده شده‌است. از آنجائیکه اتلاف حرارتی در پیچ‌ها باید حذف شود (از اتلاف گرما جلوگیری شود)، چیدمان طرح Winding کنونی مستلزم داشتن بلوکهای حرارتی تقریباً ۲۸۸ در هر طرف (انتها) است.

سیستم خنک کننده طرحی شده برای یک stator باز به حداقل دمای $180^{\circ}F$ می‌رسد (که این بالاتر از حرارت ورودی خنک کننده است)، ولی این سیستم بسیار پیچیده است و مستلزم تولرانس مکانیکی بسیار نزدیک تر، بوده و به علاوه به دلیل وجود بلوک های تحالی حرارتی در هر طرف از قابلیت اعتماد کمتری نیز برخوردار است. این بلوک‌ها باید با فشار متناسبی در جای خود قرار گرفته باشند. در نزدیکی ردیف‌های چنین بلوک‌های قفل شده‌ای، مسیرها (مجراهای) خنک کننده فلز مایع نیز لازم است. به منظور تسهیل این سیستم خنک کننده، باید از کمترین تعداد پیچ برای هر سیم پیچ استفاده کرد، این به معنی جریان‌های ورودی بالاتر و ولتاژهای کمتر است که منجر به ایجاد طرحی غیر عملی می‌شود. قابلیت اعتماد چنین بلوک‌های حرارتی هنوز اثبات نشده است. در حال حاضر، به نظر می‌رسد به کارگیری آنها برای طرح ژنراتورهای فضایی به همراه یک پیچ برای هر چیدمان coil winding مناسب‌تر است.

کندانسورهای water cooled hollow copper با اندازه های استاندارد و قطرهای 0/144 تا 0/46 اینچ موجود است. برای مثال، در توربوژنراتورها، winding های چند پیچی به همراه liquid header نصب شده‌اند. در صورت استفاده از سیستم خنک کننده فلز مایع، مثل مورد کنونی، کندانسورهای hollow با روکش فولاد ضد زنگ در داخل و خارج، مورد نیاز است. از آنجائیکه Nak نیز، رسانای خوب الکتریکی می‌باشد، می‌تواند جریان را منتقل کند.

چیدمان هیدرولیکی لازم برای جریان خنک کننده و الزامات زمینی برق در چنین سیستمی، موجب پیچیده‌تر شدن طرح میشود. انعطاف پذیری و قابلیت اعتماد نیز در حال حاضر قابل پیش بینی نیست. از آنجائیکه این سیستم حرارت winding بسیار یکنواختی را فراهم می‌آورد، می‌تواند در طرح پمپهای EM باز، کمترین حرارت نقطه ای Winding را موجب می‌شود با این وجود، مشابه طرح بلوک انتقال حرارت، استفاده از حداقل تعداد پیچ در هر سیم پیچی، مطلوب‌تر است. متقابل مایع رسانای الکتریکی در کندانسورهای hollow موجود در میدان مغناطیسی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. هیچ یک از سیم‌های انتقال حرارتی باز، که تاکنون معرفی شدند، نمی‌توانند در حال حاضر در یک طرح پمپ EM بکار روند، تمامی این سه طرح فقط در مرحله مفهومی بود و هیچ عملکردی از آنها وجود نداشته است.

استاتورها (stators) پر شده با گاز، سابقه بسیار موفق و قابل اعتمادی داشته، و به علاوه سیستم‌های انتقال حرارتی مناسبی نیز دارند. به همین دلیل مفهوم استاتور پر شده با گاز به عنوان قابل اعتمادترین وضعیت ترین برای طرح نهایی انتخاب شده است طرح نهایی ترکیبی از پمپ canned و استاتور canned است که حداکثر اعتماد را فراهم می‌آورد. تمام پمپ در داخل یک سازه rugged درزگیری

شده، و به علاوه ، یک can نازک نیز داخل stator bore قرار گرفته تا winding cavity نزدیک آن جدا کند.

ب- عملکرد و خصوصیات طرح

عملکرد پمپ با استفاده از یک مدار معادل (هم ارز) ، همان طور که در بخش V.A آمده، محاسبه می-شود و راه حل آن نیز برای استفاده در کامپیوتر برنامه ریزی شده است. این مدار در شکل ۸ نشان داده شده است، منحنی های عملکردی در شکل های ۹ تا ۱۷ آمده و مقادیر جدولی ۱ و ۲ آمده که خصوصیات عملکردی محاسبه شده برای طرح نهایی را نشان میدهند. نتایج محاسبه شده بیشتر و خصوصیات تا بیشتر طرح در جداول ۳ و ۴ و ۵ و ۶ و ۷ با جزئیات آمده است.

علاوه بر این نتایج، شرایط و حدود عملکردی خاص برای اطمینان از عملکرد رضایت بخش در سراسر عمر پمپ لازم است. محدودیت های عملکردی پایه در زیر آمده است.

۱. حرارت لوله و مایع (سیال) حداکثر $1300^{\circ} F$
۲. میزان جریان خنک کننده استاتور-Nak حداقل 4gpm
۳. فشار لوله حداکثر 350psia
۴. فشار stator cavity در حرارت داخلی حداکثر 9psia و حداقل 4psia
۵. سری مکش مثبت خالص جدول ۸ را ببینید (Net positive suction head)
۶. حرارت ورودی خنک کننده استاتور -Nak حداکثر $700^{\circ} F$

حرارت و فشار مایع و لوله از مهمترین موارد است. به طور کلی، لوله برای فشارهای ایمن تا حداکثر 300psi و $1300^{\circ}F$ طراحی شده‌اند. به دلیل محدودیت ساختار و تولید این اجزاء با آلیاژ T-111، لوله های T-111 تا حدی ضخیم‌تر از موارد عادی برای فقط فقط تنش می‌باشد. با اینکه حداکثر فشار توصیه شده 300PSI است، لوله‌های T-111 قابلیت مقاومت 350PSI را برای دوره‌های کوتاه تحت حرارت $1300^{\circ}F$ را نیز دارند. از لحاظ عملکردی، پمپ برای عملکرد مداوم، تحت حرارت $1000^{\circ}F$ و جریان فشار تعیین شده، طراحی شده است. همچنین این پمپ می‌تواند برای مدت زمان کوتاه، تحت حداکثر دمای $1300^{\circ}F$ و فشار 250psi نیز کار کند. محدودیت حرارت و نرخ عبور جریان خنک کننده استاتور، به طرح مبدل حرارتی و محدودیت مناسب روی حرارت winding، حداکثر حرارت نقطه‌ای $1000^{\circ}F$ و میانگین $880^{\circ}F$ بستگی دارد. سیستم عایق و winding، می‌تواند حرارت‌های بالاتر را نیز تحمل کنند. با این وجود، عمر و عملکرد تا حدی تأثیر قرار خواهند گرفت. تمامی محاسبات، براساس مقاومت الکتریکی مصالح کندانسور در حرارت میانگین $880^{\circ}F$ ، می‌باشد، حرارت‌های میانگین بالاتر موجب افزایش مقاومت winding و ائتلاف بیشتر و همچنین کارآمدی کمتر می‌شود.

محدودیت فشار stator cavity به ملاحظات مکانیکی و الکتریکی بستگی دارد. حداکثر فشار 9psi در حرارت اتاق، یک محدودیت مکانیکی است. در حرارت عملکردی، فشار در winding cavity، سه برابر می‌شود. برای به حداقل رساندن وزن، محفظه آن برای حداکثر فشار داخلی 25psi طراحی شده- است.

TABLE 5. DETAILED THERMAL DESIGN CHARACTERISTICS
CALCULATED VALUES AT DESIGN POINT

	3.25 lb/sec (T-111 Duct)	9 lb/sec (T-111 Duct)	9 lb/sec (316 SS Duct)
Winding Hot Spot Temperature Rise (°F)	275	300	300
Winding Average Temperature Rise (°F)	170	165	165
Heat Load from Duct through Thermal Insulation (KW)	0.59	1.12	1.12
Total Heat Load to Coolant (KW)	6	10	10
Coolant (NaK) Flow Required (GPM)	6	8	8
Coolant (NaK) Inlet Temperature (°F)	650	650	650
Coolant (NaK) Temperature Rise (°F)	50	50	50
Coolant (NaK) Pressure Drop (PSI)	9	16	16
Heat Generated in Duct and Fluid (KW)	8.4	20.5	18.1
Fluid (Potassium) Temperature Rise (°F)	12.5	11.3	9.9

TABLE 6. DETAILED MECHANICAL DESIGN CHARACTERISTICS
CALCULATED VALUES (PSI) DUE TO PRESSURE LOADING

	3.25 lb/sec (T-111 Duct)	9 lb/sec (T-111 Duct)
Frame Structure		
- Design Pressure	25	25
- Maximum Primary Hoop Stress in Frame	1,062	1,200
- Maximum Stress in End Shield - Conn. End	19,375	19,740
- Maximum Stress in End Shield - Opp. Conn. End	12,100	12,860
- Maximum Bending Stress in Frame	13,530	10,500
Duct		
- Design Pressure	350	300
- Maximum Primary Hoop Stress in Duct	29,000	26,700
- Maximum Stress in End Cap	7,060	7,300
- Maximum Bending Stress in Duct (primary and secondary)	31,400	26,700

TABLE 7. DETAILED WEIGHT CHARACTERISTICS (POUNDS)
CALCULATED VALUES

	3.25 lb/sec	9 lb/sec	
	(T-111 Duct)	(T-111 Duct)	(316 SS Duct)
Stator			
- Magnetic Core	131	306	
- Winding	99	215	
- Frame and Heat Exchanger	67	139	
- Miscellaneous	22	32	
Duct			
- Helical Duct and Wrapper	20.5	28	18
- Center Magnetic Core	10.5	16	16
- Inlet/Outlet Connector	23	27	13
- Miscellaneous	9	12	6
Total Weight	382	775	745

TABLE 8. NPSH REQUIREMENTS

NPSH (psi)	Maximum Recommended Flow	
	3.25 lb/sec Design	9 lb/sec Design
3	2.8 lb/sec	7.8 lb/sec
4	3.25 lb/sec	9 lb/sec
5	3.6 lb/sec	10 lb/sec
6	3.95 lb/sec	11 lb/sec
7	4.25 lb/sec	12 lb/sec

بنابراین، در حرارت اتاق، فشار داخلی winding cavity باید تقریباً 9psi باشد، حداقل جوش قوس الکتریکی winding و سیستم عایق در فشار کمتر از 4psi، توصیه می‌شود، این فشار به فشار، کمی بیشتر از فشار اتمسفر، تحت حرارت اتاق بدست می‌آید. محدودیت روی net positive suction براساس ملاحظات cavitation وجود NpsH در حداقل Two velocity heads هر ورودی به

پخش پمپاژ، می‌باشد. این معیار، در مرجع ۱ آمده است و تا حد قابل قبولی نیز مقدار پایایی است.

تحت شرایط زیر ، پمپ بخوبی عملکرد می‌کند:

حرارت $1000^{\circ} F$

Npsh vpsi

جریان 9lb/sec یا 3/25 lb/sec

تحت حرارت $1000^{\circ} F$ یا کمتر، پمپ می‌تواند به طور مداوم تحت جریان‌هایی 45% تا 130% و فشار

تا 240psi عمل کند، البته تا زمانی که الزامات NPSH جدول ۸، رعایت شوند.

پمپ می‌تواند تحت حرارت $1000^{\circ} F$ و تا فشار 250psi با نرخ جریان مشابه بالا، برای دورانهایی

عملکرد داشته باشد. البته ، عملکرد به خوبی نقطه طرح باشد. محدودیت زمان عملکرد، در حرارت

winding و duct می‌باشد. این حرارتها نباید از حدود توصیه شده فراتر روند. یا افزایش جریان خنک

کننده Nak و یا حرارت آن میتوان، تحت سایر شرایط نیز عملکرد مناسبی داشت.

پ - پارامترهای اصلی

چندین پارامتر اصلی وجود داشت که در این مطالعه آنالیزی برای تعیین طرح نهایی که نمایانگر تعادل

کارایی بهینه، حداکثر قابلیت اعتماد، حداقل وزن و انعطاف پذیری تولید باشد، متغیر بودند. مهمترین

پارامترها در زیر آمده است:

۱- هندسه مقطع عرضی مسیر جریان

۲- ضخامت دیواره لوله و فاصله مغناطیسی (magnetic gap)

۳- فرکانس

۴- قطر لوله، مسیر جریان و استاتور

۵- طول لوله و استاتور

۶- سرعت و slip شیب تعیین شده از روابط درونی فرکانس، هندسه مسیر جریان و قطر اساساً، به

خاطر فاصله مغناطیسی بزرگی که پمپ EM، القایی در مقایسه با موتورهای رایج القایی دارد،

ماشینی با چگالی شارش نسبتاً پایین محسوب میشود. جریان های مغناطیسی بزرگ، برای

ایجاد سطوح شارش مورد نیاز در gap لازم هستند که به نوبه خود منجر به ایجاد فاکتورهای

نیروی نسبتاً پائین تر می شود بنابراین، مطلوب است که، فاصله بین stator core و سازه

آهنی مرکزی را یا حفظ ضخامت عایق حرارتی، ضخامت دیواره و ارتفاع مسیر جریان تا جایی

که امکان دارد کوچک کنیم. دیواره های باریک لوله، برای کاهش I^2R تلفات در لوله، مناسب

است زیرا این دیواره ها در تناسب مستقیم با ضخامت لوله هستند.

سرعت و شیب (لغزش) مایع از جمله پارامترهای مهم بود و بواسطه هندسه مسیر جریان ، فرکانس و

قطرها تعیین می شود. ترکیبهای مختلف این پارامترها باید مورد بررسی قرار گیرند تا مقادیر بهینه شان

تعیین شود.

مطلوب است برای عملکرد مطلوب پمپهای EM القایی، از سرعتها نسبتاً بالا و لغزش پایین مایع

استفاده شود. هر چند سرعت بواسطه اتلاف هیدرولیکی و Npsh محدود است. به علاوه، کاهش کارایی

در طرح بواسطه لغزش مایع، در نهایت به حداکثر خواهد رسید، چرا که با اتلاف مایع (لغزش)، اتلاف

winding و لوله I^2R افزایش می یابد.

ت- الزامات Power Conditioning

طرح های نهایی پمپ EM، به منبع سه فاز 60cps نیاز دارند. در جدول ۹، ولتاژ، جریان و نیروی مورد نیاز هر یک از طرحها آمده است.

سیستم‌های نیروی که احتمالاً در یک سیستم نیروی الکتریکی مدار پمپ EM وجود دارد در زیر آمده است:

۱- 400cps - ۳ فاز - ۱۰۰۰ ولت - Line to neutral, rms

۲- 1200cps - ۳ فاز - ۱۰۰۰ ولت ، Line to neutral ,rms

وسایل و تجهیزات مختلفی وجود دارد که میتوان ولتاژ و فرکانس مورد نیاز را از سایر منابع نیرو تهیه کرد. تبدیل دینامیکی (دستگاه ژنراتور-موتور)، مطلوب نیست، وزن سنگین ماشین فرکانس کم، و مشکلات فرسودگی و سایش مصالح آن را نامطلوب می‌سازد، همچنین، فرکانس خروجی ژنراتور، قابل تنظیم نیست. رایج ترین روش تبدیل استاتیکی یعنی یکسوسازی بعد از واژگونی، نیز عدم فریت‌هایی دارد. مثلاً اینکه به خازن‌های تغییر جریان سنگین و ترانسفورماتورهای با فرکانس بسیار یا پایین نیاز دارد.

Synchronous static Frequency Divider به همراه یک ترانسفورماتور با فرکانس بالا از جمله تجهیزات بهسازی پمپ EM هستند. این وسیله یعنی Synchronous بسامد ژنراتور را تا میزانی که برای پمپ مناسب باشد، کاهش میدهد. یک ترانسفورماتور برای کاهش ولتاژ خروجی ژنراتور تا سطح ولتاژ مورد نیاز پمپ کاهش میدهد. بخشهای زیرین که درباره الزامات بهسازی نیرو هستند، به طور

خلاصه توضیحاتی در مورد تقسیم کننده بسامد، ترانسفورماتور ورودی و کنترل پمپ ارائه می‌دهند. مقادیر داده شده در این بخشها به پمپ 3/25 lb/sec اشاره دارند. همه نتایج در جداول ۱۲ و ۱۳ برای پمپ 9lb/sec آمده است.

۱- Synchronous static frequency Divider

نمودار اولیه از چنین وسیله ای در شکل ۱۸ آمده است. حاصل عملکرد Logic circuitry برای فراهم آوردن سیگنال کنترل SCRs، در زمان و توالی مناسب استفاده می‌شود.

الف- Silicon controlled Rectifier Circuit

در شکل ۱۹، این قسمت نشان داده شده است: که مداری است که نیرو را کنترل کرده و ولتاژهای خروجی با فرکانس پائین تولید می‌کند. این ولتاژهای با فرکانس پائین بوسیله فراهم آوردن ولتاژهای dc مثبت و سپس ولتاژهای dc منفی از ورودی سه فاز با فرکانس بالا تا هر فاز خروجی نیز تولید میشود.

ب- pulse Generating circuits

مدار تولید کننده پالس یکسو کننده و مدار تولید کننده پالس inverter از المانهای اولیه در تولید سیگنالهای کنترل SCRs هستند. پالسهای یکسو کننده برای ارتباط بین گروهی از SCRها به کار می‌رود و پالسهای مبدل برای دو هدف استفاده میشوند: ۱- برای ارتقاء ارتباط بین گروههای مثبت و

منفی گروههای SCR ها در زمانی که بار القایی است و ۲- همچنین برای هدایت مدار Counter .

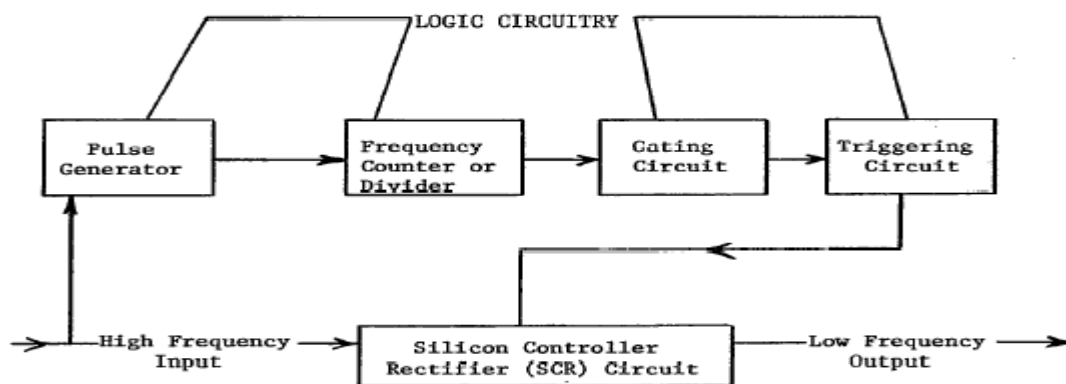
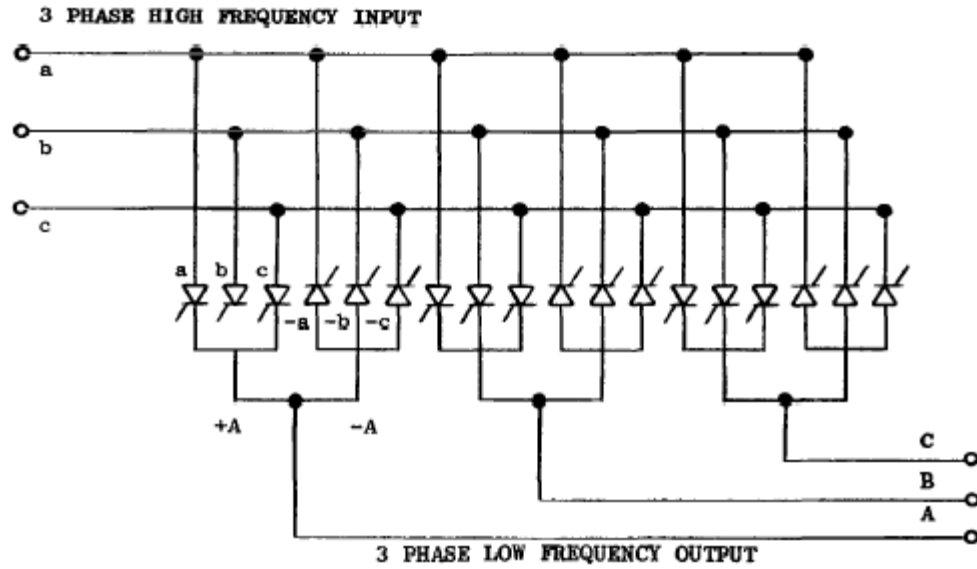


Figure 18. Block Diagram Static Frequency Divider.



F1092-19

Figure 19. Synchronous Static Frequency Divider.

TABLE 9. POWER SUPPLY REQUIREMENTS

	3.25 lb/sec Design (T-111 Duct)	9 lb/sec Design (T-111 Duct) (316 SS Duct)	
Design Point Flow Rate			
- 20 psi, 1000°F			
V_L	145	160	170
I_L	145	350	350
KW_{in}	17	43	40
KVA_{in}	36	98	102
- 240 psi, 1300°F			
V_L	170	195	205
I_L	165	355	360
KW_{in}	20	45	41
KVA_{in}	48	120	130
130% Design Point Flow Rate			
- 250 psi, 1000°F			
V_L	185	220	230
I_L	175	400	400
KW_{in}	23	55	50
KVA_{in}	55	150	160
- 250 psi, 1300°F			
V_L	220	280	300
I_L	205	485	500
KW_{in}	28	75	65
KVA_{in}	80	240	260

Table 10. Summary of Equipment Characteristics for 400 cps Input Frequency.
(3.25 lb/sec)

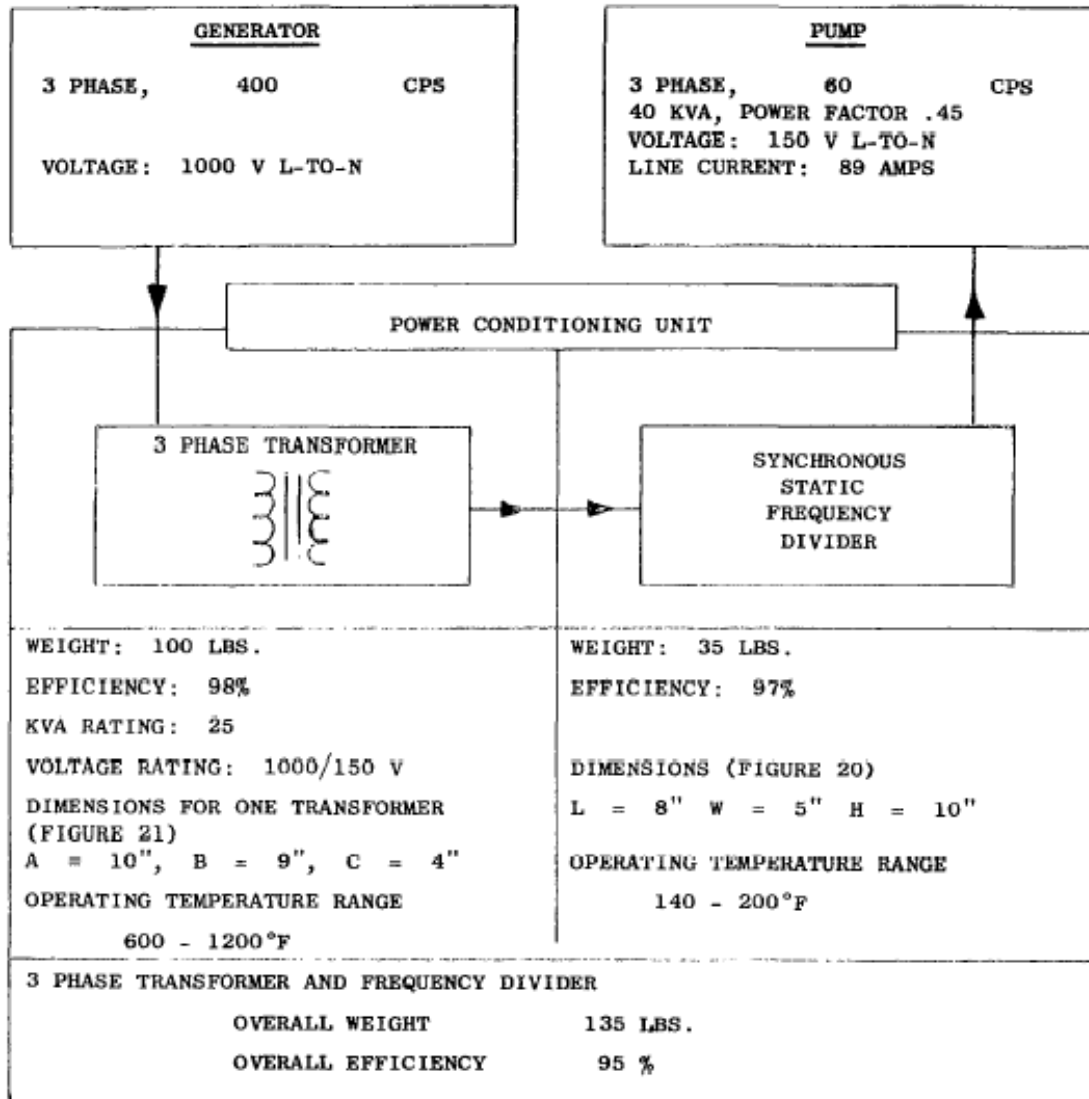


Table 11. Summary of Equipment Characteristics for 1200 cps Input Frequency.
(3.25 lb/sec)

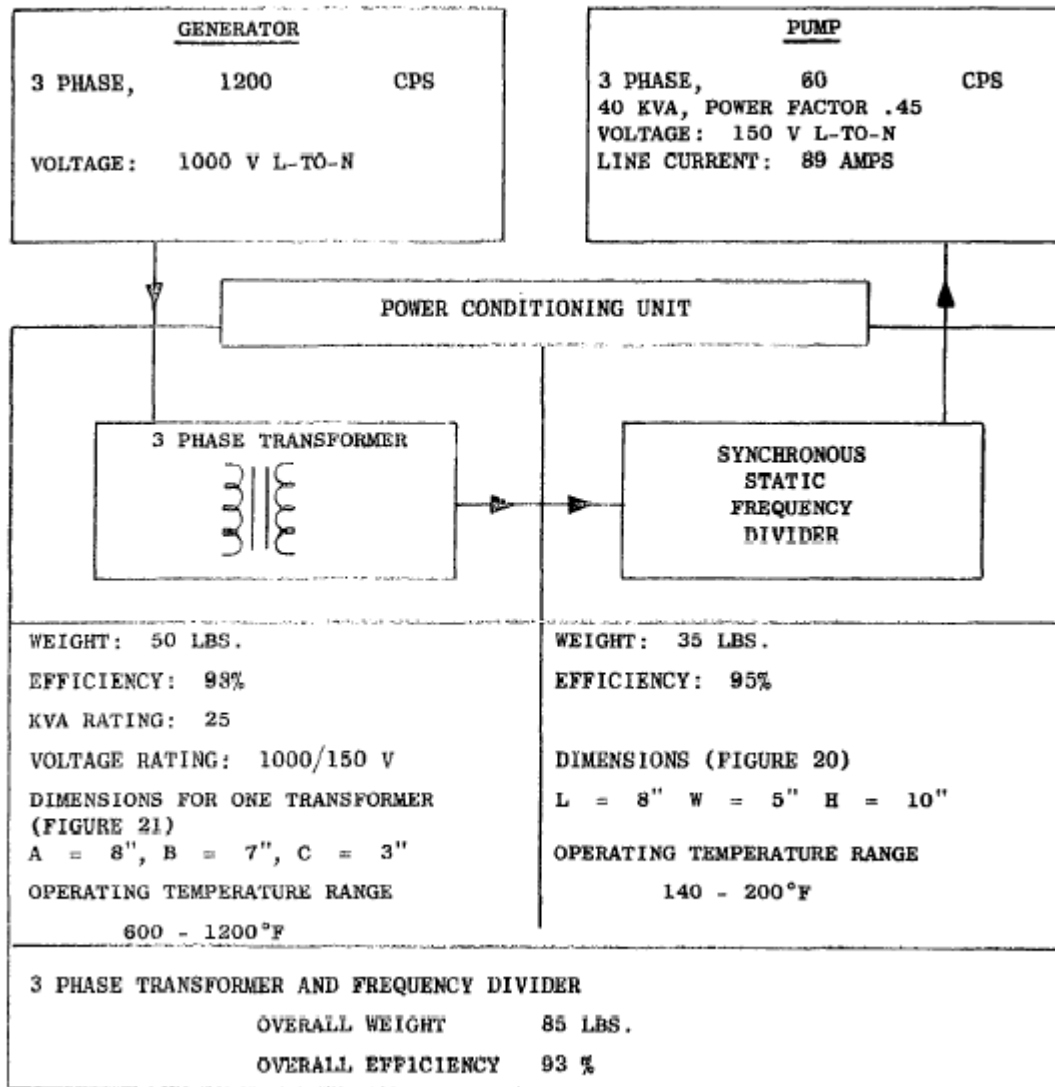


Table 12. Summary of Equipment Characteristics for 400 cps Input Frequency.
(9 lb/sec)

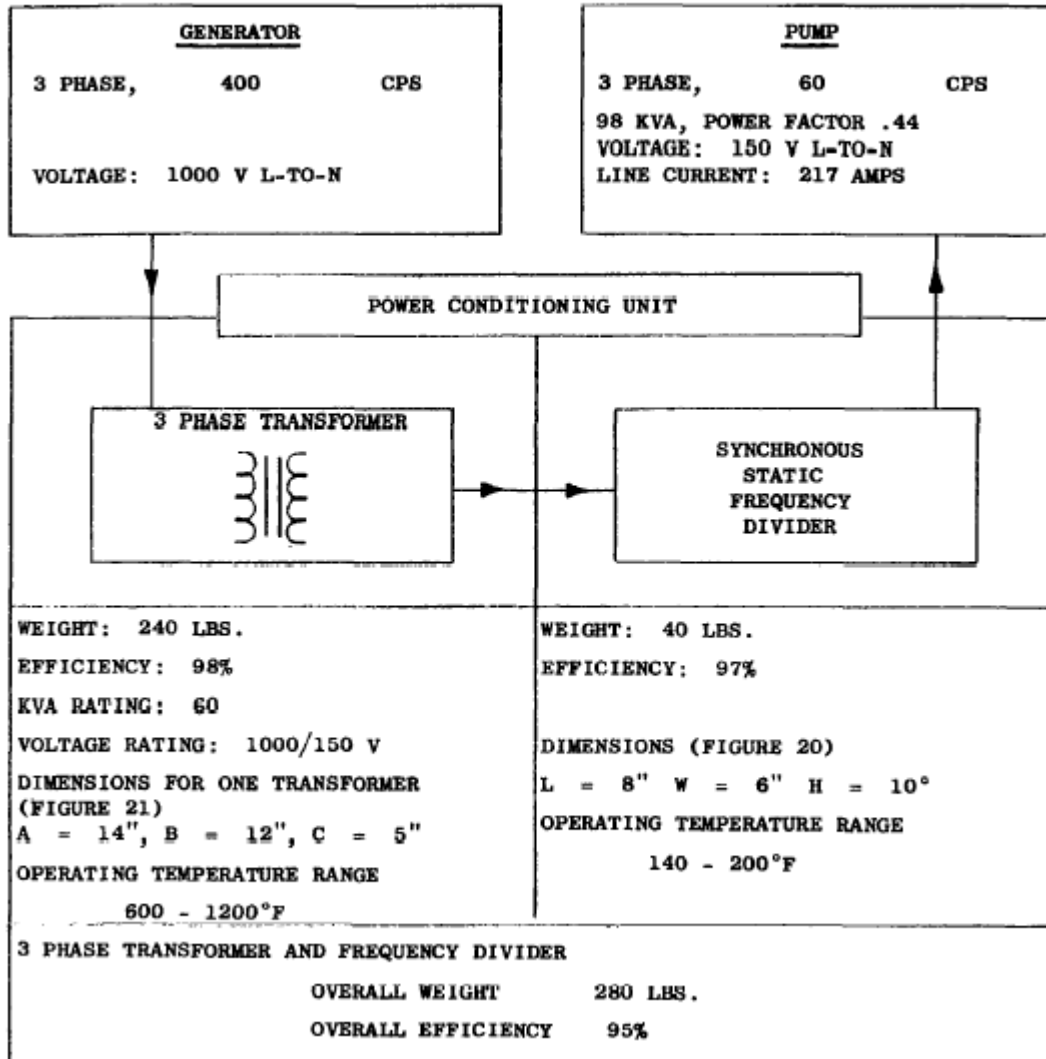
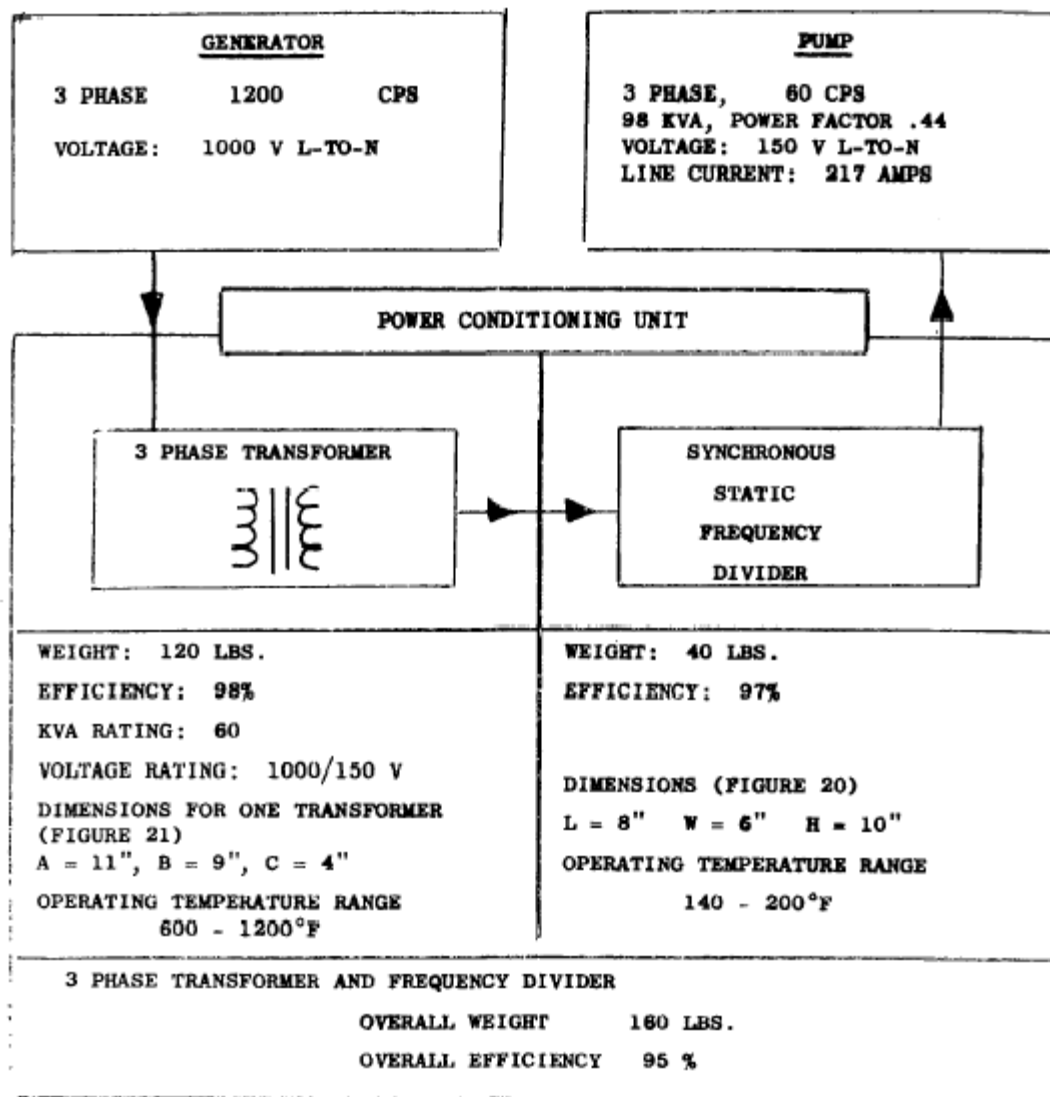


Table 13. Summary of Equipment Characteristics for 1200 cps Input Frequency.
(9 lb/sec)



پ- Frequency counter or Divider

هدف مدار شمارشگر، تولید پالس‌های on,off در توالی مناسب جهت کنترل مدار gating است. این

مدار یک شمارگر کدگذاری دودویی است که برحسب نرخ فرکانس مطلوب، ورودی‌ها را تقسیم می‌کند.

ت- Gating circuit

این مدار برای فراهم آوردن توالی مناسب برای خاموش و روشن کردن SCRها به کار می‌رود و این کار را با متوقف کردن یا آزاد کردن پالس‌های یکسو کننده انجام می‌دهد.

ث- Triggering circuit

این مدار برای تولید سیگنال‌های triggering تا راهگاه SCRها استفاده می‌شود. این مدار سیگنال‌های gating را ترکیب و تقویت می‌کند. این مدار سیگنال‌های gating، پالس‌های یکسو کننده و مبدل را ترکیب و تقویت می‌کند. یک نمای ایزوتوپیک از تقسیم کننده بسامد پیشنهادی در شکل ۲۰ آمده است. این واحد کامل ۸ عدد SCR و سایر نگهدارنده و پایه آنها، سیم کشی، logic circuitry و سازه جعبه مانند آن را با تمهیدی که برای خنک کردن آن دیده شده است، نشان می‌دهد.

۲- ترانسفورماتور ورودی

از آنجا که ولتاژ ۱۰۰۰ برای استفاده در پمپ EM بالا است، از یک ترانسفورماتور برای کاهش سطح ولتاژ استفاده می‌شود. با استفاده از Synchronous stator fre..... دیگر نیازی به تنظیم ترانسفورماتور تا بار کار KVA نیست. زیرا فاکتور نیروی ذاتی قابلیت synchronon... را تصحیح می‌نماید. این کار به این صورت است که انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی باز به صورت یکنواخت بوسیله مبدل بسامد از فاز کم به فاز کم دیگری تغییر می‌کند. بدون آنکه لازم باشد به ترانسفورماتور باز گردد. این فاکتور در یک طرح پایا 0/80 در نظر گرفته می‌شود. یک پمپ 3/25 lb/sec به 18kw نیاز دارد، میزان KVA برای فاکتور 80% برابر 22/5KVA خواهد بود. اندازه ترانسفورماتور 25KVA در نظر گرفته شده است تا بدین طریق اتلاف در Synchronous را نیز پوشش دهد.

۱- در 400cps، وزن یک ترانسفورماتور باز 25KVA با کارایی ۹۸٪ حدود 100 lb تخمین زده شده است.

۲- با میزان‌های مشابه، برای 120cps، وزن ترانسفورماتور با کارایی ۹۸٪ حدود 50 lb تخمین زده شده است. در شکل ۲۰، ترانسفورماتور تک فازی نشان داده شده است. این ترانسفورماتور شامل یک Hiperco wound core، سیم پیچ‌های نقره‌ روکش شده با سیکل و beryllium oxide winding spool میشود. این ترانسفورماتور محدودیت حرارتی یا محیط تشعشعاتی ندارد و گرمای خود را با انتشار در فضا و یا یک خنک کننده $400^{\circ}F$ از دست می‌دهد. در عملکرد سه فازی، سه ترانسفورماتور تک فازی از همین نوع استفاده می‌شود. ابعاد تقریبی این ترانسفورماتورها در شکل‌های ۱۰- و ۱۱ و ۲۱ آمده است.

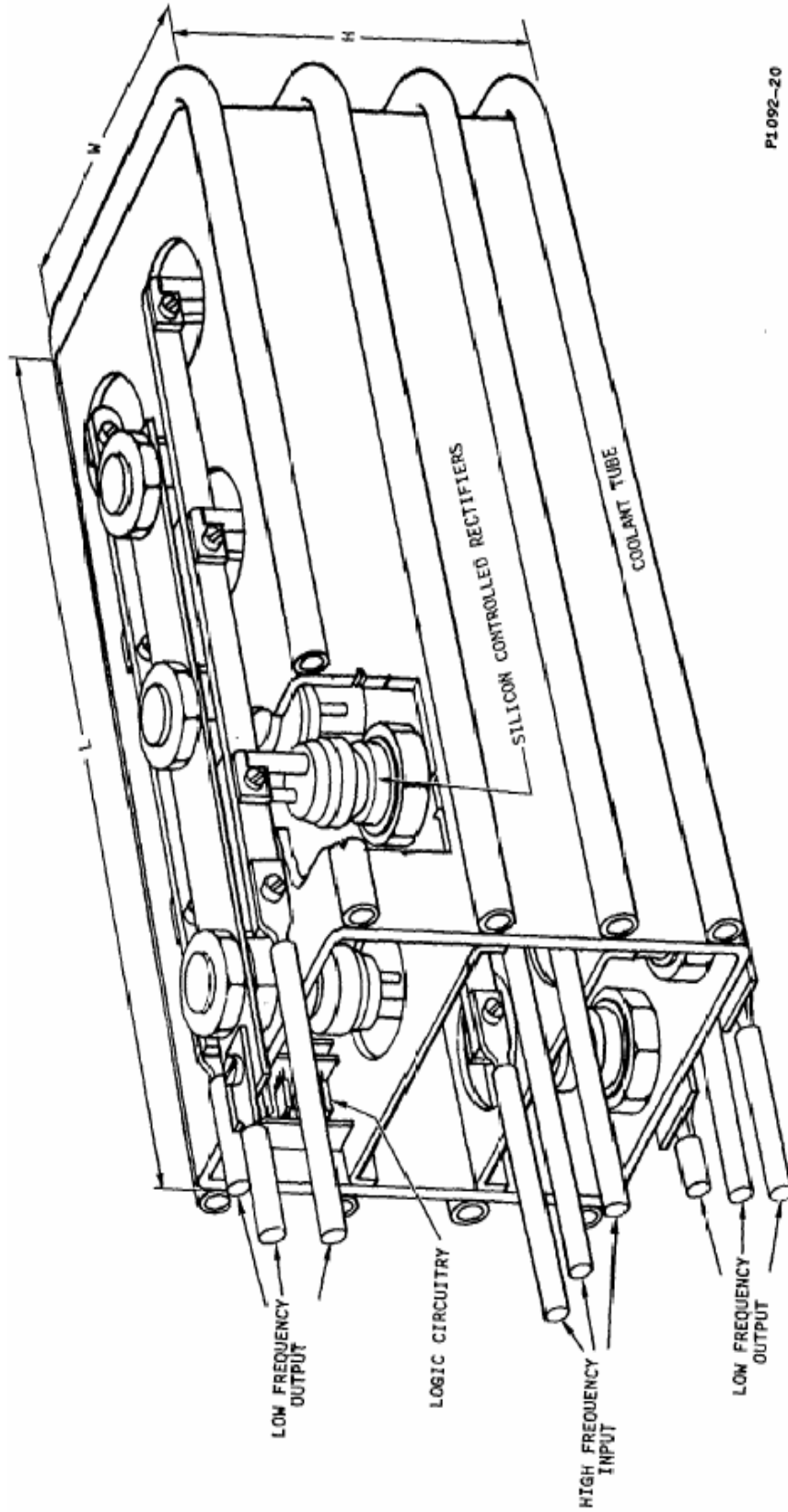
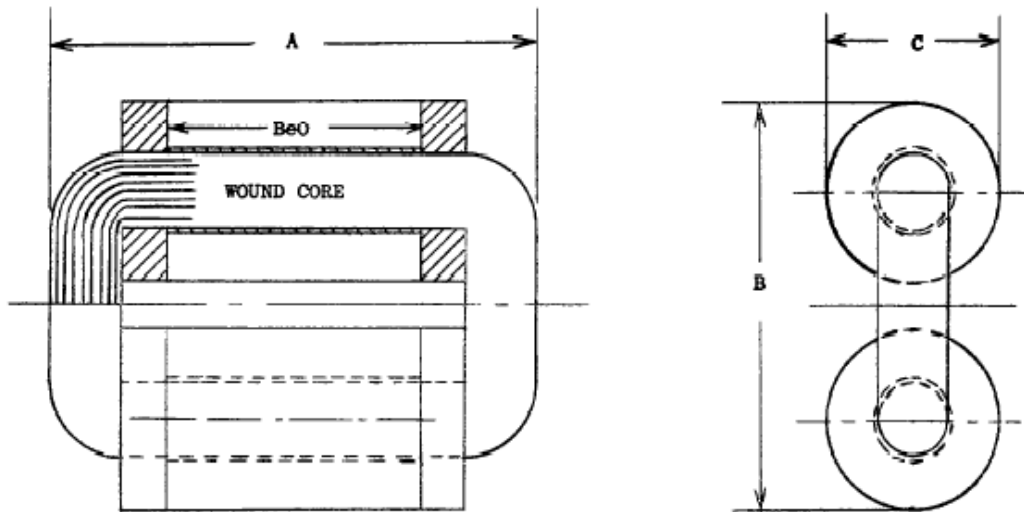


Figure 20. Isometric View Synchronous Static Frequency Divider.



P1092-21

Figure 21. Construction of Single Phase Transformer.

TABLE 14. EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS

		9 lb/sec Pump (T-111 Duct)	9 lb/sec Pump (316 SS Duct)	3.25 lb/sec Pump (T-111 Duct)
R_i	(ohms)	88.2	98.2	20.6
R_1	(ohms)	0.148	0.148	0.063
X_1	(ohms)	0.816	0.821	0.221
R_c	(ohms)	105	105	25.9
R_{d1}	(ohms)	11.2	18.1	3.35
X_{f1}	(ohms)	0.131	0.125	0.029
R_{f1}	(ohms)	1.10	1.27	0.392
X_{d2}	(ohms)	0.066	0.065	0.014
R_{d2}	(ohms)	18.1	28.4	4.96
X_m	(ohms)	1.35	1.36	0.396
s'		0.425	0.424	0.465
s		0.421	0.424	0.444
I_1	(amps)	121	121	144
V_1	(volts)	242	256	82.9

۳- Control of the pump

جریان پمپ $32/8\text{gpm}, 3/25\text{ lb/sec}$ و فشار آن 240psi است و از پتاسیم 1000°F به عنوان سیال کاری در آن استفاده می‌شود، پمپ باید بتواند فراتر از گستره های معمول کار کند. جریان و فشار باید با تغییر ولتاژ ورودی یا ولتاژ و فرکانس ورودی کنترل شود.

الف- کنترل ولتاژ

با قرار دادن چندین Tap در ترانسفورماتور میتوان ولتاژ را کنترل کرد. اگر از تجهیزات بهسازی نیرو استفاده میشود، این روش مناسبی برای کنترل است. هر چند، کارایی پمپ به شدت به صورت خطی با جریان کاهش می‌یابد، مثلاً، جریان پائین درست مطابق است با کارایی پائین از دیگر مشکلات در رابطه با ترانسفورماتور tapped، ایجاد یک مکانیسم switching است که بتواند در خلاء و هم در گازهای یکپارچه از نوع بسته کار کند. استفاده از چنین اتصال هایی (switches) به طور کلی موجب افزایش قابل توجه وزن و کاهش قابلیت اعتماد می‌شود.

با تأخیر الکتریکی در آتش زدن SCRها در تقسیم کننده بسامد نیز می‌توان ولتاژ را کنترل (کاهش) کرد. بدینوسیله کنترلی مشابه مبدل درجه‌ای فراهم می‌آید و جز اینکه آن بدون وقفه کار میکند. در این روش دیگر نیازی به مکانیسم قطع و وصل (اتصال) نیست. یک عدم مزیت این روش تأخیر در آتش‌زدن است که موجب اتلاف‌های اتصالی در SCR ها می‌شود. برای بسامد ورودی 400CPS ، اتلاف اتصال تقریباً 350 وات است در حالیکه اتلاف برای 1200CPS تقریباً 1000 وات است.

ب- کنترل ولتاژ و فرکانس (بسامد)

میتوان *logic circuitry* را به آسانی برای تولید بسامدهای مختلف کمتر از 60cps با وزن بسیار کم و کارایی بالا فراهم آورد. این به پمپ امکان میدهد تا با بسامدهای کمتر نیز برای تولید نرخ‌های پائین‌تر جریان کار کند.

الف) محاسبات کارایی - مدار الکتریکی معادل (هم ارز).

اصطلاحات تعمیم یافته مانند خروجی نیرو، اتلاف، کارآمدی پمپ، فشار توسعه یافته و سایر خصوصیات اصلی را در مراجع ۱، ۷ و ۸ گردآوری و ارائه کردیم.

برای طراحی و تحلیل پمپ *EM* این اصطلاحات را باید در رابطه با موارد زیر در ارزیابی کرد: ساختار تثبیت کننده، مارپیچ‌ها (*windings*)، داده‌های مفصل ابعادی برای تغییرات خاص و همچنین سایر تاثیراتی که در اصطلاحات تعمیم یافته نادیده انگاشته شده اند مانند تاثیر بخش‌های انتهایی، خارج شدن سیال از مسیر، اتلافات آهن و اتلاف هیدرولیک و ... را باید حتما مورد توجه قرار داد. البته میتوان با استفاده از جریان الکتریکی معادل پمپ‌های *EM*، که همان روش مورد استفاده در طراحی موتور القایی است، این کار را به سهولت انجام داد.

در این مطالعه طراحی، از جریان الکتریکی معادل در هر سه فاز پمپ القایی خورشیدی ارائه شده در شکل ۸ استفاده کردیم. مشتقات و راه‌حل‌هایش نیز با مشتقات و راه‌حل‌های ارائه شده در طراحی موتور القایی که در چندین متن کلاسیک مانند مرجع شماره ۹ آمده است قابل مقایسه و متشابه می‌باشد. از راه‌حل مدار جریان الکتریکی برای تعیین تمام خصیصه‌های کارایی پمپ القایی *EM* خورشیدی خاص استفاده می‌شود. پارامترهای مدار معادل با توجه به شکل پمپ مورد بررسی، محاسبه میکنیم. این محاسبات را به همراه راه‌حل مدار معادل و تفسیر راه‌حل مدار در خصوص کارایی پمپ برای محاسبه در کامپیوترها سازماندهی می‌کنیم. برای تعیین سه طرح نهایی این مطالعه طراحی‌های متفاوتی در کامپیوتر ارزیابی کردیم. پارامترهای اصلی و متنوع طراحی شامل فراوانی (بسامد)، مجرا و تثبیت کننده، شکاف تثبیت کننده و حالت هندسی مارپیچ‌ها، شتاب سیال، شکل هندسی مجرای عبور فلز مایع و طول تثبیت کننده می‌باشد. در هر طراحی چند هزار طرح مختلف را بررسی کردیم تا پارامترها و شکل هندسی نهایی مشخص شود.

پارامترهای مدار جریان پمپ القایی **EM** خورشیدی نهایی را در شکل ۸ بر پایه محاسبات کامپیوتری بدست آوردیم در جدول ۱۲ ارائه دادیم.

پارامترهای مدار جریان دارای نمادهایی هستند که تعاریف آنها در بخش نمادها را آورده ایم. دو موردی که شاید نیاز به توضیح بیشتر دارند **X** نماد نشت ناشی از مقاومت القایی و دیگری **S** نماد پارامتر بدون مقدار میباشند. نشت ناشی از مقاومت القایی **X** شامل نشت ناشی از مقاومت القایی در بخش مارپیچ تثبیت کننده، پوشش خارجی مجرا و مارپیچ هماهنگ میباشد.

پارامتر بدون مقدار **S** تابع لغزش است با توجه به این واقعیت که فلز مایع در مجرای خورشیدی میلغزد (**S**) در حالی که جدا سازهای مجرا مابین مجراهای خورشیدی جریان ثابت هستند (لغزش یکسان). جریان در این مسیر به صورت عمود بر فلز مایع و جدا سازهای ثابت حرکت می کند. از این رو میتوان **S** را سوپاپ لغزش کارای فلز مایع و جدا سازها در نظر گرفت. علاوه بر این **S** اثر بخش های انتهایی یعنی جایی که فلز مایع به مجرای وارد و جایی که از آن خارج میشود را نیز در بر میگیرد.

نتایج طراحی های نهایی را که با استفاده از مدار جریان معادل و برنامه کامپیوتری مربوطه به دست آوردیم در تصاویر ۹ تا ۱۷ و جدول های ۱، ۲ و ۳ ارائه کردیم.

(ب) تحلیل هیدرولیک

برنامه کامپیوتری مدار جریان معادل و محاسبات کارایی شامل محاسبه اتلاف هیدرولیک در پمپ میشود و از آن به عنوان عامل مشترک در محاسبه کل کارایی استفاده میکند. در اصل، افت فشار هیدرولیک در مجرای پمپ را میتوان چنین محاسبه کرد:

$$p_h = 4\delta \frac{c}{D_h} \quad \frac{\sigma_v^2}{2g} + h \frac{\sigma_v^2}{2g} \quad (B-1)$$

اولین نماد افت سایشی را در مجرای خورشیدی و نماد دوم اتلاف هیدرولیک به عنوان تعداد راس های شتابی ورودی و خروجی مجرای خورشیدی ارائه میدهیم که در مرکز لوله برگشتی خمش ۱۸۰ درجه

ایجاد می‌کنند و از آن می‌گذرند. عامل سایشی ۶ به مقادیر رینالد و هارتمن بستگی دارد که با استفاده از تساوی زیر به دست می‌آیند:

$$N_R = \frac{\sigma_v D_h}{\mu}$$

$$N_H = \frac{B_f D_h}{4 \sqrt{p_f} \frac{\mu}{g}}$$

در طراحی های نهایی که از بخش های با شتاب بالای مجراهای خورشیدی استفاده میکنند این مقادیر چنین خواهند بود:

	3.25 lb/sec (T-111 Duct)	9 lb/sec (T-111 Duct)	9 lb/sec (316 SS Duct)
D_h (inches)	0.578	0.896	0.884
B_f (k lines/in ²)	13.1	13.7	14.7
N_R	248,000	443,000	438,000
N_H	83	134	142

این داده‌ها نشان می‌دهند که جریان در بخش مارپیچ منظم نیست. با ورود به منحنی به عنوان تابع $N_R + N_H$ که در مرجع ۱ ارائه کردیم عامل سایشی در مجرا عددی معادل ۰/۰۰۳۴-۰/۰۰۳۸ خواهد بود. در محاسبات طراحی از عدد نسبتاً محافظه کارانه ای معادل ۰/۰۰۵ برای محاسبه انحنا و شتاب پایین تر در دو پیچ اول مارپیچ استفاده می‌کنیم. عامل اتلاف ورود و خروج h را به عنوان راس شتابی وابسته به شکل هندسی و تجربه کار با پمپ‌های قبلی معادل ۱/۵ تخمین زدیم. برنامه کامپیوتر میزان خالص اتلاف هیدرولیک در دمای ۱۰۰۰ درجه فارنهایت از ورودی مجرا به خروجی آن با استفاده از معادله (**B-1**) چنین محاسبه کرد:

	3.25 lb/sec (T-111 Duct)	9 lb/sec (T-111 Duct)	9 lb/sec (316 SS Duct)
Duct Entrance Loss (psi)	1.8	2.3	2.3
Loss through Helical Passage (psi)	31.6	26.4	24.6
Helix Exit Loss (psi)	1.3	1.8	1.8
180° Bend Loss (psi)	1.6	3.0	3.0
Center Return Pipe & Exit Loss (psi)	.2	.4	.4
Total Hydraulic Loss (psi)	36.5	33.9	32.1

حرارت مارپیچ تثبیت کننده یکی از عوامل اصلی محدود کننده خروجی است. این حرارت تابع فلز مایع و حرارت مجرا، تراکم مایع درون مارپیچ، سیستم خنک کننده و شکل هندسی و ویژگی های دمایی ساختار پمپ میباشد. افزایش دمای مارپیچ را میتوان با استفاده از مدار الکتریکی معادل بدست آورد. جریان گرمایی معادل برای فلز خنک شده در پمپ القایی خورشیدی با مبدل گرمایی در اطراف ساختمان پمپ را میتوان با استفاده از برنامه کامپیوتری بدست آورد. نتایج این محاسبات در طراحی با استفاده از برنامه کامپیوتری طرح های نهایی در این گزارش به شرح زیر است:

	3.25 lb/sec	9 lb/sec
Winding Hot Spot Temperature Rise	275 °F	300 °F
Winding Average Temperature Rise	170 °F	165 °F

این نتایج نشان میدهند که دما از دمای معمول خنک سار بالاتر میرود. دمای خنک ساز **NaK** به میزان ۶۷۵ درجه فارنهایت برای دمای حقیقی چنین خواهد بود:

	3.25 lb/sec	9 lb/sec
Winding Hot Spot Temperature	950 °F	975 °F
Winding Average Temperature	845 °F	840 °F

این نتایج با در نظر گرفتن کل بار گرمایی که در هسته تثبیت کننده به سمت مبدل گرمایی حرکت میکنند به دست می آید چونکه مقداری از گرما هدر رفته یا از پیچ ها تابیده میشود. صحت این نتایج با توجه به صحت محدودیتهای دمایی برنامه مورد نظر محدود میشود. به طور ویژه این محدودیت شامل القای دما بین مجرا و تثبیت کننده و القای الکتریکی بین رساناها و آهن تثبیت کننده میباشد. مقادیر مربوط به محدودیت دمایی همراه با سایر مقادیر داده های طراحی و ویژگی های فیزیکی را در ضمیمه **E** ارائه کردیم.

بار گرمایی کل منتقل شده به سیستم خنک ساز شامل اتلاف تثبیت کننده و بار گرمایی مجرا در طول القای گرمایی می باشد. دمای فلز مایع معادل ۱۰۰۰ درجه فارنهایت و دمای خنک ساز **NaK** به میزان ۶۷۵ درجه فارنهایت برای دمای حقیقی چنین خواهد بود:

	3.25 lb/sec (T-111 Duct)	9 lb/sec (T-111 Duct)	9 lb/sec (316 SS Duct)
Heat Load From Duct Through Thermal Insulation, KW	0.59	1.12	1.12
Winding (I^2R) Losses, KW	3.85	6.39	6.43
Iron Loss, KW	1.0	2.0	2.0
Total Heat Load, KW	5.44	9.51	9.55

3.25 مبدل را باید دوباره بر اساس بارهای گرمایی، تنظیم کنیم. محاسبات عمومی برای پمپ **lb/sec** به شرح زیر است.

اگر دمای متوسط مورد نظر خنک ساز معادل ۶۷۵ درجه فارنهایت باشد، در نتیجه در دمای ورودی ۶۵۰ درجه فارنهایت دمای خروجی باید معادل ۷۰۰ درجه فارنهایت باشد و افزایش دمای خنک ساز در مبدل گرما ۵۰ درجه فارنهایت خواهد بود. جریان خنک کننده **NaK** مورد نظر از این طریق بدست می آید:

$$Q = \frac{3413(q_T)}{C_p \Delta T} \quad (C-1)$$

Where

q_T = heat load in kw

c_p = specific heat of Nak in $\frac{Btu}{lbF}$

Q = Nak coolant flow rate in lb/hr

Using a conservative value of 6 KW for the heat load, one calculates

$$Q = \frac{3413(6)}{.21(50)} = 1950 lb/hr \approx 5 gal/min$$

این میزان، مقدار حداقل جریان برای این بار گرمایی و افزایش دما میباشد. برای احتیاط بهتر است میزان مورد نظر را ۶ گالون در دقیقه فرض کنیم. برای جریان موازی با ورودی مجزا در هر دو بخش انتهایی مبدل گرما و خروجی در مرکز، حداقل جریان در هر نیمه ۳ گالون در دقیقه خواهد بود. برای طراحی پمپ **3.25 lb/sec** افت فشار خنک ساز در مبدل گرمایی چنین محاسبه میشود.

Area of coolant flow passage, $A_c = .25 \times .45 = .1125 in^2$

Hydraulic diameter, $D_{hc} = \frac{4(.1125)}{1.4} = .322"$

Velocity of coolant, $V_c = \frac{.32(3)}{.1125} = 8.54 ft/sec$

Velocity head, $\frac{\sigma_c v_c^2}{2g} = \frac{49.4(8.54)^2}{64.4 \times 144} = .388 psi$

Reynolds number, $N_R = \frac{\sigma_c V_c D_{hc}}{\mu_c} = 76,800$

For this Reynolds number, the friction factor, ΔT , is approximately 0.005 which gives a pressure drop through one half the heat exchanger of

$$\Delta P = 4\delta \frac{C}{D_{hc}} \quad \frac{\sigma_c v_c^2}{2g} = 8.3 psi$$

برای ۱ تا ۲ راس شتابی از دست رفته در ورودی و خروجی مبدأ گرمایی مارپیچ افت فشار را معادل ۹

psi در نظر گرفتیم. بنابراین، مبدل گرمایی نیاز به جریان معادل ۶ گالون در دقیقه و فشار ۹ **psi**

برای جریان موازی مبدل گرما خواهد داشت همانطور که در طراحی نهایی نشان دادیم. برای پمپ

۹ **lb/sec** نیز محاسبات مشابهی انجام شد و مشخص شد که جریان معادل ۸ گالون در دقیقه و فشار ۱۶ **psi** مورد نیاز است.

نکته جالب توجه این است فشار فلز مایع پتاسیم اولیه در مجرای پمپ **EM** افزایش مییابد و محاسبات پمپ **3.25 lb/sec** چنین خواهد بود.

$$\Delta T_f = \frac{3413(q_f)}{C_p Q_f}$$

q_f = total heat generated in duct and fluid less heat conducted through thermal insulation

$$q_f = kw_{d1} + kw_{d2} + kw_f + kw_h - kw_{ii}$$

$$q_f = 2.34 + 1.29 + 4.22 + .52 - .59 = 7.78 \text{ kw}$$

$$\Delta T_f = \frac{3413(7.78)}{.181(3.25 \times 3600)} = 12.5^\circ F$$

این بخش شامل تحلیل مکانیکی مفصل و محاسبات لازم برای تایید یکپارچگی ساختار پمپ **EM** القایی خورشیدی **3.25 lb/sec** می باشد. مراجع ۱۰ الی ۱۸ را در بخش مختلف این تحلیل به کار بردیم.

محاسبات یکسانی نیز برای پمپ **9 lb/sec** انجام دادیم که نتایج مشابه فهرست ذیل داشت:

	T-111 Duct	316 SS Duct
q_f	19.33 KW	16.97 KW
ΔT_f	11.3°F	9.9°F

(د) محاسبات مربوط به طراحی مکانیکی.

این بخش شامل تحلیل مکانیکی مفصل و محاسبات لازم برای تایید یکپارچگی ساختار پمپ **EM** القایی خورشیدی **3.25 lb/sec** میباشد. مراجع ۱۰ الی ۱۸ را در بخش مختلف این تحلیل به کار بردیم.

محاسبات یکسانی نیز برای پمپ **9 lb/sec** انجام دادیم که نتایج مشابه فهرست ذیل داشت :

۱- مجرا

ماده به کار رفته در مجرا **T-III alloy** میباشد. در دمای ۱۳۰۰ درجه فارنهایت فشار گسست سوپاپ در ۱۰۰۰۰ ساعت معادل **8۰۰۰۰ psi** خواهد بود. بنابراین ضخامت در ساخت بیشتر با توجه به بررسی‌های ساخت اعمال می‌شود تا سوپاپ‌های فشار.

الف) پوشش بیرونی

۵- فشار اولیه

با توجه به مرجع ۱۰ فشار قشر طولی چنین محاسبه میشود :

$$(D-1) \quad \sigma_{\phi} = \frac{PR}{2t} = \frac{350 \times 2.019}{2 \times 0.062}$$
$$\sigma_{\phi} = 5699 \text{ psi}$$

The hoop stress is:

$$\sigma_h = 2\sigma_{\phi} = 11,398 \text{ psi}$$

۶- فشار ناشی از عقب کشیدن (جمع شدن) متناسب پوشش حلقه

پوشش با ضخامت تخمینی ۰/۰۰۲ جمع شدن بر روی حلقه کشیده می‌شود. با توجه به مرجع ۱۰

جابجایی شعاع:

$$\sigma = \frac{R}{E} (\sigma_h - \nu \sigma_{\phi})$$
$$(D-2) \text{ and } \sigma_h = 2\sigma_{\phi} \text{ thus}$$
$$\sigma = R/E(2 - \nu)\sigma_{\phi}$$

$$002 = \frac{2.019 \times 1.7}{24.8 \times 10^6} \sigma_{\phi}$$

$$\sigma_{\phi} = 14.451 \text{ psi}$$

$$\sigma_h = 28.902 \text{ psi}$$

۷- فشار ناشی از نا پیوستگی شکاف بخش انتهایی

یا توجه به مرجع 12 گشتاور نا پیوستگی چنین محاسبه میشود:

مقادیر جایگزین شناخته شده:

$$(D-3) M_o = \frac{\left[\frac{PR^3 \lambda^2 D_2}{4D_1(1+V)} + \frac{2PR^2 \lambda^3 Et_1 D_2}{Et_2(1-1/2v)[Et_1 + 2RD_2 \lambda^3(1-V)]} \right]}{\left[2\lambda + \frac{2R\lambda^2 D_2}{D_1(1+V)} - \frac{\lambda Et_1}{Et_1 + 2D_2 \lambda^3 R(1-V)} \right]}$$

Where:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{3(1-v^2)}{R^2 t^2}} = 3.6331 \quad (D-4)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-v^2)} \quad (D-5)$$

$$D_1 = 283,883$$

$$D_2 = 541.26$$

Substituting known values:

$$M_o = 18.8275in - 1b / in$$

$$V_o = M_o \left[2\lambda + \frac{2R\lambda^2 D_2}{D_1(1+v)} \right] - \frac{PR^3 \lambda^2 D_2}{4D_1(1+v)} \quad (D-6)$$

$$V_o = 124.3351b / in$$

The stresses due to these reactions are:

Moment

$$\sigma_l = \frac{-6M_o}{t^2} = -29,387 \text{ psi} \quad (D-7)$$

$$\sigma_h = \frac{2M_o \lambda^2 R}{t} = 16,185 \text{ psi} \quad (\text{D-8})$$

Force

$$\sigma_\ell = \frac{1.932V_o}{\lambda t^2} = 17,201 \text{ psi} \quad (\text{D-9})$$

$$\sigma_h = \frac{-2V_o \lambda R}{t} = 29,420 \text{ psi} \quad (\text{D-10})$$

۸- فشار ناشی از نا پیوستگی رسانا

در بدترین حالت، پوشش بیرونی را توکار فرض می‌کنیم: بنابراین با توجه به مرجع ۱۲:

$$M_o = 13.26 \text{ in lb / in}$$

$$V_o = -96.341 \text{ lb / in}$$

And

$$\sigma_t = \frac{6(1-\nu^2)}{\beta^2 t^2 R} \left[\frac{V_o}{\beta} + M_o \right] \pm V \sigma \varphi \quad (\text{D-14})$$

$$\sigma \varphi = \pm \frac{6M_o}{t^2} \quad (\text{D-15})$$

Substituting known quantities:

$$\sigma = \frac{At \quad OD}{-21,401} \quad \frac{At \quad ID}{20,694}$$

$$\sigma_t = -21,401 \quad 19,988$$

(5) Stress Summary - Duct Outer Wrapper

<u>Helix Area</u>	σ_ℓ	σ_h
Pressure	5,699	11,398
Shrink Fit	14,451	28,902

این فشارها به هم مرتبط هستند اما ترکیبی نیستند. با افزایش فشار، عقب کشیدن با توجه به اجزای فشار کم می‌شود.

<u>At End Cap</u>		
	σ_r	σ_h
Primary Pressure	5,699	11,398
Secondary Moment	-29,387	16,185
Secondary Force	17,201	-29,420
Total (Primary and Secondary)	-6,488	- 1,837

At Connector

At OD

	σ_r	σ_h
Primary Pressure	5,699	11,398
Secondary Bending	-20,694	-21,401
Total (Primary and Secondary)	-14,996	-10,004

At ID

	σ_r	σ_h
Primary Pressure	5,699	11,398
Secondary Bending	20,694	19,988
Total (Primary and Secondary)	26,391	31,385

These stress values are within acceptable limits.

۱- فشار اولیه

این مقادیر فشار مربوط به صفحه مدور، لبه های حمایت شده توسط بار وارد بر کل صفحه در مرجع 10

بدین ترتیب خواهند بود:

$$\sigma_r = \frac{-3Pr_a^2}{8mt^2} \left[(3m+i) \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \right] \quad (D-16)$$

And

$$\sigma_t = \frac{-3Pr_a^2}{8mt^2} \left[(3m+i) - (m+3) \frac{r^2}{r_0^2} \right] \quad (D-17)$$

در مرکز صفحه فشار حداکثر است

$$\sigma_t = \sigma_r = -7,062 \text{ psi}$$

at the plate OD, $r = r_0$

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_t = -2,996 \text{ psi}$$

۲- فشار ناشی از نا پیوستگی پوشش بیرونی

واکنش چنین خواهند بود

$$M_0 = 18.8275 \text{ in} - 1b / \text{in}$$

$$V_0 = 124.3351b / \text{in}$$

تنش ناشی از واکنش‌ها:

Moment

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{6M}{t^2} = -462 \text{ psi}$$

Force

$$\sigma_t = 0$$

$$\sigma_r = V_0 / t = 249 \text{ psi}$$

(3) Stress Summary - Duct End Cap

At Center

	σ_r	σ_t
Primary Pressure	-7,062	-7,062
Secondary Moment	-452	-452
Secondary Force	<u>249</u>	<u>0</u>
Total (Primary and Secondary)	-7,265	-7,514

At OD

	σ_r	σ_t
Primary Pressure	0	-2,996
Secondary Moment	-452	-452
Secondary Force	<u>249</u>	<u>0</u>
Total	-203	-3,448

These stress values are within acceptable limits.

c. Intermediate Cylinder

(1) Primary Pressure Stress

$$\sigma_\ell = \frac{PR}{2t} = \frac{-240 \times 1.308}{2 \times .06} \quad (D-18)$$

$$\sigma = -2616 \text{ psi}$$

$$\sigma_t = 2 \sigma_\ell = -5232 \text{ psi}$$

(2) Stress Due to Bending of Separators

The moment caused by the bending of the separator is

$$M = 23.099 \text{ in-lb or } 2.7476 \text{ in-lb/in}$$

The stress in the cylinder due to this moment is, from Reference 10:

$$\sigma_\ell = \frac{-6M_o}{t^2} = \frac{-6 \times 2.7476}{(.06)^2} \quad (D-19)$$

$$\sigma_\ell = \pm 4,579 \text{ psi}$$

$$\sigma_h = \frac{2M_0\lambda^2 R}{t} \quad (D-20)$$

$$\lambda^2 = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{R^2 t^2}} = 21.05 \quad (D-21)$$

$$\sigma_h = \pm \frac{2 \times 2.7476 \times 21.05 \times 1.308}{.06} = 2523 \text{ psi}$$

۲- واکنش نهایی

فشار خارجی در استوانه ای با انتهای ثابت، با توجه به مرجع ۱۵ واکنشها به شرح ذیل هستند:

فشار ناشی از این واکنشها

$$M_0 = P/2\beta^2 = -5.70 \text{ in} - 1b/\text{in} \quad (D-22)$$

$$V_0 = -P/\beta = 52.306 - 1b/\text{in}$$

The stresses due to these reactions are:

	<u>At OD</u>	<u>At ID</u>
σ_ℓ	9,500	-9,500
σ_t	9,814	-9,168

(4) Stress Summary - Duct Intermediate Cylinder

<u>Under Helix</u>	σ_ℓ	σ_h
Pressure	-2,616	-5,232
Moment	<u>±4,579</u>	<u>±7,755</u>
Total	-7,195	-12,987
<u>At Ends - ID</u>	σ_ℓ	σ_h
Primary Pressure	- 2,616	- 5,232
Secondary Bending	<u>- 9,500</u>	<u>- 9,186</u>
Total	-12,116	-14,118
<u>At Ends - OD</u>	σ_ℓ	σ_h
Primary Pressure	-2,616	-5,232
Secondary Bending	<u>+9,500</u>	<u>+9,814</u>
Total	6,884	4,582

These stress values are within acceptable limits.

$$\sigma_{\phi} = \frac{PR}{2t} = \frac{240 \times .815}{2 \times .06} = 1,834 \text{ psi} \quad (D-24)$$

$$\sigma_h = 2\sigma_{\phi} = 3,668 \text{ psi} \quad (D-25)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{R^2 t^2}} = 5.8128 \quad (D-26)$$

$$M_0 = P/2\beta^2 = 3.995 \text{ in} - \text{lb/in} \quad (D-27)$$

$$V_0 = P/\beta = -46.449 \text{ lb/in} \quad (D-28)$$

The stresses due to these reactions are:

	<u>At OD</u>	<u>At ID</u>
σ_{ϕ}	-6,659	6,659
σ_h	-6,879	6,439

(3) Stress Summary - Duct Inner Cylinder

<u>At OD</u>	σ_{ϕ}	σ_h
Primary Pressure	1,834	3,668
Secondary Bending	<u>-6,659</u>	<u>-6,879</u>
Total	-4,825	-3,211
<u>At ID</u>	σ_{ϕ}	σ_h
Primary Pressure	1,834	3,668
Secondary Bending	<u>6,659</u>	<u>6,439</u>
Total	8,493	10,107

These stress values are within acceptable limits.

ث) ماریچ

در بدترین حالت رشته سربی به قطر ۰/۸۵ اینچ خواهد بود.

فشار تفاضلی سرتاسر جداساز:

جداساز الزاما میله‌ی پایه می‌باشد. فشار باعث ایجاد گشتاوری با مقدار حداکثر زیر می‌شود:

$$\Delta p = \frac{p \times \text{lead}}{\text{Length}} = \frac{240 \times 0.85}{13} \quad (\text{D-29})$$

$$\Delta p = 15.692 \text{ psi}$$

$$M = \Delta P \pi \left(\frac{d_o + d_i}{2} \right) \left(\frac{d_o - d_i}{2} \right) \left(\frac{d_o - d_i}{4} \right) \quad (\text{D-30})$$

$$M = 15.692 \pi (2.217)(.65)(.325) = 23.099 \text{ in-lbs}$$

$$C = t/2 = .05/2 = .025 \text{ in} \quad (\text{D-31})$$

$$I = bd^3 / 12 = 1/12 \left[\pi \left(\frac{d_o + d_i}{2} \right) t^3 \right] = 1.4417 \times 10^{-5} \quad (\text{D-32})$$

$$\sigma = \frac{M_c}{I} = 27,211 \text{ psi} \quad (\text{D-33})$$

این مقادیر در محدوده قابل قبول قرار دارند.

ه) لوله‌های ورود/خروج

(1) Primary Pressure

$$\sigma_\phi = \frac{PR}{2t} = \frac{350 \times .603}{2 \times .109} = 968 \quad (\text{D-34})$$

$$\sigma_h = 2\sigma_\phi = 1936 \quad (\text{D-35})$$

(2) End Reaction

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{R^2 t^2}} = 5.0138 \quad (\text{D-36})$$

$$M_o = P / 2\beta^2 = 6.9615 \text{ in-lb/in} \quad (\text{D-37})$$

$$r_o = -p / \beta = -69.8071 \text{ lb/in} \quad (\text{D-38})$$

The stresses due to these reactions are:

	<u>At OD</u>	<u>At ID</u>
σ_ℓ	-3,516	3,516
σ_h	-3,727	3,305

(3) Stress Summary - Duct Inlet/Outlet Pipes

<u>At OD</u>	σ_ℓ	σ_h
Primary Pressure	968	1,936
Secondary Bending	-3,516	-3,727
Total	-2,548	-1,791

<u>At ID</u>	σ_ℓ	σ_h
Primary Pressure	968	1,936
Secondary Bending	3,516	3,305
Total	4,484	5,241

These stress values are within acceptable limits.

2. Frame and Heat Exchanger

The maximum stress values used in this section are, based on 900°F

<u>Material</u>	<u>σ_{max}</u>	<u>σ_y (.2%)</u>	<u>Reference</u>
Inconel	14,900	69,200	14 & 18
Hastelloy B	16,600	39,300	16 & 17

الف) فشار درونی

ساختمان پمپ با گاز ساکن تا فشار ۶-۹ **psi** در دمای اتاق پر میشود. در حین فعالیت پمپ، این

گاز تا ۹۰۰ درجه فارنهایت گرما داده میشود. که در نهایت فشار زیر بدست می آید:

$$P_O = P_R \frac{T_O}{T_R} = 9 \frac{(900 + 460)}{((0 + 460))} \quad (D-39)$$

$$P_o = 23.2 \text{ psia}$$

چون این پمپ برای کار در خلا طراحی شد فشار مورد نظر طراحی چنین خواهد بود:

$$P = 25 \text{ psi}$$

b. Outer shell –Connection End-Inconel

$$\sigma_\phi = \frac{PR}{2t} = \frac{25 \times 5.3125}{2 \times .125} = 531 \quad (\text{D-40})$$

$$\sigma_h = 2\sigma_\phi = 1062 \quad (\text{D-41})$$

(2) Reaction at End shield

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{R^2 t^2}} = 1.5774 \quad (\text{D-42})$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{D-43})$$

$$D_1 = 34,341, D_2 = 4.293$$

$$(\text{D-44}) M_o = \frac{\left[\frac{PR^3 \lambda^2 D_2}{4D_1(1+\nu)} + \frac{2PR^2 \lambda^3 Et_1 D_2}{Et_2(1-1/2\nu)[Et_1 + 2RD_2 \lambda^3 (1-\nu)]} \right]}{\left[2\lambda + \frac{2R\lambda^2 D_2}{D_1(1+\nu)} - \frac{\lambda Et_1}{Et_1 + 2D_2 \lambda^3 R(1-\nu)} \right]}$$

Substituting known values

$$M_o = 56.201 \text{ in} - \text{lb} / \text{in}$$

$$V_o = M_o \left(2V + \frac{2R\lambda^2 D_2}{D_1(1+\nu)} \right) - \frac{PR^3 \lambda^2 D_2}{4D_1(1+\nu)} \quad (\text{D-45})$$

$$V_o = 95.9681 \text{ lb} / \text{in}$$

Moment

$$\sigma_\phi = \frac{-6M_o}{t^2} = -21,581 \quad (\text{D-46})$$

$$\sigma_h = \frac{2M_o \lambda}{2 \times .06} = 1,834 \text{ psi} \quad (\text{D-47})$$

Force

$$\sigma_\phi = \frac{1.932V_o}{\lambda t^2} = 7,523 \quad (\text{D-48})$$

$$\sigma_h = \frac{-2V_o \lambda R}{t} = -12,867 \quad (D-49)$$

۲- واکنش در اتصال **Hastelloy B**

فشار گرمایی در اتصال اینکونل و **Hastelloy B** با کمک ضریب های متفاوت گسترش گرمایی ایجاد میشود. این تفاوتها چنین خواهد بود:

$$\Delta\sigma = \Delta TR(\alpha_r - \alpha_H) \quad (D-50)$$

$$\Delta\sigma = 830 \times 5.3125(8.2 - 6.6)10^{-6}$$

$$\Delta\sigma = 7.055 \times 10^{-3} \text{ inch}$$

هر کدام از این استوانهها بخشی از گسترش را متناسب با مدل خاصیت ارتجاعی شان می شکنند. بنابراین:

$$\sigma_I = \left(\frac{24}{24 + 24.8} \right) 7.055 \times 10^{-3} = 3.4696 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_H = 3.5854 \times 10^{-3}$$

$$M_o = 2\lambda^2 D\sigma = 73.825 \text{ in} - 1b / \text{in} \quad (D-51)$$

$$V_o = 2\lambda M_o = -231.551b / \text{in} \quad (D-52)$$

The resultant stresses are:

Moment

$$\sigma_\phi = 6M_o / t^2 = -28,373 \quad (D-53)$$

$$\sigma_h = 2M_o \lambda^2 R / t = 15,551 \quad (D-54)$$

Force

$$\sigma_\phi = \frac{1.932V_o}{\lambda t^2} = -18,130 \quad (D-55)$$

$$\sigma_h = 2V_o \lambda R / t = +31,046 \quad (D-56)$$

(4) Stress Summary - Outer Shell - Connection End - Inconel

At End Shield

	σ_{ℓ}	σ_h
Primary Pressure	531	1,062
Secondary Moment	-21,581	11,886
Secondary Force	<u>7,523</u>	<u>-12,867</u>
Total	-13,527	81

At Hastelloy B

	σ_{ℓ}	σ_h
Primary Pressure	531	1,062
Thermal Moment	-28,373	15,551
Thermal Force	<u>-18,150</u>	<u>31,046</u>
Total	-45,992	47,659

فشار بالای اتصال **Hastelloy B** فقط یک فشار گرمایی است که اینکونل بر اساس ارزیابی فرسودگی در حدود

۲۰۰۰ چرخه این بزرگی را تحمل میکند.

c. Outer Shell - Hastelloy B

(1) Primary Pressure Stress

From Equations (D-40) and (D-41):

$$\sigma_{\phi} = 531 \text{ psi}$$

$$\sigma_h = 1,062 \text{ psi}$$

- واکنش در اتصال اینکونل

نیرو و گشتاور برابر و در خلاف جهت با گشتاور و نیروی قشر اینکونل می‌باشند.

از آنجائیکه ضخامت ماده و نسبت پیوستن یکسان است، فشار مساوی و مخالف خواهد بود:

$$M_o = 73.825$$

$$V_o = 231.55$$

Since the material thicknesses and Poisson's ratios are the same, the stresses will be equal, but opposite:

Moment

$$\sigma_{\phi} = 28,373$$

$$\sigma_h = -15,551$$

Force

$$\sigma_{\phi} = 18,150$$

$$\sigma_h = -31,046$$

(3) Reaction at Heat Exchanger

For conservatism, the heat exchanger will be treated as fixed.

Thus,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{(1-\nu^2)}{R^2 t^2}} = 1.5774 \quad (D-57)$$

$$M_o = P/2\beta^2 = 5.0239 \quad (D-58)$$

$$V_o = P/\beta = -15.849 \quad (D-59)$$

The resultant stresses are:

$$\sigma_t = \frac{6(1-\nu^2)}{\beta^2 t^2 R} \left[\frac{V_o}{p} + M_o \right] \pm V\sigma_{\phi} \quad (D-60)$$

$$\sigma_{\phi} = \pm 6M_o/t^2 \quad (D-61)$$

Substituting known quantities:

	<u>At OD</u>	<u>At ID</u>
σ_{ℓ}	-1,929	1,929
σ_h	-2,062	1,796

(4) Stress Summary - Outer Shell - Hastelloy B

At Inconel

	σ_{ℓ}	σ_h
Primary Pressure	531	1,062
Thermal Moment	28,373	-15,551
Thermal Force	18,150	-31,046
Total	47,053	45,535

At Heat Exchanger

	σ_{ℓ}	σ_h
Primary Pressure	531	1,062
Secondary Bending	1,929	1,796
Total - ID	2,460	2,858

These stress values are within acceptable limits.

مقادیر فشار برای صفحه مدور، لبه های حمایت شده توسط بار فشار یکسان بر کل سطح که در مرجع

۱۰ ارائه شده عبارتند از:

$$\sigma_r = \frac{-3pr_o^2}{8mt^2} \left[(3m+1) \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right) \right] \quad (D-62)$$

And

$$\sigma_t = \frac{-3pr_o^2}{8mt^2} \left[(3m+1) - (m+3) \frac{r^2}{r_o^2} \right] \quad (D-63)$$

At the plate center, the stresses are a maximum, $r = 0$

$$\sigma_r = \sigma_t = -13,970 \text{ psi}$$

At the plate OD, $r = r_o$

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_t = -5,927 \text{ psi}$$

(2) End Reaction

From before:

$$M_o = 56.201$$

$$V_o = 95.968$$

The resultant stresses are

Moment

$$\sigma_r = \sigma_t = 6M / t^2 = -5,395$$

Force

$$\sigma_t = 0$$

$$\sigma_r = V_o / t = 384$$

(3) Stress Summary - End Shield - Connection End - Inconel

At ID

	σ_r	σ_t
Primary Pressure	-13,970	-13,970
Secondary Moment	- 5,395	- 5,395
Secondary Force	<u>384</u>	<u>0</u>
Total	-18,982	-19,365

At OD

	σ_r	σ_t
Primary Pressure	0	- 5,927
Secondary Moment	- 5,395	- 5,395
Secondary Force	<u>384</u>	<u>0</u>
Total	- 5,011	-11,322

These stress values are within acceptable limits.

e. Outer Shell - Opposite Connection End

(1) Primary Pressure Stress

$$\sigma_\phi = PR/2t = \frac{25 \times 5.3125}{2 \times .125} = 531 \quad (D-64)$$

$$\sigma_h = 2\sigma_\phi = 1,062 \quad (D-65)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{R^2 t^2}} = 1.5774 \quad (D-66)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (D-67)$$

$$D_1 115,900, D_2 = 4,293$$

Using the same type analysis as before:

$$M_o = 32.149$$

$$V_o = 59.210$$

The resultant stresses are:

	<u>Moment</u>	<u>Force</u>
σ_λ	= 12,345	4,641
σ_h	= 6,799	-7,939

(3) Reaction at Hastelloy B Junction

These stresses will be identical with those at the connection end.

(4) Stress Summary - Outer Shell - Opposite Connection End

	σ_{ℓ}	σ_h
Primary Pressure	531	1,062
Secondary Moment	-12,345	6,799
Secondary Force	4,641	-7,939
Total	- 7,173	- 77

These stress values are within acceptable limits.

f. End Shield - Opposite Connection End

(1) Primary Pressure Stress

From Reference 14 the maximum stress is:

$$\sigma_{\max} = \sigma_t = \frac{-3p}{4mt^2(r_o^2 - r_i^2)} \left[r_o^2(3m+1) + r_i^4(m-1) - 4mr_o^2r_i^2 - 4(m+1)r_o^2r_i^2 \phi n r_o / r_i \right] (D-68)$$

Substituting known values:

$$\sigma_{\max} = -12,260 \text{ psi}$$

(2) End Reactions

These reductions are:

$$M_o = 32,149$$

$$V_o = 59.21$$

From 2.2, for moment

$$\sigma_r = \frac{6M_o r_o^2}{t^2(r_o^2 - r_i^2)} \left[1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right] \quad (D-69)$$

$$\sigma_t = \frac{6M_o r_o^2}{t^2(r_o^2 - r_i^2)} \left[1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right] \quad (D-70)$$

Substituting known quantities:

At $r = r_o$

$$\sigma_r = 1,375$$

$$\sigma_t = 1,929$$

At $r = r_i$

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_t = 3,304$$

Force

$$\sigma_r = V_o/t = 158$$

$$\sigma_t = 0$$

(3) Stress Summary - End Shield - Opposite Connection End

At $r = r_o$

	σ_r	σ_t
Primary Pressure	-12,260	-12,260
Secondary Moment	1,375	1,929
Secondary Force	<u>158</u>	<u>0</u>
Total	-10,727	-10,331

At $r = r_i$

	σ_r	σ_t
Primary Pressure	-12,260	-12,260
Secondary Moment	0	3,304
Secondary Force	<u>158</u>	<u>0</u>
Total	-12,102	- 8,956

These stresses are within acceptable limits.

مبدل گرما

۱- گسترش گرمای تفاضلی بین مبدل گرما و محل اتصال تثبیت کننده

با در نظر گرفتن دمایی معادل ۶۵۰ درجه فارنهایت گسترش تفاضلی چنین خواهد بود:

Assuming a ΔT Of 650°F, the differential expansion is:

$$\Delta\sigma = R\Delta T(\alpha_H - \sigma_p) \quad (D-71)$$

$$\Delta\sigma = 5.3125 \times 650(6.5 - 5.95) \times 10^{-6} = 1.9 \times 10^{-3} \text{ in}$$

استرس مبنی بر گسترش دمایی تفاضلی

این فشارها باید در دو شرایط ارزیابی شوند: در دمای اتاق یا زمانی که دستگاه خاموش است و هنگام کار کردن دستگاه. تحت این دو شرط بار گذاری مبدل گرما متفاوت خواهد بود.

در دمای اتاق بار گذاری اصلی با دخالت میزان عقب کشیدگی ایجاد می شود. علاوه بر این، فشار خارجی معادل ۷ تا ۸ **psi** می باشد. چون این فشار در جهت مخالف فشار ناشی از عقب کشیدن متناسب می باشد آن را نادیده می گیریم.

$$\sigma = \frac{R}{E}(2 - \nu)\sigma_\phi \quad (D-72)$$

Solving for σ_ϕ

$$\sigma_\phi = 15,074 \text{ psi}$$

$$\sigma_h = 2\sigma_\phi = 30,148$$

در زمان فعالیت، فشار ناشی از عقب کشیدن متناسب به خاطر گسترش گرمایی بیشتر مبدل گرما کاهش می یابد.

۳- خلاصه وضعیت فشار - مبدل گرما

اثر مبدل گرما ممکن است هنگام نصب آن نیز ایجاد شود اما تحت این شرایط فشار از بین می رود. هر نوع فشار محتمل شده بر کارایی پمپ اثر نخواهد گذاشت. بنابراین این فشارها قابل قبولند.

ث) پوشش مبدل گرما

با در نظر گرفتن عقب کشیدن متناسب

1- عقب کشیدن متناسب

با در نظر گرفتن عقب کشیدن متناسب به میزان 2×10 اینچ

$$\sigma_{\phi} = E\sigma / R(2 - \nu) = 6,030 \text{ psi} \quad (\text{D-73})$$

$$\sigma_h = 12,060 \text{ psi}$$

(2) Internal Pressure

$$\sigma_{\phi} = PR / 2t = 544 \quad (\text{D-74})$$

$$\sigma_h = 2\sigma_{\phi} = 1,088 \quad (\text{D-75})$$

(3) End Reactions

Using the method of Reference 12:

$$\beta = 1.559$$

$$M_O = 5.142$$

$$V_O = -16.034$$

The resulting stresses are:

	<u>At OD</u>	<u>At ID</u>
σ_{ℓ}	-1,975	1,975
σ_h	-2,110	1,839

(4) Stress Summary - Heat Exchanger Wrapper

At ID

	σ_{ℓ}	σ_h
Primary Pressure	544	1,088
Secondary Bending	<u>1,975</u>	<u>1,938</u>
Total	2,518	2,926

At OD

	σ_{ℓ}	σ_h
Primary Pressure	544	1,088
Secondary Bending	<u>-1,975</u>	<u>-2,110</u>
Total	-1,431	-1,023

These stress values are within acceptable limits.

E. Design Data and Physical Properties

(References 1-6, 15, 16, 18, 19 & 20)

	900°F	1000°F	1300°F
1. Potassium Properties			
a. electrical resistivity, ($\mu\Omega$ in)	16.9	18.9	26.3
b. density, (lb/ft ³)	45.4	44.5	42.1
c. specific heat, (Btu/lb°F)	0.182	0.181	0.184
d. thermal conductivity, (watts/°F in)	0.533	0.513	0.455
e. viscosity, (lb/hr ft)	0.45	0.41	0.335
2. Duct Properties - T-111 alloy			
a. electrical resistivity ($\mu\Omega$ in)	17.1	17.9	19.7
b. density (lb/in ³)	0.6	0.6	0.6
c. thermal conductivity (w/°F in)	0.9	0.9	0.9
d. thermal coefficient of expansion (in/in °F) (from room temperature)	4.1×10^{-6}	4.2×10^{-6}	4.3×10^{-6}
3. Duct Properties - 316 stainless steel			
a. electrical resistivity ($\mu\Omega$ in)	41.2	42.6	47.1
b. density (lb/in ³)	0.28	0.28	0.28
c. thermal conductivity (w/°F in)	0.306	0.317	0.35
d. thermal coefficient of expansion (in/in°F) (from room temperature)	9.3×10^{-6}	9.4×10^{-6}	9.8×10^{-6}

4. Winding Properties

a. effective electrical resistivity of conductor @ 880°F (Ni-clad Ag)	2.09 $\mu\Omega$ in
b. density of conductor	0.367 lb/in ³
c. effective thermal conductivity of conductor @ 880°F	8.15 w/°C in
d. effective thermal resistivity of electrical insulation (ceramic and gas)	75 °C in/w

5. Magnetic Material Properties (Hiperco 27)

a. density	0.285 lb/in ³
b. thermal resistivity	0.875 °C in/watt
c. core loss factor at 60 cps; .025" thick lamination	5 watts/lb
d. thermal coefficient of expansion (77°-800°F)	5.96 x 10 ⁻⁶ in/in °F

6. Other Design Data and Properties

a. density of Inconel	0.31 lb/in ³
b. density of Hastelloy B	0.33 lb/in ³
c. electrical resistivity of Inconel can @ 900°F	41 $\mu\Omega$ in
d. thermal resistivity of foil thermal insulation	200°C in/watt
e. thermal coefficient of expansion of Hastelloy B (32°-600°F)	6.4 in/in °F
f. thermal coefficient of expansion of Inconel (32°-600°F)	7.5 x 10 ⁻⁶ in/in°F

7. NaK Properties (as coolant)

a. density @ 700°F	49.4 lb/ft ³
b. specific heat @ 700 °F	0.21 Btu/lb °F
c. viscosity @ 700 °F	0.53 lb/hr ft

فصل دوم

معادلات حاکم

۱-۲: شرایط مرزی و شرایط اولیه

بطور کلی مرزهای فیزیکی که در آن شرایط مرزی کلی مورد نیاز است و یا مقادیر متغیر وابسته به عنوان بخشی از جوابها باید معلوم شوند به پنج دسته تقسیم می‌شوند، این پنج دسته عبارتند از: سطح بدنه، فواصل بسیار دور، خط تقارن (یا سطح تقارن در حالت سه بعدی)، جریان ورودی و جریان خروجی. تشخیص و تبیین شرایط مرزی، فیزیکی یا عددی در امتداد مرزهای مختلف بطور کلی مشکل است. تعیین شرایط مرزی برای معادلات ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر نیز از این قاعده جدا نیست.

البته شرایط فیزیکی معمولاً نتایجی را در مورد شرایط مرزی می‌دهد که اعمال برخی از آنها نسبتاً ساده است. به عنوان مثال بر روی یک سطح جامد از شرط عدم لغزشی برای تعیین شرط مرزی سرعت استفاده می‌کنیم. در هر حال تعیین شرط مرزی برای مؤلفه‌های سرعت در ورودی، خروجی و فواصل دور معمولاً سر راست نیست. بدیهی است که روند تعیین شرایط مرزی بطور گسترده‌ای تابع شرایط فیزیکی و قلمرو مسأله مورد نظر است. مثلاً اگر مرز دور دست را واقعاً دور از بدنه که تمام فعالیت‌های جریان در حوالی آن روی می‌دهد در نظر بگیریم، شرایط جریان آزاد را می‌توان برای آن مرز به کار برد. در حالیکه اگر مرز فواصل دور را نزدیک به سطح بدنه که فعالیتها در آن انجام می‌شوند، در نظر بگیریم، بسته به علامت مؤلفه‌های عمودی سرعت آن را به عنوان مرز ورودی یا خروجی در نظر می‌گیریم.

در صورتیکه شرایط مرزی ورودی و خروجی را اعمال کنیم، دو عامل عمده را باید در نظر بگیریم. اولاً، سرعت و یا فشار در خروجی مجهولند و با پیشروی حل عمومی باید آنها را مشخص کرد. ثانیاً، به علت تأثیر جوابهای داخل شبکه حل در ورودی یا فواصل دور (اگر آنها را هم ورودی تلقی کنیم)، ممکن است که تجدید مقادیر مرزی مورد نیاز باشد.

البته این عوامل به علت پدیده فیزیکی انتشار علائم است یعنی در جریان تراکم‌ناپذیر اغتشاشها در تمام جهتها منتشر می‌شوند. بنابراین تعیین شرایط مرزی بستگی زیادی به شرایط مسأله مورد مطالعه

دارد. یعنی به چگونگی موقعیت مرزهای ورودی، خروجی و مرزهای دور دست نسبت به محللهایی که در آنها تغییرات خواص سیال روی می دهند، بستگی دارد.

با توجه به هندسه مسیر جریان پمپاژ بطور کلی سه دسته شرط مرزی وجود دارد این شرایط مرزی عبارتند از: مرز دیواره، مرز ورودی و مرز خروجی (در حالت کلی شرط مرزی تقارن صادق نیست). همچنین با وجود اینکه جریان خنک کاری داخلی یک جریان پایدار است ولی در اکثر روشهای CFD مسائل پایدار به شکل شبه گذرا حل می شوند به همین دلیل معادلات نیاز به شرط اولیه نیز دارند. نحوه تعیین شرایط مرزی و شرایط اولیه در بخشهای بعدی توضیح داده شده اند.

۲-۱-۱: شرایط مرزی در دیواره های جامد

با توجه به معادلات حاکم در می یابیم که در این معادلات، مؤلفه های سرعت در دستگاه مختصات نسبی (دستگاه مختصاتی که به پره متصل است و همراه آن دوران می کند) تعریف شده اند بنابراین به سادگی می توان بر روی دیواره های جامد، شرط عدم لغزش را برای تمامی مؤلفه های سرعت اعمال کرد ($u=v=w=0$).

اعمال شرط مرزی برای فشار اندکی دشوار است زیرا معمولاً مقدار فشار روی مرز معلوم نیست و به عنوان بخشی از حل کلی باید تعیین شود. بطور کلی، شرط مرزی نیومن برای فشار اعمال می شود اگر بردار عمود بر سطح در جهت X باشد، شرط مرزی فشار روی مرز به صورت زیر خواهد بود [۵]:

$$(1-2) \frac{\partial P^*}{\partial x^*} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}}$$

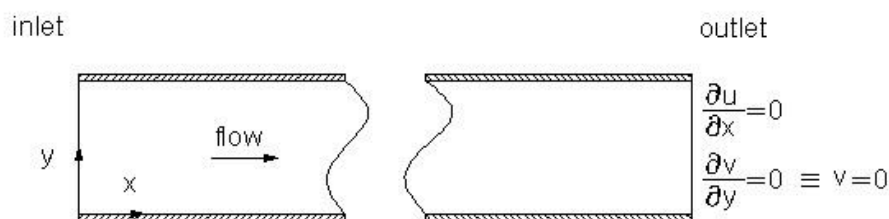
هرچند اعمال شرط مرزی برای فشار نسبتاً دشوار است ولی روشهای عددی ویژه ای ابداع شده است که به معلوم بودن شرط مرزی فشار نیازی ندارند. به عنوان مثال فرمولبندی به روش علامتگذاری و سلول در یک شبکه جابجا شده، روش مناسبی از این نوع است که در این پروژه از این روش استفاده شده است.

۲-۱-۲: شرایط مرزی در ورودی

در ورود شرایط مرزی معمولاً بصورت شرایط دیریکله است. برای سرعت، اعمال شرط مرزی در ورود بسیار ساده است. در این تحقیق در ورود، مؤلفه سرعت محوری برابر مقدار ثابت U لحاظ شده و سایر مؤلفه‌های سرعت برابر صفر در نظر گرفته شده‌اند. ($u=U, v=w=0$)
در روش CFD استفاده شده در این تحقیق، نیازی به اعمال شرط مرزی فشار در ورودی نیست.

۳-۱-۲: شرایط مرزی در خروجی

بطور کلی پارامترهای جریان در مرز خروجی معلوم نیستند. بنابراین در اغلب مسائل CFD از شرط نیومن همگن (گرادیان صفر) برای پارامترهای جریان در خروجی استفاده می‌شود.
برای سرعت محوری می‌توان به سادگی شرط مرزی نیومن را اعمال کرد ($\frac{\partial u}{\partial x} = 0$). برای جریان دو بعدی با فرض توسعه یافتگی سرعت ($\frac{\partial u}{\partial x} = 0$) از معادله پیوستگی شرط مرزی v بصورت $\frac{\partial v}{\partial y} = 0$ به دست می‌آید. با توجه به صفر بودن سرعت v در $y=0$ (روی مرز جامد) به سادگی می‌توان در خروجی v را برابر صفر در نظر گرفت.



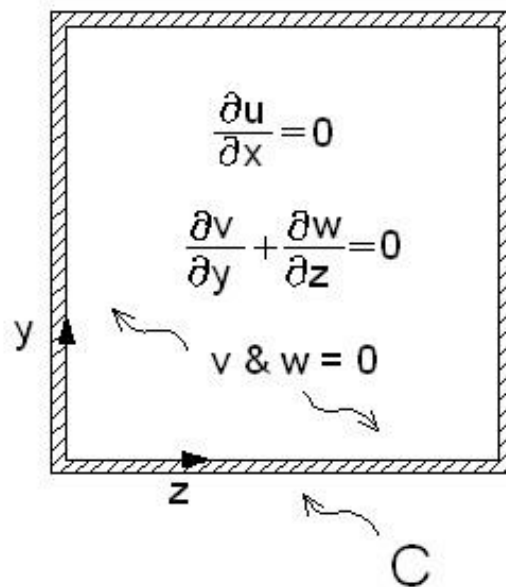
شکل ۱-۲: مرز خروجی در حالت دوبعدی

برای جریان سه بعدی نیز می‌توان به نتیجه مشابهی دست یافت. در شکل ۲-۱۳ مقطع خروجی جریان نشان داده شده است با فرض توسعه یافتگی سرعت در خروجی ($\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} = 0$) از معادله پیوستگی، معادله دیفرانسیل مشتقات جزئی با شرایط مرزی زیر بدست می‌آید:

$$(2-2-الف) \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$(2-2-ب) \text{at } C: v \& w = 0$$

که C معرف مرز مقطع است. مطابق یکی از قضایای حساب دیفرانسیل و انتگرال هر معادله متعلق به یک دستگاه معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی که همگن بوده و دارای شرایط مرزی همگن است، جوابهایش صفر است یعنی در تمام مقطع خروجی مؤلفه‌های سرعت v و w صفر هستند.



شکل ۲-۲: مرز خروجی در حالت سه بعدی

برای فشار در ناحیه خروجی هم می‌توان شرط مرزی نیومن همگن ($\frac{\partial P}{\partial x} = 0$) و هم شرط خروج جریان به فضای آزاد ($P = P_\infty$) را اعمال کرد. بسته به نوع مسأله می‌توان یکی از این شرایط را انتخاب نمود. (در روش CFD استفاده شده در این تحقیق، نیازی به اعمال شرط مرزی فشار در خروجی نیست).

۲-۱-۴: شرایط اولیه

از نظر فیزیکی، هر مسأله را می‌توان به حالت‌های دائم و یا غیردائم دسته‌بندی کرد. روشن است که در مسائل جریان دائم، جمله‌های تابع زمانی از معادلات حاکم حذف می‌شوند. در هر حال بنا به ملاحظات عددی، معادلات ناویراستوکس جریان دائم را در حالت کلی از یک روش شبه‌گذرا حل می‌کنیم. در این روش با افزودن یک جمله غیرفیزیکی تابع زمان به معادله پیوستگی، دستگاه معادلات غیردائمی تشکیل می‌شود و به دنبال آن شکل غیردائم معادلات را به صورت عددی حل می‌کنیم تا به جواب حالت دائم برسیم. روشن است که در اینجا زمان ارزش فیزیکی ندارد و فقط نقش تکرار را ایفا می‌کند. با توجه به اینکه معادلات حاکم به صورت شبه‌گذرا حل می‌شوند لذا نیاز به شرایط اولیه دارند. شرایط اولیه بایستی دارای یک خاصیت اساسی باشند. این خاصیت اساسی، این است که شرایط اولیه بایستی در معادلات حاکم صدق کنند (یا حداقل با آن سازگار باشند).

برای اکثر سیستم‌هایی که نیروهای حجمی بر آنها اثر ندارند می‌توان شرط اولیه سکون را لحاظ کرد. یعنی در تمام میدان جریان، مؤلفه‌های سرعت و فشار را برابر صفر فرض کرد. ولی برای پمپاژ این فرض با معادلات ناویراستوکس سازگار نیست. در این حالت پیشنهاد می‌شود که برای بدست آوردن شرط اولیه، میدان جریان بصورت یک جریان، یک بعدی، تراکم‌ناپذیر و غیرلزج حل شود و نتایج در شرط اولیه لحاظ شود.

بدین منظور می‌توان تمامی مؤلفه‌های سرعت را برابر صفر فرض کرد ولی فشار را با نیروی مغناطیسی بالانس نمود و در تمامی میدان جریان شرط اولیه زیر را برای فشار لحاظ کرد:

$$P = Fx \quad (2-3)$$

۲-۲: الگوریتم‌های تحلیل مسائل پایدار

همانگونه که بیان شد، تحلیل عددی مسائل جریان پایدار بصورت شبه‌گذرا صورت می‌گیرد و پس از انتخاب یک شرط اولیه مناسب، معادلات حاکم در حالت غیردائم حل می‌شوند تا جوابها به سمت جوابهای، جریان پایدار همگرا شوند.

پیش از پرداختن به روشهای عددی، لازم است که به مشکلی که در رابطه با حل معادلات ناپویراستوکس غیردائم وجود دارد، اشاره کنیم. با توجه به معادلات حاکم (معادلات ۲-۳ تا ۲-۷) مشاهده می‌کنیم که معادلات مومنتوم و معادله انرژی دارای ترم تابع زمان برای مؤلفه‌های سرعت و دما هستند. بنابراین پارامترهای u, v, w و T بصورت غیردائم موجود می‌باشند ولی متأسفانه فشار در این معادلات دارای ترم تابع زمان نیست. برای غلبه بر این مشکل باید تغییراتی در معادله پیوستگی ایجاد کنیم تا فشار نیز قابل محاسبه شود.

برای انجام این کار، دو روش پیشنهاد شده است یکی از روشها افزودن جمله فشار تابع زمان به معادله پیوستگی است که به آن روش تراکم‌پذیر مصنوعی^۱ می‌گویند [۱۱] و روش دیگر ایجاد تغییراتی در معادلات مومنتوم و پیوستگی است که حاصل آن معادله پواسون برای فشار است.

۲-۲-۱: روش تراکم‌پذیری مصنوعی

کاربرد این روش برای معادلات ناپویراستوکس تراکم‌ناپذیر بوده و از سوی چورین^۲ [۱۱] معرفی شده است. در این روش، معادله پیوستگی با درج یک عبارت تابع زمان برای فشار به فرم زیر در می‌آید:

$$(۴-۲) \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{\tau} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

در رابطه فوق τ ، تراکم‌پذیری مصنوعی سیال است. با توجه به معادله حالت، تراکم‌پذیری را به صورت شبه سرعت صوت و جرم مخصوص مصنوعی را با استفاده از روابط زیر تعریف می‌کنیم:

$$(۱-۴-۲) \tau = \frac{1}{a^2}$$

$$(۲-۴-۲) a^2 = \frac{P}{\rho}$$

در روابط فوق همه متغیرها به صورت بی‌بعد تعریف شده‌اند.

با توجه به روابط معادله پیوستگی به فرم نهایی زیر نوشته می‌شود:

$$(۵-۲) \frac{\partial P}{\partial t} + a^2 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

^۱. Artificial Compressibility

^۲. Chorin

گفتنی است که در حالت حدی، وقتی که به حالت دائم می‌رسیم ($t \rightarrow \infty$) معادله ۳-۳ به صورت

$$\text{معادله پیوستگی تراکم‌ناپذیر ساده در می‌آید. (چون در حالت دائم } \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \text{ برابر صفر شده است)}$$

۲-۲-۲: روش معادله پواسون برای فشار

یکی دیگر از روشهای CFD برای ایجاد ارتباط بین معادلات پیوستگی و مومنوم، به کارگیری معادله پواسون برای فشار است [۵]. هرچند در این تحقیق از روش تراکم‌پذیری مصنوعی استفاده شده ولی بیان این روش خالی از لطف نیست. در این بخش، این روش برای جریانهای دوبعدی بررسی شده است. فرم بقایی معادلات ناویراستوکس در حالت بی‌بعد و در جهات x و y بصورت زیر است. برای سادگی علامت * از بالای معادلات حذف شده است.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}^2) + \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{u}\mathbf{v}) = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (۲-۶-الف)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{u}\mathbf{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mathbf{v}^2) + \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (۲-۶-ب)$$

مشتق بگیریم و نتیجه را با هم جمع کنیم، داریم y و x اگر از معادلات فوق به ترتیب نسبت به

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\mathbf{u}^2) + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}(\mathbf{u}\mathbf{v}) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\mathbf{v}^2) + \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial y^2} =$$

$$\frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial x}(\nabla^2 \mathbf{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nabla^2 \mathbf{v}) \right] \quad (۲-۷)$$

سمت راست معادله ۳-۵ بصورت زیر قابل ساده شدن است.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nabla^2 \mathbf{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nabla^2 \mathbf{v}) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} \right) \quad (۲-۸)$$

در نهایت معادله ۲-۸ به فرم زیر قابل ساده شدن است :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial y^2} = -\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\mathbf{u}^2) - 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}(\mathbf{u}\mathbf{v}) - \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\mathbf{v}^2) +$$

$$\frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} (\mathbf{D}) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\mathbf{D}) \right] \quad (9-2)$$

در رابطه فوق D ، اتساع $(\mathbf{D} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})$ است.

روشن است که در یک جریان تراکم‌ناپذیر، از معادله پیوستگی، عبارت D صفر است. ولی به دلایل عمده این عبارت را در معادله ۷-۳ برابر صفر قرار نمی‌دهیم. در واقع باید آنرا در معادله ۷-۳ نگه‌داریم تا از انباشته شدن خطا در طی عملیات تکرار و همچنین از ناپایداری غیرخطی جلوگیری کند.

۲-۳: نحوه تولید مش

در مسائلی که در آنها قوانین حاکم را به ترتیب حل می‌کنیم، بهتر است فرمولبندیهای تفاضل محدود را به صورتی بنویسیم که برای شبکه‌بندی موسوم به شبکه جابجا شده مناسب باشد. این روش، امکان به هم جفت شدن متغیرها را فراهم کرده و پایداری را بهبود می‌بخشد.

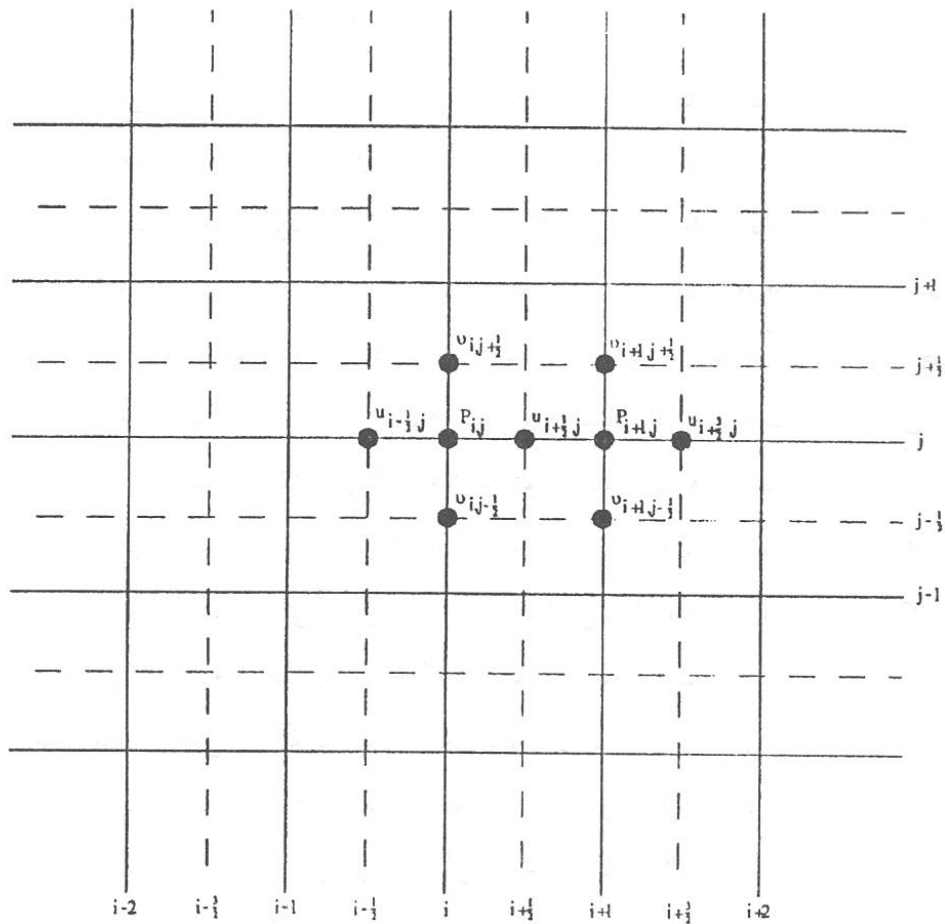
شبکه جابجا شده را به روشهای مختلفی می‌توان تولید کرد. مثلاً شبکه را می‌توان در امتداد یکی از خطوط مختصات به اندازه نصف فاصله دو نقطه و یا در امتداد قطر و به اندازه نصف قطر جابجا کرد.

در شکل ۲-۳ نمونه‌ای از شبکه جابجا شده نشان داده شده است (در حالت دو بعدی). با توجه به شکل، از آنجا که از دو شبکه منطبق بر هم استفاده می‌شود، آنها را شبکه‌های اولیه و ثانویه می‌نامیم. نقاط شبکه اولیه را با i و j که برای شبکه‌های استاندارد به کار می‌رود نشان می‌دهیم، در حالیکه شبکه ثانویه را با فواصل نصف مشخص می‌کنیم.

شبکه اولیه با خطوط پرو شبکه ثانویه با خطوط خط‌چین نشان داده شده است. مؤلفه‌های u و v سرعت و فشار P مجهولهای مسأله هستند. نمونه‌ای از تخصیص متغیرها به نقاط مختلف شبکه به صورت زیر است. فشار را در گره‌های شبکه اولیه تعریف می‌کنیم و مؤلفه‌های سرعت را روی سطوح شبکه ثانویه انتخاب می‌کنیم.

به عبارت دقیقتر، مؤلفه x سرعت (u) را در فاصله میانی بین دو گروه $(i + \frac{1}{2})$ و در جهت y مشابه به

شبکه اولیه (j) انتخاب می‌کنیم. مؤلفه y سرعت را نیز در گره‌های $i, j + \frac{1}{2}$ تعریف می‌کنیم.



شکل ۲-۳: نمونه شبکه جابجا شده و متغیرهای جریان

از آنجا که مرزها بر روی شبکه ثانویه تعریف می‌شوند و فشار بر روی شبکه اولیه تعریف شده و در

معادلات حاکم فاقد مشتق مرتبه دوم است، لذا نیازی به اعمال شرط مرزی برای فشار نیست.

در جدول زیر شماره گره‌های تخصیص یافته برای پارامترهای جریان در حالت سه بعدی آمده است:

پارامتر	جهت x	جهت y	جهت z
u	$i + \frac{1}{2}$	j	k
v	i	$j + \frac{1}{2}$	k
w	i	j	$k + \frac{1}{2}$
P	i	j	k

[۱۲] جدول ۱-۲: شماره گره های اختصاص یافته برای پارامترهای جریان در حالت سه بعدی

۴-۲: معادلات حاکم بر سیال الکترومغناطیس

بنابراین لازم است که معادلات حاکم، در این دستگامها بیان شوند. مطابق شکل ۴-۲ در ناحیه (۱)

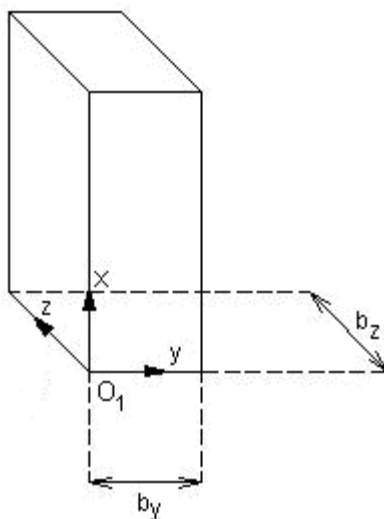
معادلات حاکم به فرم زیر هستند [۴]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (10-2)$$

$$\frac{Du}{Dt} = F + \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \quad (11-2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \quad (12-2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w \quad (13-2)$$



شکل ۲-۴: دستگاههای مختصات مطلق و نسبی در ناحیه اول

۲-۴-۱: نحوه گسسته کردن معادلات حاکم

فرمولبندی بسیار مناسب در شبکه جابجاشده برای گسسته کردن معادلات حاکم، روش علامتگذاری وسلول^۱ است که توسط هارلوولج^۲ [۱۲] ابداع شده است. در این روش، برای گسسته کردن معادلات حاکم از تقریب تفاضل محدود پیشرو مرتبه اول برای مشتق زمان و تقریب تفاضل محدود مرتبه دوم برای مشتقات مکان استفاده شده است. در این تحقیق معادلات بصورت صریح فرمولبندی شده‌اند.

۲-۴-۲: صورت گسسته معادلات حاکم در دستگاه مختصات کارتیزین

حال می‌توان براساس بخشهای ۲-۳ و ۳-۳ معادلات حاکم را گسسته کرد. برای بهبودی دقت بهتر است که معادلات ناویراستوکس را به فرم بقایی بنویسیم. فرم بقایی معادلات ناویراستوکس در حالت بی‌بعد بصورت زیر است. برای سادگی علامت * از بالای پارامترها حذف شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{Bmatrix} u^2 + P \\ uv \\ uw \end{Bmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{Bmatrix} uv \\ v^2 + P \\ vw \end{Bmatrix} + \frac{\partial}{\partial z} \begin{Bmatrix} uw \\ vw \\ w^2 + P \end{Bmatrix} =$$

¹. Marker and Cell Method

². Harlow & Welch

$$\frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} + F \quad (14-2)$$

صورت گسسته معادله پیوستگی در دستگاه مختصات کارتزین از قرار زیر است :

$$\begin{aligned} & \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} + a^2 \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1}}{\Delta x} \right) + \\ & a^2 \left(\frac{v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} - v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1}}{\Delta y} \right) + a^2 \left(\frac{w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} - w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (15-2)$$

مونتوم X: معادله

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta t} + \frac{P_{i+1,j,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta x} + \\ & \frac{(u^2)_{i+1,j,k}^n - (u^2)_{i,j,k}^n}{\Delta x} + \frac{(uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^n - (uv)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} + \\ & \frac{(uw)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^n - (uw)_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} = F + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + u_{i+\frac{3}{2},j,k}^n}{\Delta x^2} \right) + \\ & \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j-1,k}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + u_{i+\frac{1}{2},j+1,k}^n}{\Delta y^2} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k-1}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + u_{i+\frac{1}{2},j,k+1}^n}{\Delta z^2} \right) \end{aligned} \quad (16-2)$$

مونتوم Y: معادله

$$\begin{aligned} & \frac{v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} - v_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta t} + \frac{(uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^n - (uv)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta x} + \\ & \frac{(v^2)_{i,j+1,k}^n - (v^2)_{i,j,k}^n}{\Delta y} + \frac{P_{i,j+1,k}^n - P_{i,j,k}^n}{\Delta y} + \end{aligned}$$

$$\frac{(vw)^n_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - (vw)^n_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}}{\Delta z} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{v^n_{i-1,j+\frac{1}{2},k} - 2v^n_{i,j+\frac{1}{2},k} + v^n_{i+1,j+\frac{1}{2},k}}{\Delta x^2} \right) +$$

$$\frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{v^n_{i,j-\frac{1}{2},k} - 2v^n_{i,j+\frac{1}{2},k} + v^n_{i,j+\frac{3}{2},k}}{\Delta y^2} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{v^n_{i,j+\frac{1}{2},k-1} - 2v^n_{i,j+\frac{1}{2},k} + v^n_{i,j+\frac{1}{2},k+1}}{\Delta z^2} \right) \quad (17-2)$$

مومنتوم Z: معادله

$$\frac{w^{n+1}_{i,j,k+\frac{1}{2}} - w^n_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{(uw)^n_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} - (uw)^n_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta x} +$$

$$\frac{(uw)^n_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - (vw)^n_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \frac{(w^2)^n_{i,j,k+1} - (w^2)^n_{i,j,k}}{\Delta z} +$$

$$\frac{P^n_{i,j,k+1} - P^n_{i,j,k}}{\Delta z} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{w^n_{i-1,j,k+\frac{1}{2}} - 2w^n_{i,j,k+\frac{1}{2}} + w^n_{i+1,j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right) +$$

$$\frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{w^n_{i,j-1,k+\frac{1}{2}} - 2w^n_{i,j,k+\frac{1}{2}} + w^n_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{w^n_{i,j,k-\frac{1}{2}} - 2w^n_{i,j,k+\frac{1}{2}} + w^n_{i,j,k+\frac{3}{2}}}{\Delta z^2} \right) \quad (18-2)$$

در معادلات ۱۷-۲ تا ۱۸-۲، با توجه به نحوه استقرار پارامترها روی شبکه جابجا شده، لازم است که

برخی ترمهای معادلات به فرم زیر محاسبه شوند:

$$(u^2)_{i+1,j,k} = \frac{1}{4} (u_{i+\frac{3}{2},j,k} + u_{i+\frac{1}{2},j,k})^2 \quad (1-19-2)$$

$$(u^2)_{i,j,k} = \frac{1}{4} (u_{i+\frac{1}{2},j,k} + u_{i-\frac{1}{2},j,k})^2 \quad (2-19-2)$$

$$(v^2)_{i,j+1,k} = \frac{1}{4} (v_{i,j+\frac{3}{2},k} + v_{i,j+\frac{1}{2},k})^2 \quad (3-19-2)$$

$$(v^2)_{i,j,k} = \frac{1}{4} (v_{i,j+\frac{1}{2},k} + v_{i,j-\frac{1}{2},k})^2 \quad (4-19-2)$$

$$(uv)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} = \frac{1}{4} (u_{i+\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{1}{2},j+1,k}) (v_{i,j+\frac{1}{2},k} + v_{i+1,j+\frac{1}{2},k}) \quad (5-19-2)$$

$$(uv)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k} = \frac{1}{4}(u_{i+\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{1}{2},j-1,k})(v_{i,j-\frac{1}{2},k} + v_{i+1,j-\frac{1}{2},k}) \quad (6-19-2)$$

$$(uv)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k} = \frac{1}{4}(u_{i-\frac{1}{2},j,k} + u_{i-\frac{1}{2},j+1,k})(v_{i,j+\frac{1}{2},k} + v_{i-1,j+\frac{1}{2},k}) \quad (7-19-2)$$

$$(uw)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} = \frac{1}{4}(u_{i+\frac{1}{2},j,k} + u_{i+\frac{1}{2},j,k+1})(w_{i,j,k+\frac{1}{2}} + w_{i+1,j,k+\frac{1}{2}}) \quad (8-19-2)$$

$$(uw)_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}} = \frac{1}{4}(u_{i+\frac{1}{2},j,k-1} + u_{i+\frac{1}{2},j,k})(w_{i,j,k-\frac{1}{2}} + w_{i+1,j,k-\frac{1}{2}}) \quad (9-19-2)$$

$$(uw)_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}} = \frac{1}{4}(u_{i-\frac{1}{2},j,k} + u_{i-\frac{1}{2},j,k+1})(w_{i-1,j,k+\frac{1}{2}} + w_{i,j,k+\frac{1}{2}}) \quad (10-19-2)$$

$$(vw)_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} = \frac{1}{4}(v_{i,j+\frac{1}{2},k} + v_{i,j+\frac{1}{2},k+1})(w_{i,j,k+\frac{1}{2}} + w_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}) \quad (11-19-2)$$

$$(vw)_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}} = \frac{1}{4}(v_{i,j+\frac{1}{2},k-1} + v_{i,j+\frac{1}{2},k})(w_{i,j,k-\frac{1}{2}} + w_{i,j+1,k-\frac{1}{2}}) \quad (12-19-2)$$

$$(vw)_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} = \frac{1}{4}(v_{i,j-\frac{1}{2},k} + v_{i,j-\frac{1}{2},k+1})(w_{i,j-1,k+\frac{1}{2}} + w_{i,j,k+\frac{1}{2}}) \quad (13-19-2)$$

$$(w^2)_{i,j,k+1} = \frac{1}{4}(w_{i,j,k+\frac{1}{2}} + w_{i,j,k+\frac{3}{2}})^2 \quad (14-19-2)$$

$$(w^2)_{i,j,k} = \frac{1}{4}(w_{i,j,k-\frac{1}{2}} + w_{i,j,k+\frac{1}{2}})^2 \quad (15-19-2)$$

۵-۲: نحوه اعمال شرایط مرزی

به علت مشخص نبودن شرط مرزی فشار در بیشتر مسائل، استفاده از شبکه جابجا شده و فرمولبندی به روش علامتگذاری و سلول مفید است. بدین ترتیب که می‌توان شبکه ثانویه را بر روی مرزهای قلمرو که در آنها شرط مرزی سرعت و نه فشار، لازم است منطبق کرد.

در هر حال این فایده با ضرری نیز همراه است و آن ناشی از نیاز به مقادیری از سرعت در خارج قلمروست. این مقادیر را سرانجام با برونابی مقادیر داخل قلمرو و یا تقریب مشتقها در مرزها حساب می‌کنیم. برای اعمال شرایط مرزی، شبکه جابجا شده، شکل ۵-۲ را در حالت جریان دوبعدی در نظر می‌گیریم.

فرض میکنیم چون سطح جامد $\mathbf{i} = \frac{1}{2}$ و مرز ورودی را در امتداد $\mathbf{j} = \frac{1}{2}$ سطح جامد را در امتداد

فرض شده است، شرط عدم لغزش را میتوان به کار برد، در نتیجه :

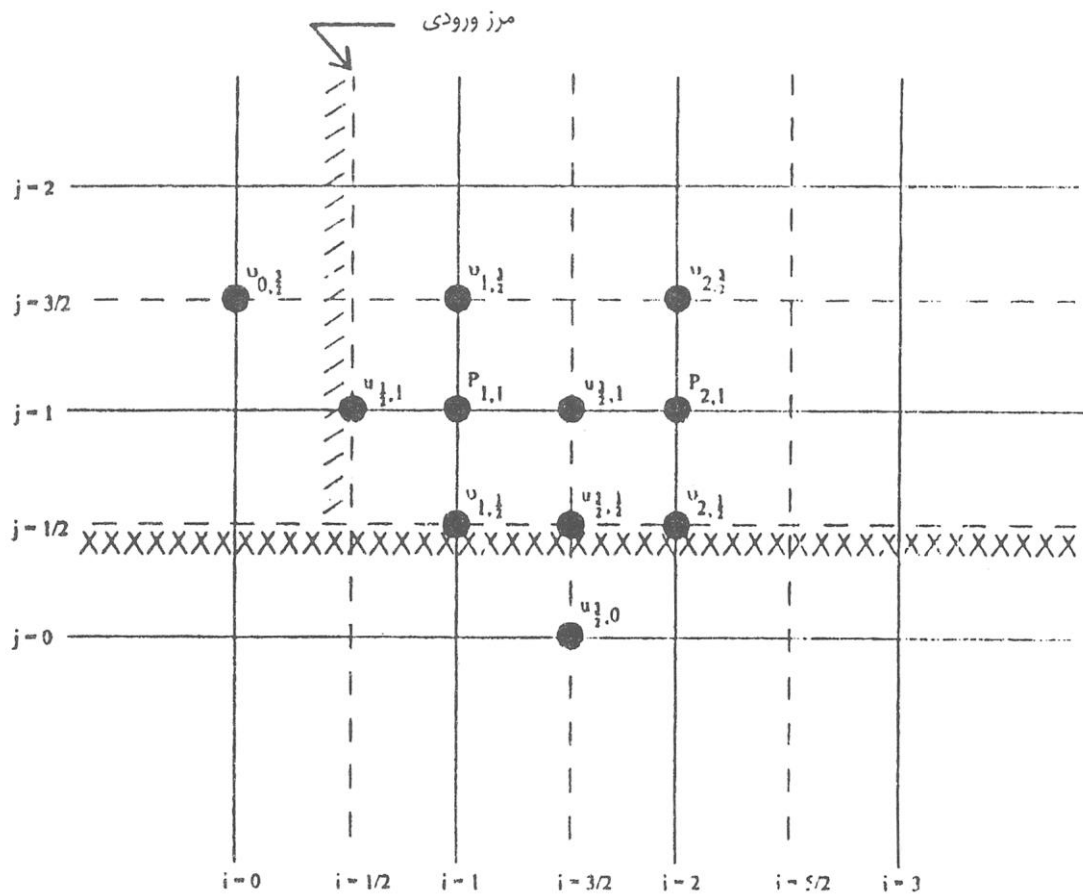
$$\mathbf{v}_{1, \frac{1}{2}} = \mathbf{v}_{2, \frac{1}{2}} = \dots = \mathbf{v}_{i, \frac{1}{2}} = 0$$

بصورت زیر تقریب زده میشود. $\mathbf{u}_{\frac{3}{2}, 0}$ است که از آن $\mathbf{u}_{\frac{3}{2}, 1} = 0$ به همین ترتیب

$$\mathbf{u}_{\frac{3}{2}, \frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}_{\frac{3}{2}, 0} + \mathbf{u}_{\frac{3}{2}, 1}) = 0$$

یا

$$\mathbf{u}_{\frac{3}{2}, 0} = -\mathbf{u}_{\frac{3}{2}, 1}$$



شکل ۲-۵: شرایط مرزی در یک شبکه جابجا شده

در مرز ورودی مؤلفه u سرعت مستقیماً مشخص می‌شود ($u_{\frac{1}{2},j} = U$) در حالیکه مؤلفه v سرعت را

با برون‌یابی چنین تقریب می‌زنیم :

$$v_{0,\frac{3}{2}} = 2v_{\frac{1}{2},\frac{3}{2}} - v_{1,\frac{3}{2}}$$

که $v_{\frac{1}{2},\frac{3}{2}}$ در شرط مرزی ورودی داده شده است.

فرض کنیم که گره‌های $i = m + \frac{1}{2}$ مرز خروجی باشند، در خروجی داریم :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \& \quad v = 0$$

بنابراین در این مرز داریم :

$$u_{m+\frac{1}{2},j} = u_{m-\frac{1}{2},j}$$

$$v_{m+1,j+\frac{1}{2}} = -v_{m-1,j+\frac{1}{2}}$$

با توجه به اینکه ترم فشار بر روی شبکه اولیه اعمال می‌شود و نیز به دلیل اینکه در معادلات حاکم ترم فشار فقط دارای مشتقات مرتبه اول نسبت به مکان است، دیگر نیازی به اعمال شرط مرزی برای فشار نیست.

۲-۶: نحوه اجرای روش علامتگذاری و سلول

برای حل CFD معادلات حاکم بایستی ابتدا مش را تولید کنیم و پس از تولید مش شرایط اولیه را اعمال کنیم (برای جریانهای دائم، شرایط اولیه بایستی با فیزیک مسأله سازگار باشند و شرایط مرزی را ارضا نمایند). سپس معادلات مومنتوم و پیوستگی را توامان حل می‌کنیم. با توجه به اینکه معادلات حاکم به شکل صریح گسسته شده‌اند کفایت در هر گام زمانی مقادیر جدید پارامترهای معادلات حاکم را از حل صریح جبری معادلات گسسته شده، بدست آوریم.

با توجه به نحوه گسسته شدن معادلات حاکم در می‌یابیم که در این روش ابتدا بایستی در هر گام از معادلات مومنتوم مقدار جدید مؤلفه‌های سرعت را بدست آوریم و سپس از معادله اصلاح شده پیوستگی، مقدار فشار جدید را تعیین کنیم و در هرگام تحلیل لازم است که شرایط مرزی را اعمال نماییم تا پاسخها به سمت پاسخهای حالت دائم همگرا شوند. همچنین برای ایجاد پایداری تحلیل لازم است که گام زمانی Δt ، گام مکانی (کوچکترین گام مکانی) Δx ، عدد رینولدز (Re) و سرعت صوت مجازی (a) را به نحوی انتخاب کنیم که پاسخها همگرا شوند. برای مثال در حالتیکه دوران وجود ندارد، برای جریان داخلی دوبعدی بایستی عوامل ذکر شده در نامساویهای زیر صدق کند.

$$\frac{1}{2}(u^2 + v^2)\Delta t \text{ Re} \leq 1 \quad (20-2)$$

$$\frac{4\Delta x}{\text{Re}\Delta x^2} \leq 1 \quad (21-2)$$

$$\frac{4\Delta t}{\text{Re}\Delta x^2} \left(\frac{1}{\text{Re}} + \frac{a^2\Delta t}{2} \right) \leq 1 \quad (22-2)$$

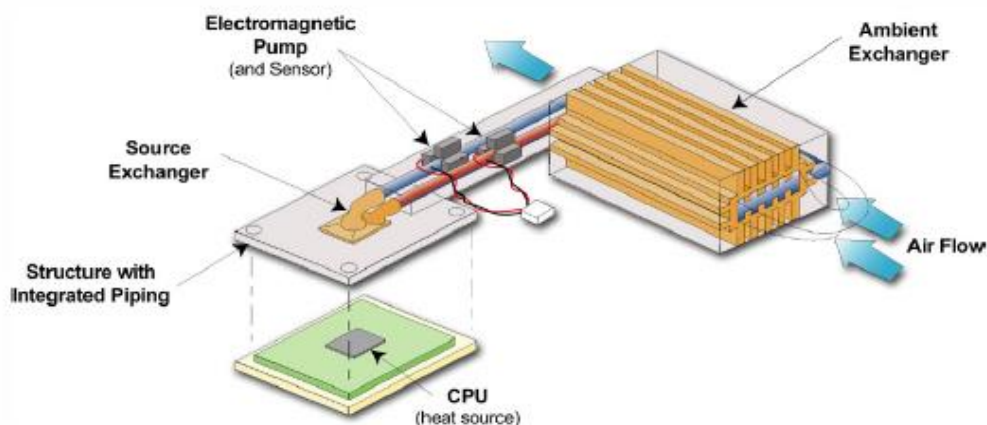
فصل سوم

بررسی چگونگی انتقال حرارت به وسیله پمپهای الکترومغناطیسی

چکیده

در این بخش از پایان نامه پمپهای الکترومغناطیسی بعنوان انتقال دهنده‌های گرمایی سدیم مایع (Sodium loop) مطرح و شرح داده می‌شود. این انتقال دهنده جهت استفاده در مطالعه مربوط به واکنش گذرا لوله‌های گرمایی ساخته شده است. این انتقال دهنده از یک مدار حلقه (LOOP)، سیستم ایمنی، و یک سیستم مبدل تشکیل شده که می‌تواند تحت حرارت و جریان مختلف کار کند. واکنش گذرا لوله گرمایی به پاس HEAT LOAD PULSE بار گرمایی در کندانسور مورد بررسی قرار می‌گیرد. لوله گرمایی سدیم با طول 0.457m screen wick، با قطر بیرونی 0.0127m تحت شرایط با بار گرمایی مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت نتیجه این بود که تحت پالس بار گرمایی به کار رفته در کندانسور از لوله گرمایی معکوس شده (تغییر جهت داده شده) استفاده شود. مدت زمان بازگشت (تغییر جهت) تقریباً ۱۵ تا ۲۵ ثانویه بود. شروع و آغاز گرم شدن (start up) لوله گرمایی (حرارتی) از حالت انجماد نیز بررسی و مشخص شد که در طول روند start up، بخش بسیار کمی از لوله حرارتی فعال است. منطقه فعال به تدریج تا انتهای کندانسور توسعه یافت تا جاییکه تمام سیال کاری (working fluid) در لوله گرمایی ذوب شد.

Advanced heat removal and transport technology



Liquid metal cooling loop that employs a power-efficient electromagnetic (EM) pump to propel the liquid metal

۳-۱- مقدمه

در نظر است که در آینده بتوان حرارت تلف شده را بوسیله یک حلقه سدیم بسته از منبع حرارتی با درجه بالا، جدا کرد. حرارت تلف شده بدست آمده توسط سیال سدیم از طریق یک رادیاتور حرارتی لوله‌ای در فضا پخش میشود. مشکلی که نیاز به بررسی دارد، واکنش گذرا رادیاتور گرمایی/حلقه ای سدیم (coupled sodium Loop pipe radiator) است، زمانیکه بارگرمایی معکوس در رادیاتور لوله حرارتی وجود دارد. تحت شرایط معکوس، میتوان یک پاس بار گرمایی را در کندانسور لوله حرارتی بکار برد. این پالس میتواند حرارت لوله حرارتی را بیشتر از حرارت لوله برده و موجب شود که لوله حرارتی با مد معکوس عمل کند. بنابراین به جای خنک کردن (گرفتن گرما) حلقه، لوله حرارتی در عمل گرما را به سیستم منتقل میکند.

حلقه سدیم مایع به منظور استفاده در این تحقیق ساخته شد. سدیم مایع تحت حرارت بالا در یک سلول آزمایشی گردش می‌کند، یعنی روی یک لوله حرارتی که داخل سلول است جریان دارد. بدینوسیله بار گرمایی منطقی و مناسبی در بخش تبخیر کننده evaporator لوله حرارتی فراهم می‌آید. با آنکه نظریه سیال کاری در حال گردش در یک حلقه نسبتاً ساده بود، حرارت عملکردی (کاری) بالا و ماهیت خوردگی و واکنشی بسیار بالای سدیم، طراحی حلقه را کاری دشوار کرده بود.

این حلقه از سه جزء عمده تشکیل شده است: حلقه سدیم، سیستم ایمنی، و سیستم اخذ داده از آن حالیکه حلقه برای عملکرد تحت دامنه حرارتی و آهنگ جریان وسیعی طراحی شده است، کنترل ورودی‌های گرمایی و آهنگ جریان سدیم همیشه لازم است. سیستم ایمنی باید به شناساگر و حس‌گر مجهز باشد تا در صورت آتش سوزی تصادفی بتوان عملکرد مناسب را داشت. سیستم اخذ داده اندازه‌گیری و داده‌های آزمایشی واقعی را فراهم می‌آورد.

این تحقیق یک بررسی تجربی از واکنش گذرا لوله حرارتی نسبت به پالس بار گرمایی در کندانسور می‌باشد. قبلاً تیلتون و جو (Tilton and chow) (۱۹۷۲) بررسی‌های تئوری و تجربی درباره واکنش لوله حرارتی فلزی و سیل را نسبت به بار حرارتی معکوس در کندانسور، انجام داده اند. هرچند، آزمایش آنها، نتوانست روند معکوس را به خوبی نشان دهد زیرا در کنار تبخیر کننده تجهیزات گرمایی/خنک کننده همرفتی فراهم نیامده بود. این گزارش تلاشی است در جهت نشان دادن خصوصیت برگشتی

(reversal) لوله حرارتی فلزی سیال (liquid metal heat pipe)

انواع مختلفی از بار گرمایی در کندانسور مورد بررسی قرار گرفت.

۱- گرم سازی کامل کندانسور

۲- بخشی از کندانسور گرم و بخشی دیگر عایق بندی

۳- بخشی از کندانسور گرم و بخشی در معرض هوای محیط

با قراردادن گرمکن استوانه ای در انتها(لبه) کندانسور گرمایی لوله‌ای، ورودی گرما فراهم می‌شد. اندازه‌گیری و داده‌های ثبت شده شامل توزیع گرمایی دیواره بیرونی، به صورت محوری و رادیالی، به صورت تابعی از زمان بود. حرارت های ورودی و خروجی سلول آزمایش نیز ثبت شدند تا بتوان مقدار گرمای منتقل شده توسط لوله حرارتی را به حلقه سدیم محاسبه کرد.

۳-۲- سیستم سدیم مایع (سیال سدیم)

این سیستم به منظور گردش سدیم تحت شرایط حرارتی بالا و برآوردن اهداف آزمایش لوله‌های حرارتی یا سایر تجهیزات گرمایی طراحی شد. به خاطر مشکلات فنی به خصوص ساختار کربنی در لوله‌های حلقه‌ای، از حلقه اصلی استفاده نشد. در ژانویه ۱۹۹۰، از آنجائیکه تلاشها به منظور بازکردن لوله حلقه‌ای مسدود شده، موفق نبود، حلقه بازسازی شد. حلقه ای که در این گزارش مورد استفاده قرار گرفت مانند همان حلقه اصلی بود، با این تفاوت که پارامتر های بسیاری تغییر و یا اضافه شده بود تا عملکرد حلقه ارتقاء یافته و کنترل و ایمنی مناسب‌تری فراهم آید.

۳-۳- توضیح سدیم سیال

تقریباً ۱۲/۲۵ کیلوگرم سدیم درحلقه ذخیره شد. هنگام فعال سازی، پمپ الکترومغناطیسی سدیم را به بالای لوله حرکت می‌داد. در خط کناری (لوله فرعی)، بخشی از سدیم به ورودی پمپ برگشت داده می‌-

شد. هدف از این لوله کنترل بهتر حرارت سدیم در سلول پمپ و سیال سدیم در بخش آزمایشی بود. هنگام بازکردن کامل درچه فرعی، تقریباً ۵۵ درصد از جریان را می‌توان برگشت داد باقیمانده سدیم به سمت بالا و در مبادله کننده گرما یا (economizer) جریان می‌یابد. سدیم بعد از گذشتن از Economizer وارد لوله و بعد سلول آزمایش می‌شود. در آنجا سدیم روی لوله تعبیه شده قرار گرفته در سلول جریان می‌یابد (این لوله گرما یا سرمای لازم را برای اهداف آزمایشی فراهم می‌آورد)

بعد از سلول آزمایش، سدیم به داخل مخزن فشار شکن جاری می‌شود و از انتهای مخزن Z ، از فیلتر عبور می‌کند و سپس وارد economizer می‌شود. در اینجا جریان گرم رو به پایین (سرازیر)، انرژی گرمایی خود را به جریان بالا رو که سردتر است می‌دهد. سدیم بعد از عبور از economizer، وارد یک مبادله کننده گرمایی پره دار، یا خنک کننده می‌شود و در آنجا بعد از خنک شدن به سمت پمپ برمیگردد. این خنک کننده کمک می‌کند تا دامنه عملکردی گرمایی سلول پمپ حفظ شود. در شکل ۱-۲، نما شماتیکی از جریان سدیم نشان داده شده است.

- اجزای حلقه (LOOP) سدیم

در این بخش توضیحات اجزا و تجهیزات عمده مورد استفاده در حلقه سدیم بیان می‌شود.

- سیستم Cover gas

به منظور جلوگیری از ورود هوا به سیستم، همیشه باید فشار مثبت حلقه سدیم حفظ شود؛ به همین دلیل 99/999% نیتروژن خالص استفاده شد. این سیستم اجازه می‌دهد تا هنگام شارژ و تخلیه سدیم، فشارهای مختلفی که در مخزن فشار شکن و DUMP تخلیه وجود دارد، حفظ شود. این فشارها را

میتوان با بازکردن دریچه های مربوطه تنظیم و یا خارج کرد. COLD TRAP ها کمک میکند تا بخار سدیم در زمانیکه فشار باید خارج شود، گرفته شود. در شکل ۲-۲، شماتیکی از سیستم Loop cover gas (حلقه- طوقه- مدار) آمده است.

۳-۴- مخزن های Dump

این مخزن ها به صورت منطقه ذخیره سدیم مایع در طول تعویض، تخلیه یا زمانیکه باید سطح سدیم در حلقه پایین آید در نظر گرفته میشود. در مورد دلیل آخر، موقعیت مخزن Dump، به گونه ای بود که در پایین ترین نقطه حلقه (Loop) قرار داشت دو مخزن Dump در حلقه سدیم وجود دارد که

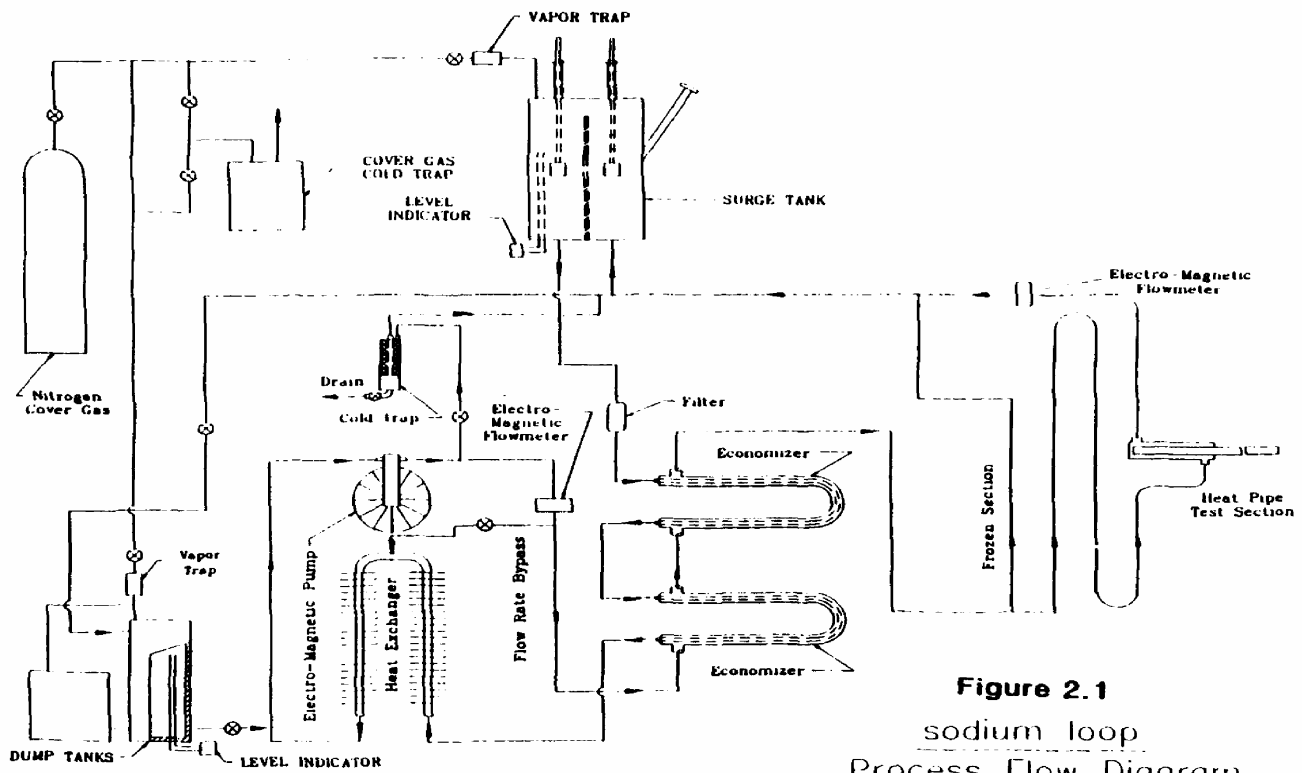


Figure 2.1
sodium loop
Process Flow Diagram

ابعاد آنها در زیر آمده است:

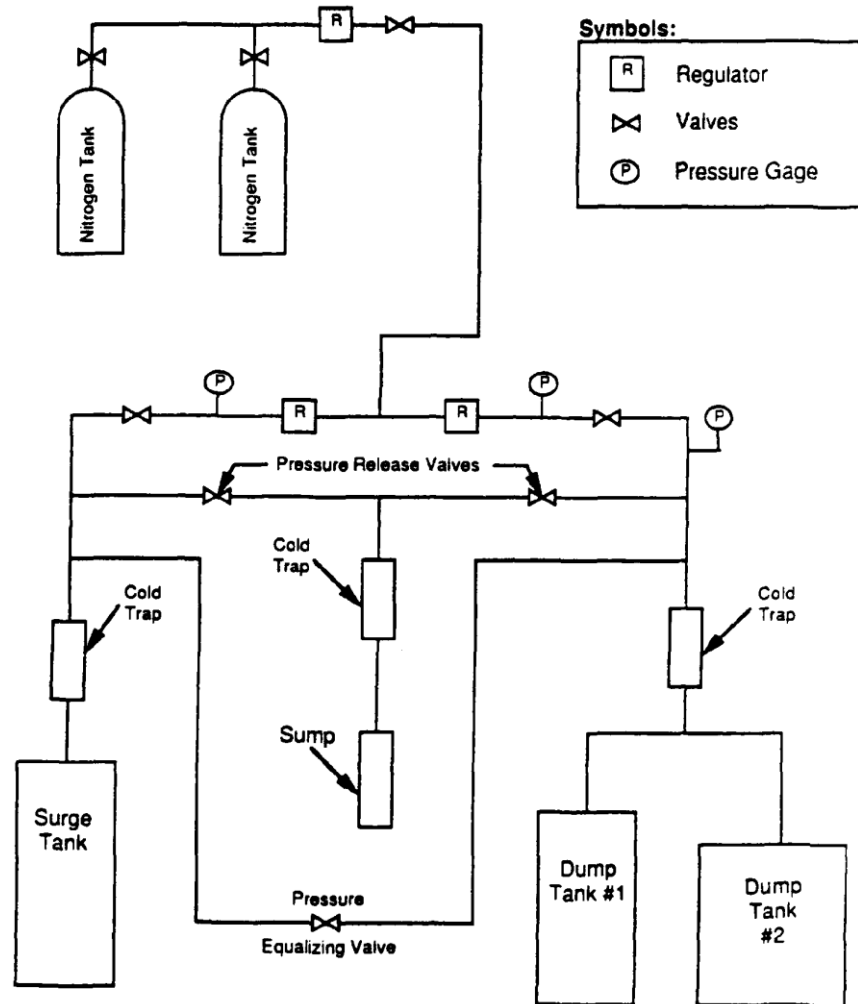


Figure 2.2: Schematic of Cover Gas System

Dump tank #1: diameter: 0.222 m (8.75 in)

height: 0.584 m (23 in)

volume: 0.0224 m³ (1368 in³)

Dump tank #2: diameter: 0.314 m (12.375 in)

height: 0.289 m (11.375 in)

volume: 0.0227 m³ (1383 in³)

این دو مخزن از داخل به هم متصل هستند. از آنجائیکه در حلقه جدید از سدیم کمتری استفاده می- شد در لوپ اصلی ۱۰۰ پوند بود ولی در لوپ جدید این مقدار به ۲۷ پوند کاهش یافته بود) و به منظور کاهش مقدار سدیم مورد نیاز، تصمیم گرفته شد که فقط از مخزن dump شماره ۱ استفاده شود. لوله یا خط رابط به صورت منجمد در آمد تا مخزن dump شماره ۲ درزگیری شده باشد.

۳-۵- cold trap

ناخالصی های مثل اکسید، کربن، فلزات، هیدروژن و غیره، قابلیت سیال سدیم را کاهش می دهند، علاوه بر این، ناخالصی ها باعث خوردگی لوله ها می شوند یا در آن ها رسوب می کنند. در cold trap از وابستگی قابلیت حل شدن به دما برای تصفیه سدیم استفاده می کنند. (قابلیت حل شدن دما، کاهش مییابد.) وقتی سدیم در دمای اشباع شدگی با مقدار مشخص ناخالصی سرد می شود، سدیم اشباع و ته- نشین شده و از ناخالصی های غیر قابل حل جدا می شود. در دمای ۱۲۱ درجه سانتی گراد (25.F) قابلیت انحلال اکسید در سدیم بین ۱۰-۵ (PPM) است شکل ۲,۳ دید جانبی cold trap را ارائه میدهد جریان اولیه سدیم در مجرای پایینی اتاقک پمپ خارج و وارد cold trap می شود. در اینجا سدیم به علت جریان هوای خارجی سطح پره دار cold trap تا دمای $121^{\circ}C$ خنک می شود. ناخالصی های احتمالی در تورهای استیل ضد زنگ گیر می کنند. بعد سدیم تصفیه شده از لوله ی بالایی cold trap خارج و وارد مجرای ورودی اصلی مخزن فشار شکن (Surge tank) می شود.

اتاقک سلول (cell)

۳-۶- مخزن فشار شکن (Surge tank): وظیفه مخزن فشار شکن عبارت است از :

۱- اتاقک جداکننده گاز برای جذب هر نوع گاز اضافی موجود در سدیم مایع

۲- دستگاه Hot trap برای جدا کردن اکسیژن از سدیم مایع

منظور از عمل Hot trap وارد کردن یک ماده با قابلیت واکنش پذیری بالا به صورت جامد در جریان سدیم مایع است که با انجام واکنش‌های شیمیایی ناخالصی‌ها را جمع‌آوری و از هر گونه واکنش پذیری آن‌ها جلوگیری می‌کند. در Hot trap اکسیژن بیشتری نسبت به cold trap از سدیم جدا می‌شود. زیرکونیم به خاطر اکسید بودن و از نظر ترموکوپلی (Thermo couple) با ثبات بودن، بهترین جذب‌کننده اکسیژن است. از لحاظ نظری، موازنه اکسیژن متمرکز (Zirconium) در جریان سدیم دستگاه Hot trap با وجود Zirconium کمتر از 7×10^{-8} ppm است.

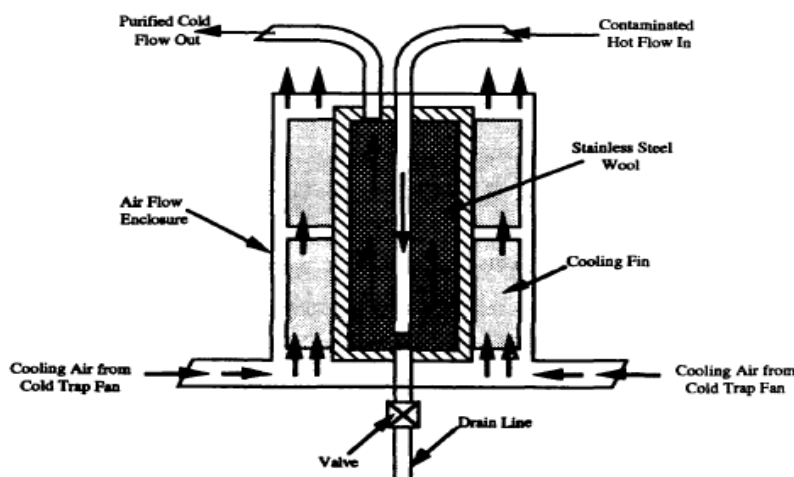


Figure 2.3: Cold Trap Sectional View

مجرای ورودی و خروج مخزن فشار شکن در انتهای آن است که توسط یک دیواره استیل ضد زنگ از هم جدا می‌شوند. دو baffle یکی از جنس استیل ضد زنگ و دیگری از جنس Zirconium در دو طرف جداره قرار دارند. baffle استیل ضد زنگ به صورت یک فیلتر عمل میکند در حالی که baffle.

Zirconium اکسیژن را جذب می‌کند. مخزن فشارشکن نیز دریچه‌ای دارد که سدیم را وارد می‌کند.

شکل ۲،۴

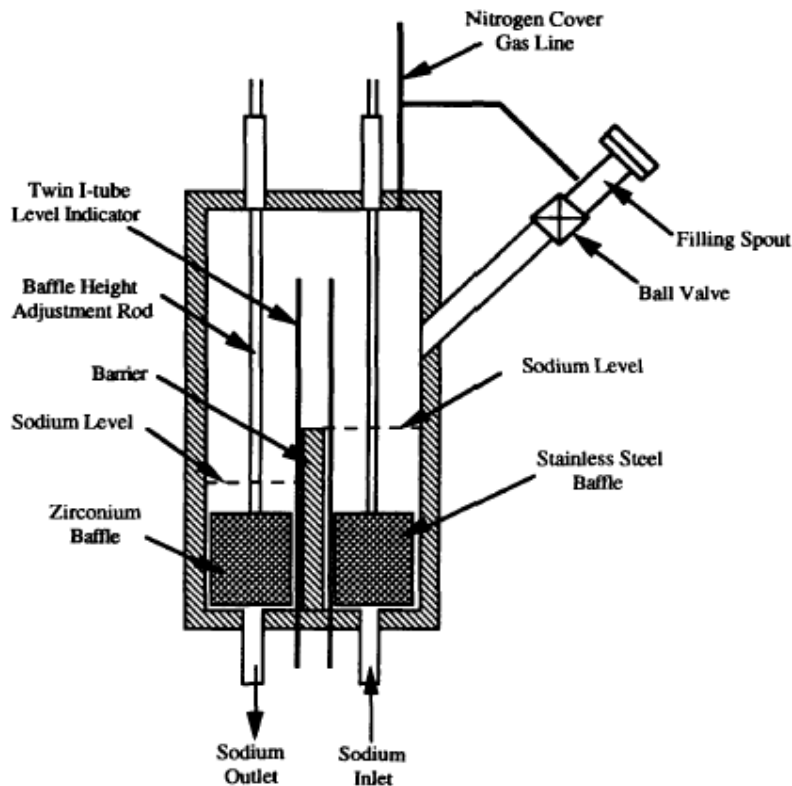


Figure 2.4: Sectional View of Surge Tank

۳-۷- اکونومایزر (Economizer): برای رعایت مسائل ایمنی بهتر است که اتاقک پمپ دمایی

بین ۳۱۵ تا ۴۲۵ درجه سانتی گراد داشته (۸۰۰-۶۰۰ فارنهایت) باشد اتاقک آزمایش در حالت معمول

دمایی معادل ۷۲۷ درجه سانتی گراد (فارنهایت ۱۳۴۰) دارد. برای تحمل چنین تغییر دمایی فاحشی از

Economizer استفاده می‌کنیم. این دستگاه به جریان گرم پایین اجازه می‌دهد به جریان خنک بالا

تبدیل شود و از سود یا گرم شدن بیش از حد سدیم جلوگیری می‌کند و از دو لوله متحدالمرکز با

جریان مبادله کننده‌های گرمایی روبه روی هم تشکیل شده است سدیم گرم در بخش لوله ای است در

حالی که سدیم سود در بخش annulus مبادله کننده گرما در جریان است Economizer کاهش/افزایش دما تا حدود $300^{\circ}C$ ($572^{\circ}F$) را پشتیبانی می کند.

۳-۸- اتافک آزمایش (Test cell)

بهرتر است سدیم در مجرای درون لوله گرمایی (Heatpipe) در جریان باشد تا از بازگذاری گرمایی بیش از حد جلوگیری شود. این مجرا باید خاصیت ضد نشتی داشته باشد در حالی که اجازه جایگزینی لوله ی گرمایی را بدهد. چون دیواره لوله گرما از اینکونل (inconel) ساخته شده، باید از inconel فشرده متناسب برای محکم کردن لوله در جایش استفاده کنیم. زمانی مشکل نشتی ایجاد می شود که تلاش می کنیم اینکونل مناسب را به لوله استیل ضد زنگ جوش بدهیم. آخرین راه استفاده از لوله nconel مادگی است. انبساط در نتیجه گرما در لوله های استیل ضد زنگ inconel عدم نشتی در دمای بالا را تضمین می کند شکل ۲,۵ اتافک آزمایش را که لوله گرما در آن نصب شده نشان می دهد.

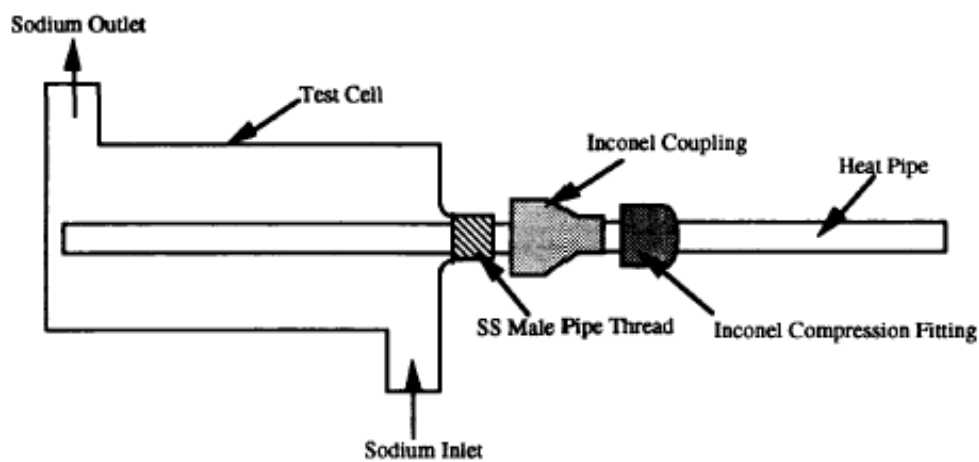


Figure 2.5: Test Cell with Heat Pipe Installed

۳-۹- نقش پمپ الکترومغناطیس :

سدیم لوپ از یک پمپ الکترو مغناطیسی برای به گردش در آوردن سدیم مایع استفاده می‌کند. مهمترین مزیت استفاده از پمپ الکترومغناطیس عدم تماس کامل آن با سدیم مایع است و دیگر نیازی به درزگیری نیست. امکان استفاده از دستگاه بدون بازکردن لوله ها یکی دیگر از مزیت‌های این دستگاه است. شکل اصلی امکان اتلاف جریان به علت وجود گاز اضافی در جریان سدیم مایع است. در پمپ الکترومغناطیس، سدیم مایع در اثر ایجاد یک افت فشار که باعث فعل و انفعال جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی می‌شود و در همان فضایی که سدیم مایع جریان دارد، به گردش در می‌آید. این مسئله در شکل ۲,۶ نمایش داده شده است یک جریان به روی سدیم مایع و از طریق سدیم مایع برروی تسمه های نقره ی که به چپ و راست اتاقک پمپ بسته شده اند، وارد می‌شود. در همین زمان، یک میدان مغناطیسی در بالا و پایین اتاقک آزمایش ایجاد می‌شود این جریان معادل صدها آمپر در کسر ثانیه است. شکل ۲,۷ اتاقک پمپ را با نقره‌ی الحاق شده به منظور داشتن بالاترین میزان رسانایی نشان میدهد.

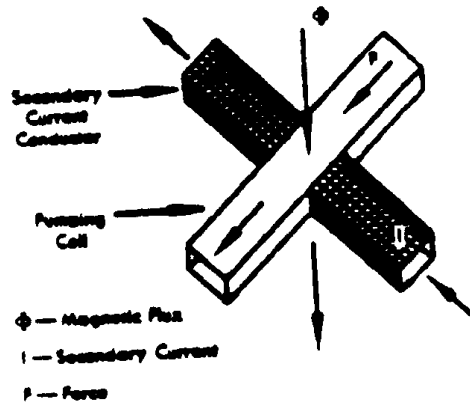


Figure 2.6: Operational Principle of Electromagnetic Pump

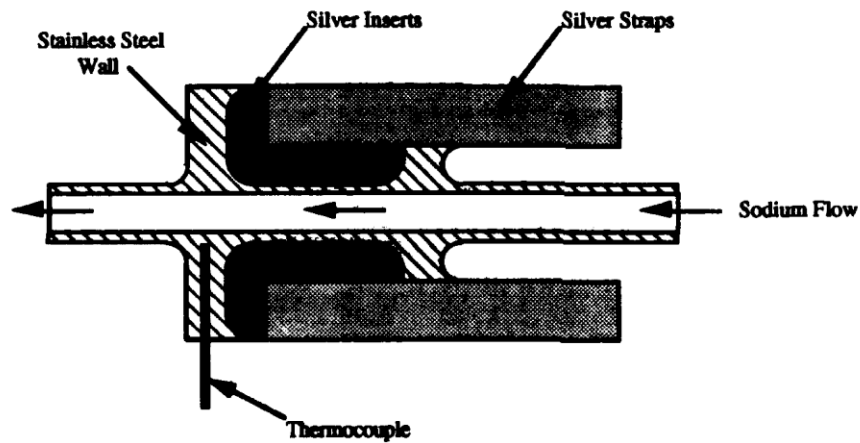


Figure 2.7: Pump Cell

۳-۱۰- کنتور جریان الکترومغناطیسی (جریان سنج)

در سدیم لوپ از دو کنتور جریان الکترومغناطیسی استفاده میشود. یکی در پایین اتاقک پمپ قبل از گذرگاه فرعی، دیگری در خروجی اتاقک آزمایش (test cell). شکل ۲,۸ کنتور سنجش جریان الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. جریان الکترومغناطیسی با نیروی محرک برقی کار می‌کند یعنی

جریان الکترومغناطیسی در رسانا تولید و وارد میدان مغناطیسی می‌شود جریان الکترومغناطیسی در معادله زیر بدست می‌آید.

$$E = BL7 \times 10^{-5}$$

E جریان الکترومغناطیسی در مقیاس متر بر وات، B چگالی سیال مغناطیسی، γ شتاب متوسط مایع و سانتی متر بر ثانیه و L طول رسانا بر حسب سانتی متر است شکل ۲,۹ کارکرد کنتور جریان الکترومغناطیسی را نشان میدهد مزیت این جریان افت فشار بسیار کم، عدم تحرک و یا جایگزینی بخش‌ها و نفوذ در ساختار لوله است. اما درجه بندی این کانکتورها، به هر حال به خاطر وابستگی ولتاژ خروجی به دما مایع سایل، دمای میدان مغناطیسی و عوامل دیگر مشکل ایجاد می‌کند.

در اصل، ولتاژ خروجی همان جریان الکترومغناطیسی است که با ولت سنج دارای مقاومت ظاهری محدود اندازه گیری میشود. مجرا یا لوله یک رسانا است، از این رو دارای مقاومت موازی است که باعث افت ولتاژ خروجی میشود این افت در نتیجه ساختار قطر لوله ها و مقاومتی الکتریکی لوله و سدیم مایع ایجاد میشود. عامل کاهش از معادله زیر بدست می‌آید.

$$f = \frac{2DiDo}{Do^2 + Di^2 + (p / pw)(Do^2 - Di^2)}$$

Do, Di قطر داخلی و خارجی لوله، pi و pw مقاومت الکتریکی سدیم مایع و دیواره هستند از آنجائیکه مقاومت وابسته به دما است (مقاومت سدیم از 9.64 اهم بر سانتی متر در دمای 98° سانتی گراد به 29.8 اهم بر سانتی متر در 500° درجه سانتی گراد افزایش می‌یابد، ولتاژ خروجی نیز وابسته

دما است. علاوه بر اثر مقاومت ظاهری دیواره ، متد مایع در قسمت نهایی/بخش‌های بالایی و پایینی قسمت مرکزی دارای الکترو(در میدان یکنواخت)، نیز مقاومت ظاهری دارد.

عامل دیگری که بر ولتاژ خروجی اثر می‌گذارد (distortion) تحریف میدان مغناطیسی است. سدیم مایعی که از کنتور جریان الکترومغناطیسی خارج یا بدان وارد میشود تحت تأثیر افت حرارت سیلان مغناطیسی قرار می‌گیرد و یک جریان گردابی در مایع سدیم به وجود می‌آید که در مقابل میدان مغناطیسی را تحریک می‌کند. از آنجائیکه که افت حرارت سیلان مغناطیسی در ورودی کنتور مثبت و در خروجی آن منفی است جریان گردابی محرک میدان در ورودی مخالف جریان گردابی محرک میدان در خروجی است. بارگذاری بیش از حد این میدان‌ها بر روی میدان اولیه باعث تحریف میدان می‌شود. این تحریف عموماً جهت حرکت سیلان بیشنیه (حداکثر) را به سمت پایین تغییر میدهد. بنابراین قطبهای الکتریکی بالاترین ولتاژ خروجی را نمی‌دهند. میدان تغییر دهی سیلان وابسته به مسائلی مانند شتاب مایع، رسانایی، ... است (سیلان = سیال flux).

وابستگی چگال سیلان میدان مغناطیسی به دما و تا حدی زمان که در اثر خاصیت آهنربایی دائم پدید می‌آید نیز در ولتاژ خروجی تأثیر می‌گذارد. عامل دیگر جریان الکترومغناطیسی ایجاد شده در نقطه اتصال سیم مسی، الکترو استیل ضد زنگ است. اگر هر دو اتصال یک دما داشته باشند جریان الکترومغناطیسی یکسانی خواهند داشت و یکدیگر را خنثی خواهند کرد و تأثیری بر ولتاژ ورودی نخواهند داشت اما به خاطر ولتاژ خروجی بسیار پایین (16mr برای جریان gol/min در 1000k) ، مطمئناً یک اختلاف‌های چند درجه ای بر آن تأثیر گذاشته است.

۳-۱۱- ارتفاع سنج(ارتفاع یاب): سطح سدیم در مخزن فشار شکن و مخزن dump توسط دو ارتفاع سنج مشابه که در داخل هر مخزن نصب شده اند بدست می‌آید. روش تنظیم ارتفاع سنج تک لوله‌ای در شکل ۱-۲ آمده است. شکل ۱۱-۲ مدار مشابه ارتفاع سنج دو لوله ای را نیز نشان می‌دهد. اگر ولتاژ خروجی را یکسان نگه داریم، ولتاژ خروجی (کسری) نسبتی از مقاومت الکتریکی لوله خواهد بود. مقاومت لوله زمانی که مخزن خالی است حداکثر است و زمانی که سدیم به بالای لوله میرسد صفر میشود بنابراین ولتاژ خروجی با میزان سدیم در مخزن فشار شکن رابطه معکوس دارد. اگر ولتاژ ورودی ۲ ولت باشد، ولتاژ خروجی، مخزن خالی فشار شکن $1\frac{1}{4}mr$ و $4/7(mr)$ pump است.

۳-۱۲- فیلتر: شکل ۱۲-۲ بخش جانبی فیلتر را نشان میدهد. فیلتر در بخش خروجی مخزن فشار شکن قرار دارد.

۳-۱۳- خنک کننده: (سردکن) این خنک کننده، نوعی مبادله کننده گرما با چهار پره‌ی مستطیلی شکل است. خنک کننده دمای سدیم را قبل از ورود آن به اتاقک پمپ پایین می‌آورد. از آنجائیکه خنک کننده در مدخل مجرای هوا قرار گرفته است، میزان خنک کنندگی را می‌توان با تنظیم سوپاپ خروجی fan کنترل کرد. (فن=fan)

۳-۱۴- بخش انجماد: (بخش یخ زده) زمانی از این بخش استفاده می‌کنیم که می‌خواهیم جریان بسیار کمی از سدیم در اتاقک آزمایش داشته باشیم (کمتر از جریانی که توسط ولتاژ پمپ به دست می‌آید) این بخش برای پایین آوردن فشاری که در اتاقک آزمایش بر اثر انبساط دمایی ورود سدیم ایجاد میشود مفید است.

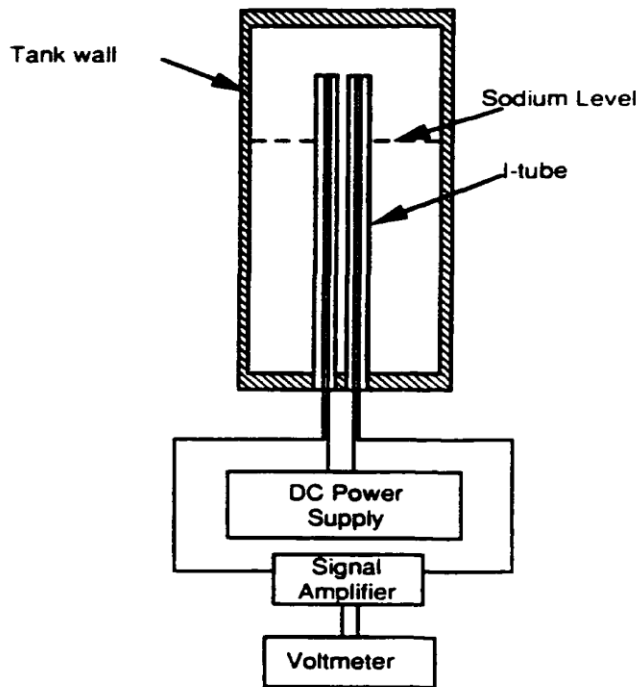
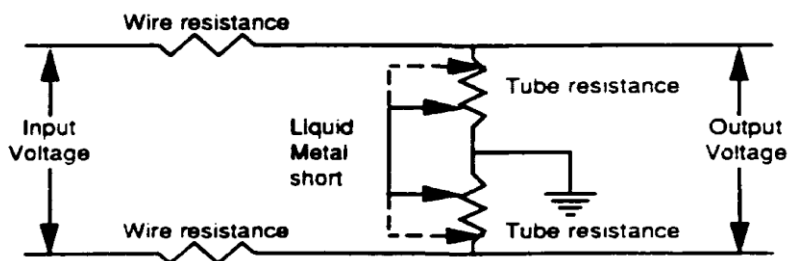


Figure 2.10: Twin I-tube Level Indicator



$$V_o = \frac{2 (\text{Tube resistance})}{2 (\text{Wire resistance})} V_i$$

Figure 2.11: Level Indicator Equivalent Circuit

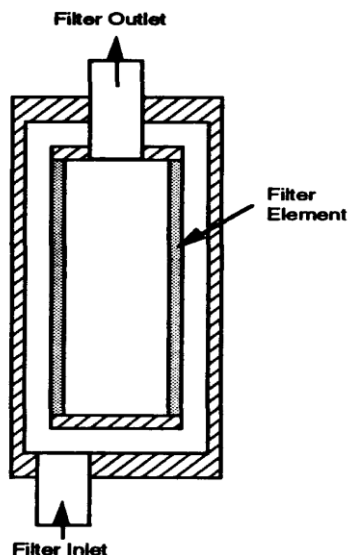


Figure 2.12: Filter Sectional View

۳-۱۵- کنترل و برق ورودی سدیم لوپ (loop):

برق ورودی به سدیم لوپ توسط یک تقویت کننده روشن و خاموش می‌شود. فنرهای این تقویت کننده توسط دو حسگر/ تقویت کننده کنترل می‌شود این حسگر/تقویت کننده‌ها مانند یک سیستم ایمنی عمل میکنند. تعریفشان را میتوانید در بخش ایمنی این گزارش بیابید/شکل ۱۳-۲ نحوه کارکرد مدارالکتریکی سدیم لوپ را توضیح میدهد. برق پمپ (pump) الکترومغناطیسی توسط یک واریاک (variac) کنترل شده و اجازه تغییر آسان میزان جریان سدیم را می‌دهد

۳-۱۶- مدار گرمایی سدیم لوپ

«گرم کننده = گرم کن»

گرمای ورودی به سدیم لوپ توسط دستگاه های گرم کننده لوله ای دارای مقاومت (مقاومت ظاهری) تأمین می‌شود. این گرم کننده‌ها در جریان برق 220v ولت در هر اینچ 41/7 وات گرما تولید می‌کنند.

آن‌ها دارای یک المنت میکروم (Nichrome) گرماساز، ورقه‌های incolloy و روکش سیلیکات منیزیوم هستند. در ۱۶ سانتی متر انتهایی هر گرم کننده یک فضای خالی از المنت وجود دارد.

گرم کننده‌ها در پایین لوله های لوپ به صورت طولی نصب می‌شوند به جز یک بخش (اتاقک آزمایش (۱) یعنی جایی که در گرم کننده یکی در بالا و یکی در پایین لوله‌های لوپ نصب شده اند در مخزن‌ها، گرم کننده‌ها به صورت آکوردون (accordion) خم و دارای قطر خارجی لوله های مورد نظر هستند.

زمانی که گرم کننده‌ها با گیره‌های لاستیکی به مخزن /لوله متصل شوند، اطراف آن‌ها را ورقه‌های استیل ضد زنگ می‌پیچند تا انتقال گرما بین سدیم و گرم کننده صورت گیرد. انتهای هر دو گرم کننده به بیرون خم شده و در طول روکش گسترش یافته‌اند تا به جریان برق متصل شوند چون بعضی‌ها از گرم کننده های وجود از لوله های لوپ بزرگترند لوپ بزرگترند بخش خالی گرم کننده به بیرون خم شده و به پره خنک کننده متصل میشود تا از خاموش شدن گرم کننده به خاطر گرمادهی بیش از حد جلوگیری شود.

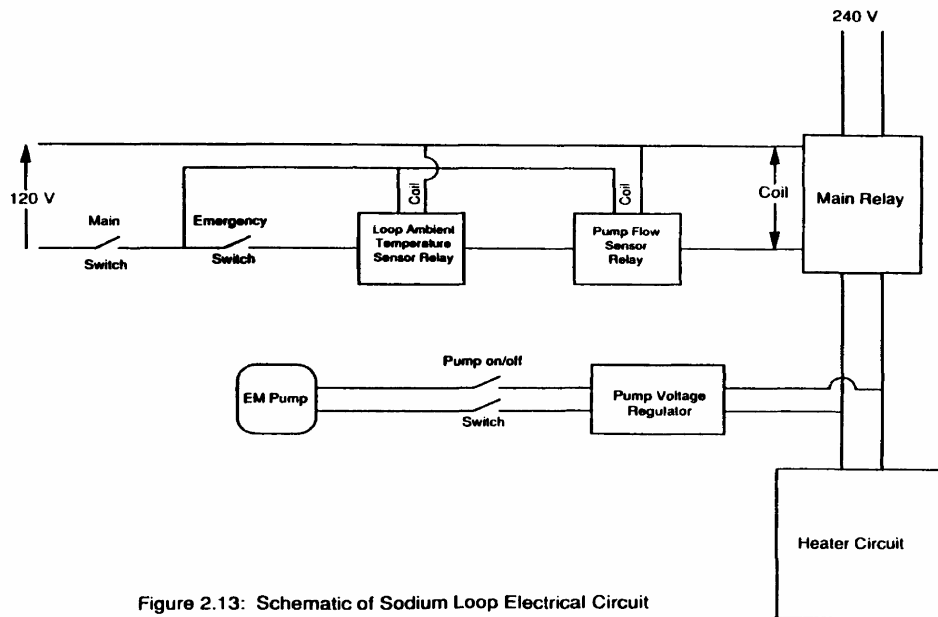


Figure 2.13: Schematic of Sodium Loop Electrical Circuit

در پایانه الکتریکی هر گم کننده: عایق های شیشه‌ای کوتاه نصب می‌شود تا از ایجاد شدن مدار کوتاه جلوگیری کنند. زمانی که گرم کننده‌ها و ورقه های استیل ضد زنگ در جایشان قرار گرفتند، روکش هم نصب می‌شود. ماده‌ی روکش که در سدیم لوپ هم به کار میرود به عنوان پوشش کرا (cera) با رسانایی گرمایی تقریبی $0/15w/mk$ و حداکثر گرما رسانی $1450k$ شناخته میشود با فرض ضریب انتقال گرمایی $10w/m^2k$ ، شعاع بحرانی روکش در حدود $1/5$ سانتی متر (اینچ $0/16$) می‌باشد بنابراین ضخامت روکش (شعاع بحرانی منهای شعاع قطر خارجی لوله) باید حداقل $0/635$ سانتی متر (اینچ $0/25$) باشد. در نتیجه تصمیم گرفتند از دو لایه روکش ($7/62$ سانتی متر یا 3 اینچ) در بخش آزمایش و مخزن استفاده شود. باقی قسمت‌ها (لوله های لوپ) با یک لایه از یان ماده پوشیده شدند.

شکل ۱۴-۲ نمودار مدار گرمایی را نشان میدهد. در سدیم لوپ ۹ گروه گرم کننده به کار رفته است که در جدول شماره آمده اند. به جز بخش آزمایشی ۲، هر مدار با یک کنترل کننده تقویتی نسبی

تنظیم شده است. کنترل کننده توسط یک ترموکوپل هدایت میشود. تمام اتصالات کنترل کننده های گرمایی در یک جعبه اتصال جاگذاری شده است شکل ۱۵-۲ نمودار سیم کشی درون جعبه را نشان میدهد. گرم کننده های درون پرانتز خاموش شده اند تا در مصرف برق صرفه جویی شود زیرا از آنها در سدیم لوپ استفاده نمی شود.

شکل ۱۶-۲ موقعیت و مقدار نیرو برحسب وات گرم کننده ها را در مخازن dump و فشار شکن، خنک کننده، cold trop و خطوط cold trop نشان می دهد. مدار مخزن dump با کنتور (کنترل کننده) #۱ کنترل می شود همانطور که در تصویر ۱۶-۲ می بینیم ۵ گرم کننده در مدار وجود دارند. چون از مخزن dump شماره ۲ استفاده نمیشود، گرم کننده های D5, D4 قطع شده اند. کنتورهای #۴ و #۵ برق ورودی cold trop و خطوط آن را کنترل می کنند. پس از این گرم کننده ها برای ذوب سدیم در ابتدای چرخه تصفیه استفاده می شود وقتی جریان به cold trop میرسد، گرم کننده ها باید خاموش شدند تا سدیم خنک شود گرم کننده های «خنک کننده = سرد کننده = سرد کن» «بارگذاری = شارژ»

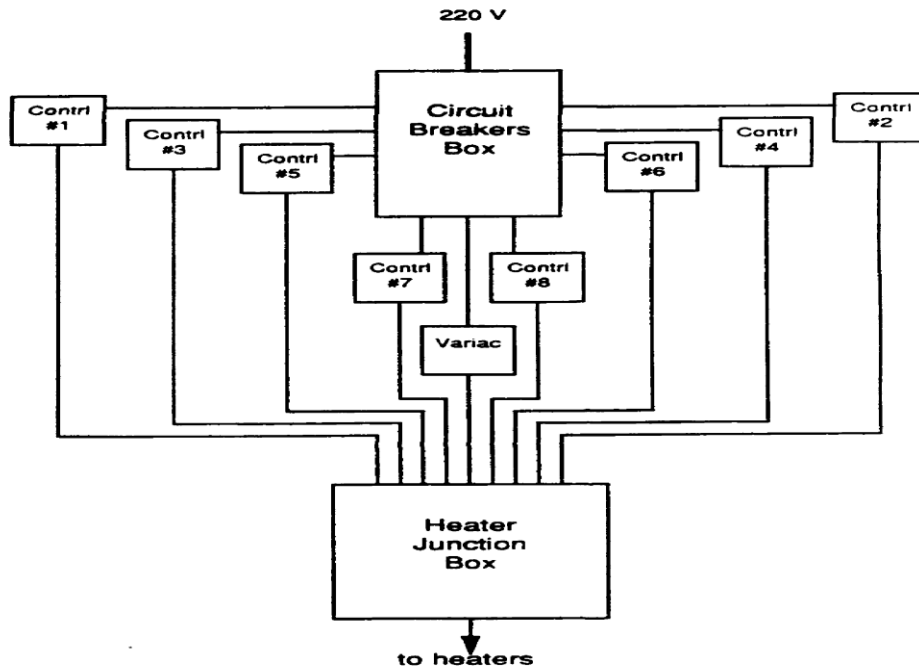
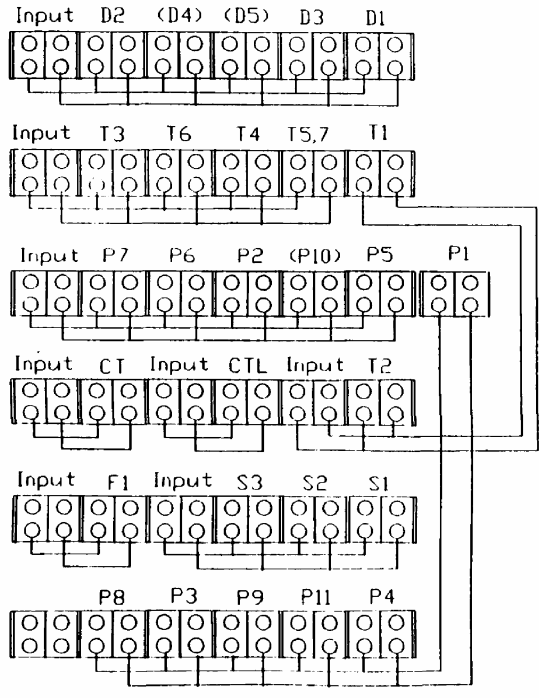


Figure 2.14: Heater circuit schematic



D1-5 --DUMP TANKS
T3-7 --TEST SECTION #1
T1-2 --TEST SECTION #2
P1-P11 --PROCESS
CT --COLD TRAP
CTL --COLD TRAP LINE
F --FROZEN SECTION
S --SURGE TANK

Figure 2.15: Wiring Diagram of Heater in Junction Box

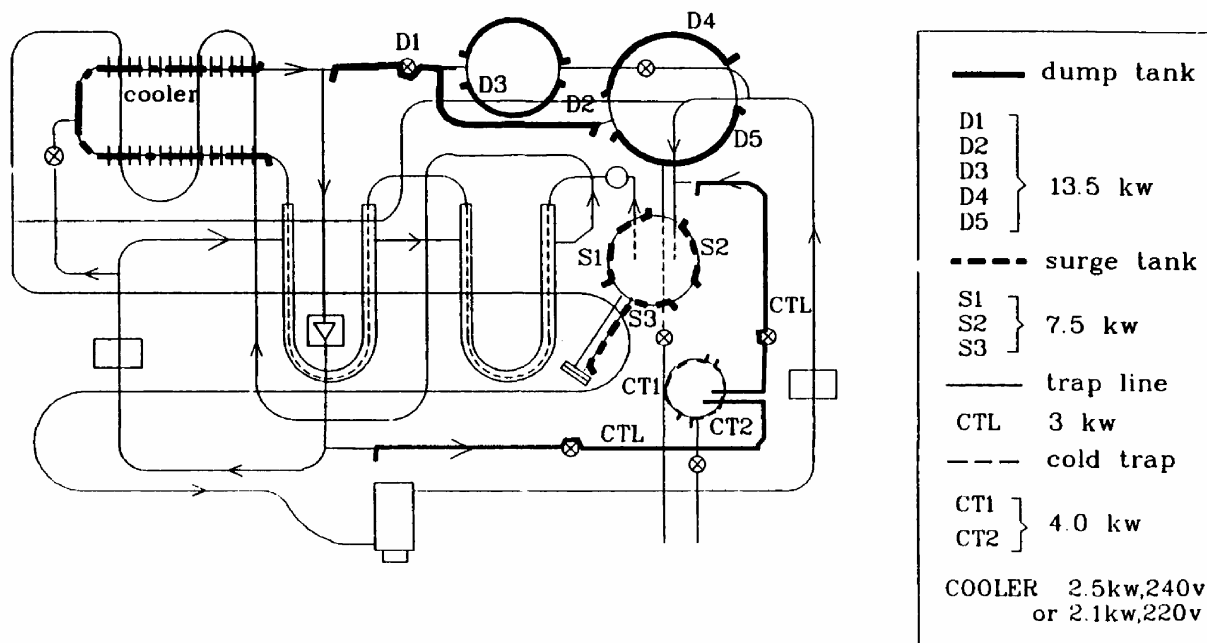


Figure 2.16: Location of Heaters on Dump Tanks, Surge Tank, Cold Trap, Cold Trap Line, and Cooler.

مخزن فشار شکن با کنتور #۶ کنترل میشوند. گرم کننده S3 که برای گرم کردن لوله‌های پر شده مخزن فشار شکن در زمان بارگذاری سدیم استفاده می‌شود، هنگام عملیات عادی خاموش می‌شود. کنتور #۷ گرم کننده بخش سرد کننده را کنترل می‌کند این گرم کننده از همان نوعی است که در اجاق گاز های معمولی استفاده میشود که در صورت کار با حداکثر توان خطری در محیط ایجاد نکنند. مدار گرم کننده بخش سرد کننده در تنظیم دمای اتاق Dump اهمیت سزایی دارد. وقتی Loop بادمای پایین کار میکند، از گرم کننده برای حفظ دمایی که ویژگی مناسبی در جریان ایجاد میکند، استفاده می‌شود.

نمودار موقعیت گرم کننده در پروسه و Economizer

TABLE 2.1: HEATER DISTRIBUTION

Heater Circuit	Wattage	Controlled by	Control TC
Dump tank	13.5 kW	Controller #1	TC# 20
Surge tank	7.5 kW	Controller #8	TC# 14
Cold trap	4 kW	Controller #4	TC# 26
Cold trap lines	3 kW	Controller #5	TC# 27
Test Section 2	3.2 kW	Variac	none
Test Section 1	9.8 kW	Controller #2	TC# 11
Frozen section	2.7 kW	Controller #6	TC# 30
Cooler	2.5 kW	Controller #7	TC# 31
Process & Economizer	13.8 kW	Controller #3	TC# 15

A diagram of heater location for process and economizer is presented in

در شکل ۱۷-۲ نمایش داده شده است کنتور #۳ این مدار را کنترل میکند .

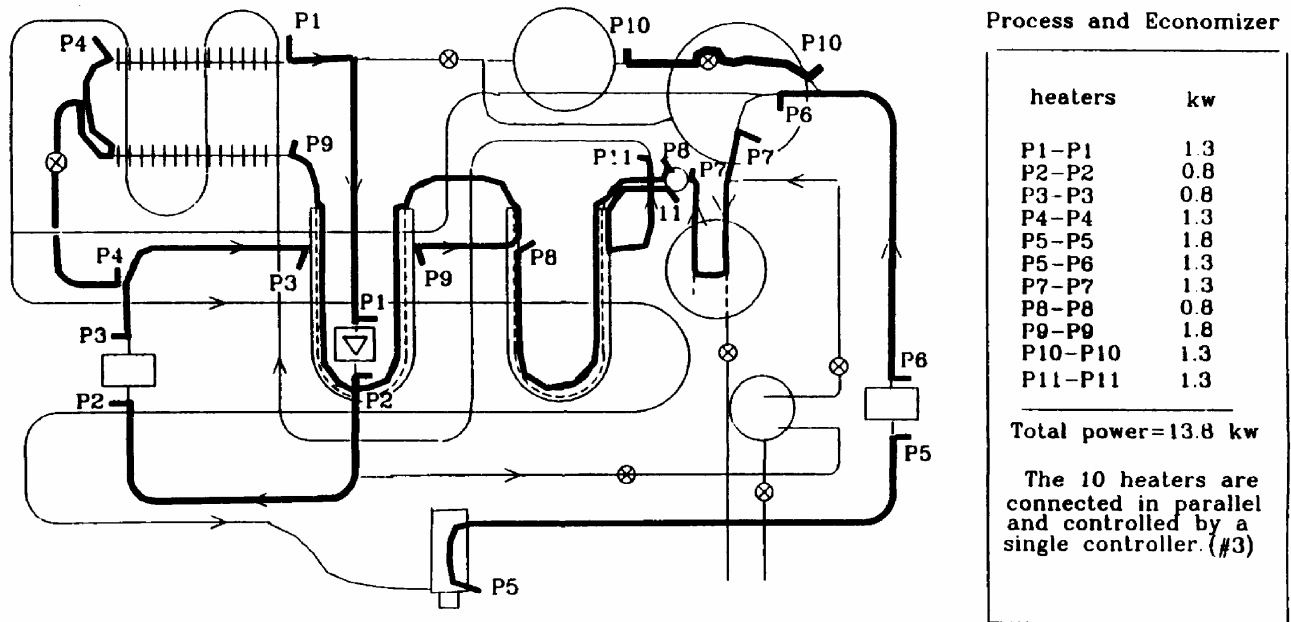


Figure 2.17: Process and Economizer Heaters

گرم کننده #۱۰ برای عملیات عادی قطع میشود چون از آن بخش فقط جهت بارگذاری سدیم استفاده میشود. برای گرم کننده #۵ که اتاقک آزمایش و خط خروجی را گرم می کنند یک سوئیچ نصب می کنیم. توسط این سوئیچ گرم کننده را هنگام آزمایش لوله گرما خاموش می کنیم.

شکل ۱۸-۲ جای گرم کننده اتاقک آزمایش و بخش انجماد را نشان میدهد. بخش آزمایش که بین خروجی Economizer و ورودی اتاقک آزمایش است به دو قسمت تقسیم می شود که به آن ها اتاقک آزمایش ۱ و اتاقک آزمایش ۲ می گوئیم. اتاقک آزمایش ۲ بین خروجی Economizer و ورودی اتاقک آزمایش ۱ قرار میگیرد. این بخش ها به سدیم لوپ این امکان را میدهند که بدون ورود سدیم به اتاقک آزمایش عملیات را انجام دهد. چون از اتاقک آزمایش ۲ برای سنجیدن میزان سدیم استفاده می شود ، برق ورودی آن با یک واریاک (variac) کنترل می شود. در اتاقک آزمایش ۱ ، یعنی جایی که گرمای اصلی به لوپ وارد می شود ، دو گرم کننده نصب می شود، بنابراین برق ورودی تا $83/4$ وات هر اینچ در جریان (V) ۲۲۰ افزایش مییابد . اتاقک آزمایش ۱ با کنتور #۴ کنترل می شود . این اتاقک در طی عملیات در بیشتر مواقع منجمد باقی می ماند.

۳-۱۷- کنترل و اندازه گیری دما (حرارت)

سدیم لوپ از ۳۱ ترموکوپل نوع k برای نظارت بر گرمای لوپ استفاده میکند این ترموکوپل ها به بخش خارجی لوله های لوپ یا مخزن متصل و خروجی آن ها دمای حقیقی سدیم تلقی میشود که این به خاطر ضریب بالای انتقال گرما در سطح داخلی لوله های لوپ است مدار ترموکوپل شامل اتصالات ترموکوپل چک مانند چند لایه ، سوئیچ ترموکوپل و یک گرماسنج ترموکوپل دیجیتال است .

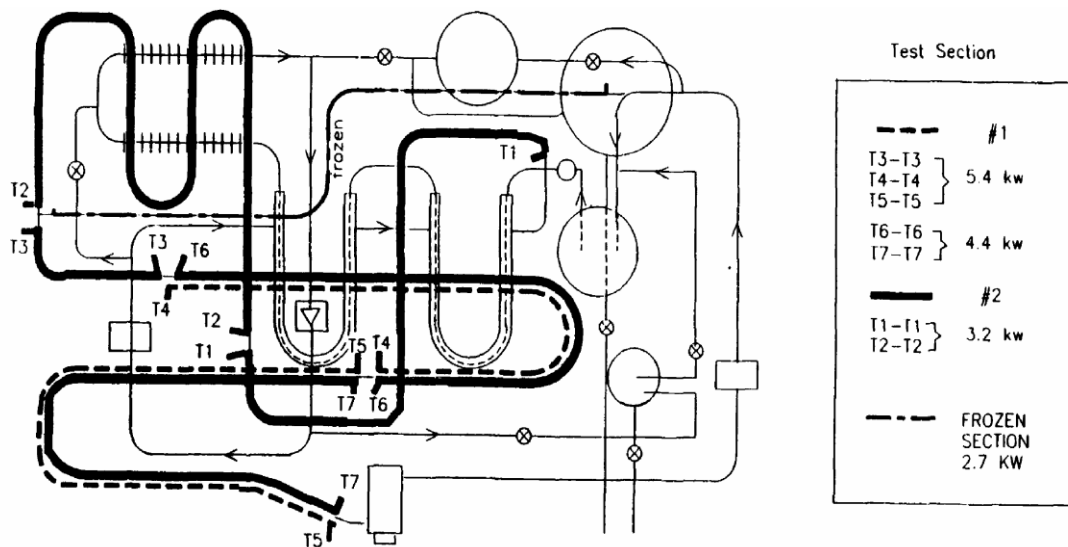


Figure 2.18: Heater Locations of Test Sections and Frozen Section.

هشت ترموکوپل کنترل کننده به اتصالات ۱ تا ۸ متصل و سپس به ۸ کنترل متصل میشوند ۱۵ ترموکوپل به اتصالات شماره ۹ تا ۱۳ متصل و سپس به سوئیچ ترموکوپل متصل میشوند ۸ ترموکوپل کم اهمیت تر مستقیماً به سوئیچ ترموکوپل متصل می‌شوند. خروجی سوئیچ ترموکوپل به کنترل #۲۴ متصل و سپس به گرماسنج دیجیتال وصل میشود این روش اجازه جایگذاری ترموکوپل های کنترل کننده ونظارت بر توزیع دمای سدیم لوپ را میدهد.

شکل ۱۹-۲ موقعیت ترموکوپل ها را در سرتاسر سدیم لوپ با موقعیت های مورد نظرشان در اتصالات و سوئیچ گزینش گر ترموکوپل نشان میدهد در جدول ۲-۲ تعریف ترموکوپل ها ارائه شده است برای

رعایت نکات ایمنی ، گرم کننده اتاقک آزمایش ۱ ترموکوپل‌های اتاقک پمپ ، TC#۲۹،۲۳، به ترتیب به گرماسنج‌های جداگانه وصل میشوند تا دمایشان دائما نظارت شود.

علاوه بر این ترموکوپل‌ها ، ترموکوپل‌های دیگری برای درجه بندی و تعیین گرمای ایجاد شده، تلف شده در اتاقک آزمایش به کار می‌روند. محل این ترموکوپل‌ها را در بخش درجه بندی و آزمایش لوله گرما توضیح می‌دهیم.

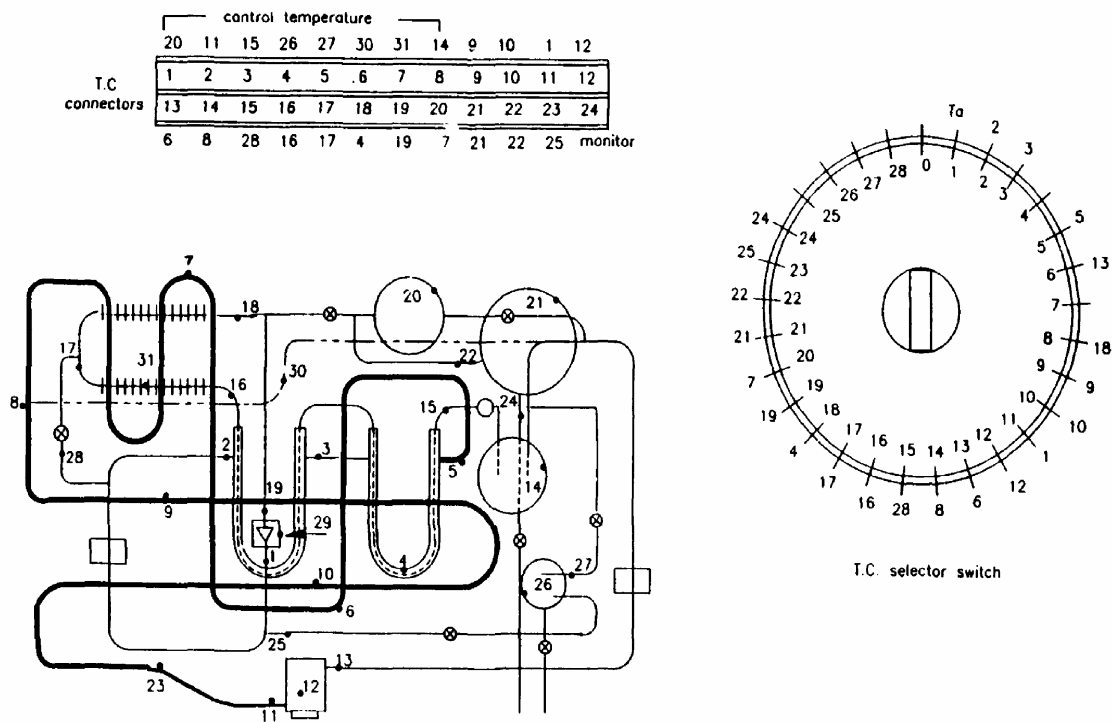


Figure 2.19: Locations and Wiring of Thermocouples

TABLE 2.2: THERMOCOUPLES

T/C #	Description	TC connector #	TC switch #
1	Pump cell outlet	11	11
2	Economizer cold inlet		2
3	Economizer		3
4	Economizer	18	18
5	Economizer cold outlet		5
6	Test Section 2	13	13
7	Test section 2	20	20
8	Test section 2 outlet	14	14
9	Test section 1	9	9
10	Test section 1	10	10
11*	Test cell inlet	2	
12	Test cell	12	12
13	Test cell outlet		6
14*	Surge tank	8	
15*	Economizer hot inlet	3	
16	Economizer hot outlet	16	16
17	Cooler at bypass	17	17
18	Cooler outlet		8
19	Pump cell inlet	19	19
20*	Dump tank #1 (tall)	1	
21	Dump tank #2 (short)	21	21
22	Dump tanks connecting line	22	22
23**	Test section 1 heater		
24	Dump tank drain line		24
25	Cold trap inlet line	23	23
26*	Cold trap	4	
27*	Cold trap outlet	5	
28	By pass line at valve	15	15
29**	Pump cell		
32*	Frozen section	6	
31*	Cooler	7	

* Control thermocouple

** Connected to separate thermometer for continuous monitoring.

۳-۱۸- سیستم ایمنی:

به خاطر واکنش پذیری بالا و میزان عادی سدیم، لوپ سدیم مایع باید به تعدادی از ابزار ایمنی منحصر

شود تا از آتش سوزی جلوگیری یا در صورت هرگونه نشت تصادفی آتش سوزی کنترل شود. این ابزار

شامل سیستم ساده آلودگی های غیر فعال سدیم تا سیستم تصفیه کننده فعال میباشد.

۳-۱۹- محدود کردن سدیم (Sodium containment)

قرار شد سدیم در لوله های لوپ و مخزن فشار شکن ذخیره شود. از تانک Dump فقط در زمان

بارگذاری dumping و مسائل اضطراری استفاده می شود. علت این تصمیم گیری ایجاد یک فضای

بزرگتر برای گرم و سرد کردن بود تا مدت زمانی که دمای سدیم بسیار بالا است کاهش یابد حدوداً ۱۱/۲ ساعت طول می کشد تا سدیم را از دمای اتاق به دمای عملیات 1000k برسانیم، ۲۱/۲ ساعت طول میکشد تا سدیم را از دمای 1000k به دمای انجماد ($98^{\circ}c$) برسانیم علاوه بر ۴ ساعت گرم کردن و ۸ ساعت سرد کردن در صورتی که سدیم در تانک Dump ذخیره شود.

قراردادن سدیم در فضایی بزرگتر امکان نشست سدیم را بیشتر می کند، با فرض اینکه نشستی اتفاق نیفتد، تمام اتصالات را جوش sleeve (جوش آستینی) می کنند. این نوع جوش نسبت به جوش شاخی این مزیت را دارد که درست برعکس جوش شاخی که ماده جوش در سطح نفوذ می کند و راه جریان را سد می کند، در جوش sleeve جریان مسدود نمی شود چون ماده در سطح نفوذ نمی کند. شکل ۱-۳ و ۲-۳ جوش شاخی و جوش sleeve را به ترتیب نشان میدهد.

یکی دیگر از این روش ها روندها استفاده از ورق پهن استیل ضد زنگ است که محکم به دور لوله و گرم کننده پیچیده می شوند. لایه روکش و نوار آلومینیومی دور لوله های لوپ موانع اضافی هستند که از در معرض هوا قرار گرفتن سدیم جلوگیری می کنند سدیمی که درون روکش محدود می شود در دمای بالا به آرامی واکنش نشان داده و ماده ی سبزی تولید می کند که با آب و هوا واکنش نشان نمی دهد. بنابراین میزان کم نشت سدیم را میتوان با محدود کردن آن در روکش مهار کرد. شکل ۳-۳ بخش جانبی لوله های لوپ را ورق های پهن، روکش و نوارهای آلومینیومی به عنوان محدود کننده های سدیم نشان میدهد.

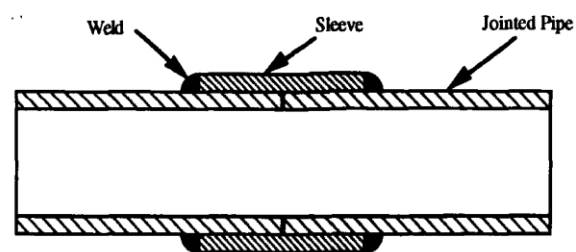


Figure 3.1: A Typical Sleeve Weld.

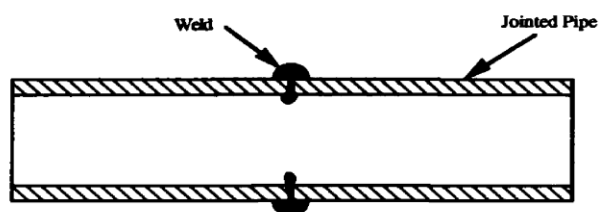


Figure 3.2: A Typical Butt Weld.

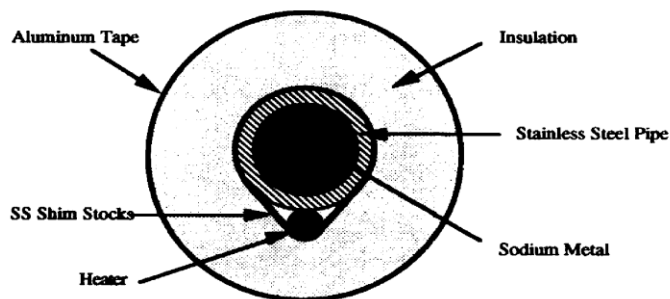


Figure 3.3: Sodium Containment.

علاوه بر سیستم محدودکننده بالا ، گلوله‌های فلزی را نیز میتوان در کفه لوله‌های سدیم لوپ قرار داد این گلوله ها به صورت گودال‌های گرمایی برای خنک سازی/سود کردن سریع یا جامد کردن سدیم مایع نشت کرده، عمل می‌کنند.

۲۰-۳ ردیابی و جلوگیری از نشت

بالاترین دمای سدیم لوپ ($950^{\circ}C$) درجه سانتی گراد در 10 psing بود. در صورتی که روکش یک لایه باشد، با برق ورودی $150V$ ولت میتوان دما را بدون وجود سدیم مایع تا حدود ($920^{\circ}C$) درجه سانتی گراد بالا برد، در صورتیکه اگر روکش دو لایه باشد و از دو گرم کننده خطی استفاده شود میتوان دمایی معادل ($980-1000^{\circ}C$) درجه سانتی گراد بدست آورد. همچنین در صورت عدم وجود سدیم مایع پمپ الکترومغناطیسی مانند یک گرم کننده عمل می کند. بنابراین اگر کاهش ناگهانی در جریان سدیم مایع ردیابی نشود، نتیجه آن فاجعه آمیز خواهد بود.

برای حل این مشکل یک حسگر نصب میشود کار این حسگر اندازه گیری ولتاژ خروجی کنتور جریان الکترومغناطیسی است. اگر میزان ولتاژ خروجی پایین تر از مقداری از قبل تعیین شده، شود حسگر تقویت کننده درونی را فعال میکند تا کل لوپ را ببندد. اگر لوپ بسته شود باید دوباره حسگر را تنظیم کرد تا دوباره لوپ را به کار اندازد. این کار باعث شود که از روشن شدن لوپ قبل از بازرسی کامل آن جلوگیری شود.

دستگاه مشابهی نیز در لوپ نصب شده است که هرگونه نشت و بروز آتش سوزی را ردیابی میکند. پنج ترموکوپل که در بر آمدگی های مختلف لوپ نصب شده اند، به صورت موازی به حسگر دمایی متصل میشوند. آنها در کل متوسط دمای محیط را نشان می دهند جای ترموکوپل ها به شرح زیر است.

۱. درست پایین محل قرارگیری اتاقک آزمایش

۲. درست پایین اتاقک پمپ

۳. پایین سوپاپ مخزن Dump

۴. پایین Economizer و مخزن فشارشکن

۵. نزدیک دریچه خروج بخار در تمام این محل‌ها امکان نشت سدیم وجود دارد. امکان بروز آتش‌وزی بالاتر از سایر قسمت‌ها است حسگر به گونه‌ای تنظیم شده است که در صورتی که دما بالای $(80^{\circ}C)$ درجه سانتی‌گراد برود برق لوپ را قطع کند(زمانی که دمای اتاق آزمایش $(730^{\circ}C)$ درجه سانتی‌گراد و دریچه خروجی هوا تا حدی باز است. دمای لوپ باید در حدود (70°) درجه باشد اگر هر کدام از این ترموکوپل‌ها دمایی غیر عادی و بالاتر از حد معمول ثبت کنند که احتمالاً در نتیجه نشت سدیم مایع داغ یا آتش است، دمای میانگین از دمای تعیین شده بالاتر می‌رود و تقویت کننده داخلی کل لوپ را از کار می‌اندازد.

۳-۲۱- سرد کردن اضطراری

در صورت ایجاد آتش سوزی، کنترل سدیم جامد بسیار بهتر از سدیم مایع است. علاوه بر این، سدیم در دمای پایین خطر کمتری ایجاد میکند در نتیجه سیستم دی‌اکسید کربن مایع را نصب میکنند چون خاصیت خفه‌کنندگی آتش دی‌اکسید کربن اثر کمی بر آتش ناشی از سدیم دارد هدف از هدف این سیستم سرد کردن، جامد کردن بخار و مایع سدیم است با فعال کردن سوئیچ ضامن، دریچه مارپیچی باز میشود و دی‌اکسید کربن مایع را به بخش‌های مختلف لوپ می‌فرستد تا عمل سرد سازی صورت گیرد.

روش دیگر بهره گیری از جریان هوای فشرده لوله ای مسی مسطح است که در پایین مخزن Dump قرار گرفته اند در موقعیت نشت اضطراری سوپاپ مخزن Dump باز شده و سدیم مایع جاری میشود و در اثر نیروی جاذبه وارد این مخزن میشود. در آنجا عمل سرد ساز یبه تدریج توسط هوای فشرده صورت میگیرد.

۳-۲۲- کاهش فشار گاز

در عملیات عادی، فشار گاز پوششی ۵-۸ (psi) میباشد. پایین آوردن این فشار اثر مثبتی بر کاهش میزان نشت دارد. سیستم گاز پوششی در سوپاپ یکی برای مخزن Dump و یکی برای مخزن فشارشکن دارد در شرایط عادی فشار گاز هر دو مخزن یکی است (سوپاپ متعادل کننده گاز باز میشود). بنابراین برای کنترل سیستم فشار گاز فقط نیاز به یک دریچه آزادسازی و یک رگلاتور (regulator) یا تنظیم کننده داریم. چون سیستم گاز پوششی در پایین سیستم لوپ قرار دارد یک شاخه فرعی به سوپاپ مخزن فشار شکن متصل میشود تا امکان دسترسی از بیرون وجود داشته باشد وجود این شاخه فرعی خطر ناشی از باز کردن خود سیستم لوپ هنگام نشت یا آتش سوزی را از میان میبرد.

۳-۲۳- تصفیه (شوینده)

آتش سدیم بخارهای سمی تولید میکند که باید آن ها را از محیط آزمایشگاه زدوده و قبل از آزاد سازی در هوا خنثی کرد یک دمنده با قدرت ۳۶۵۰ cmfs هوا را از خارج ساختمان به سیستم لوپ انتقال میدهد. درون سیستم جریان هوا از درون یک مبادله کننده گرمای پرده دار عبور کرده و قبل از خروج

از دریچه سود و بعد وارد سیستم تصفیه میشود «میزان - آهنگ» میزان جریان هوا توسط یک سوپاپ هوای شیب دار که در پایین دریچه خروجی هوا قرار گرفته است، شکل ۳-۴ جریان هوای سیستم لوپ را نشان میدهد.

هوای آلوده وارد سیستم تصفیه میشود و در آنجا با آبی که از سقف تصفیه پاشیده میشود تماس یافته و خنثی سازی لازم صورت میگیرد. وقتی هوا سیستم تصفیه را ترک میکنند دارای بخار فراوان آب نیز هست که این بخارها در بخش جداکننده (Seperator) از آن جدا میشوند بعد این هوای تصفیه شده به فضای بیرون فرستاده میشود در شکل ۳-۵ طرح جریان آب و هوای سیستم تصفیه ارائه شده است. میزان pH آب سیستم تصفیه اولیه با یک حسگر pH که در ورودی پمپ نصب شده ، کنترل میشود. خروجی این حسگر اطلاعات را به کنترلر pH نصب شده بر روی اتاقک کنترل سیستم لوپ سدیم مایع میدهد. در صورت بروز آتش سوزی، آب با بخار سدیم درون تصفیه خانه اولیه واکنش نشان دهد و بسیار پایه میشود. وقتی میزان pH از حد تعیین شده بالاتر میرود، کنترلر pH پمپ شیمیایی را فعال میکند و این پمپ مقدار مشخصی از اسید هیدرولیک دقیق کننده را به مخزن ذخیره ای اولیه میفرستد.

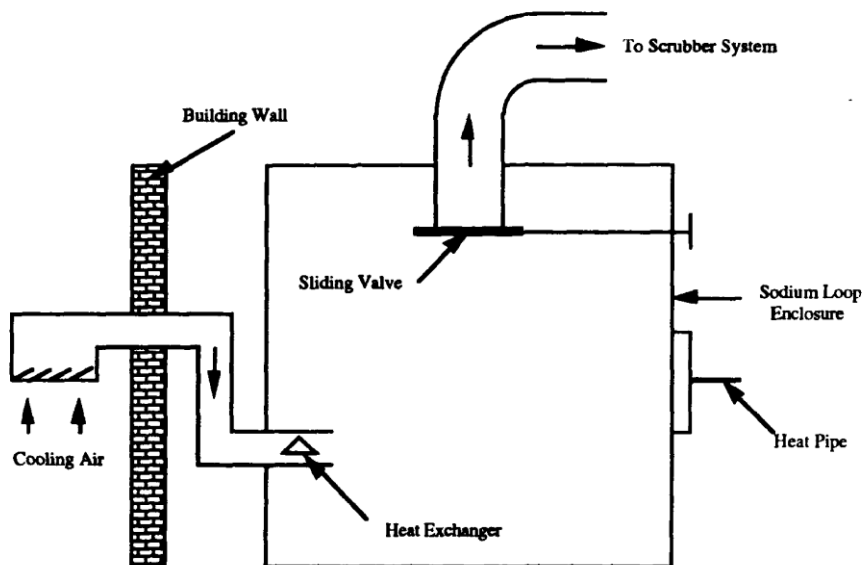


Figure 3.4: Loop Enclosure Air Flow

در صورت کار نکردن سیستم تهویه اولیه ، از سیستم تهویه کمکی استفاده می‌کنیم. فرض در این است که احتمال از کار افتادگی دستگاه دمنده اولیه بسیار کم است، بنابراین فقط در دو صورت سیستم تصفیه اولیه از کار می‌افتد. قطع برق و از کار افتادن پمپ چون قطع برق پمپ را از کار می‌اندازد. نصب یک سوئیچ فشاری در خروجی پمپ هر دو مورد را ردیابی و اعلام میکند وقتی فشار پمپ پایین 40 psig باشد. سوئیچ فشار بسته شده و به سیستم کمکی اجازه میدهد تا با پشتیبانی باتری (120v) دوباره راه اندازی شود یک سوئیچ ضامن بعد از سوئیچ فشار نصب میشود که اجازه خاموش کردن سیستم کمکی به صورت دستی را میدهد

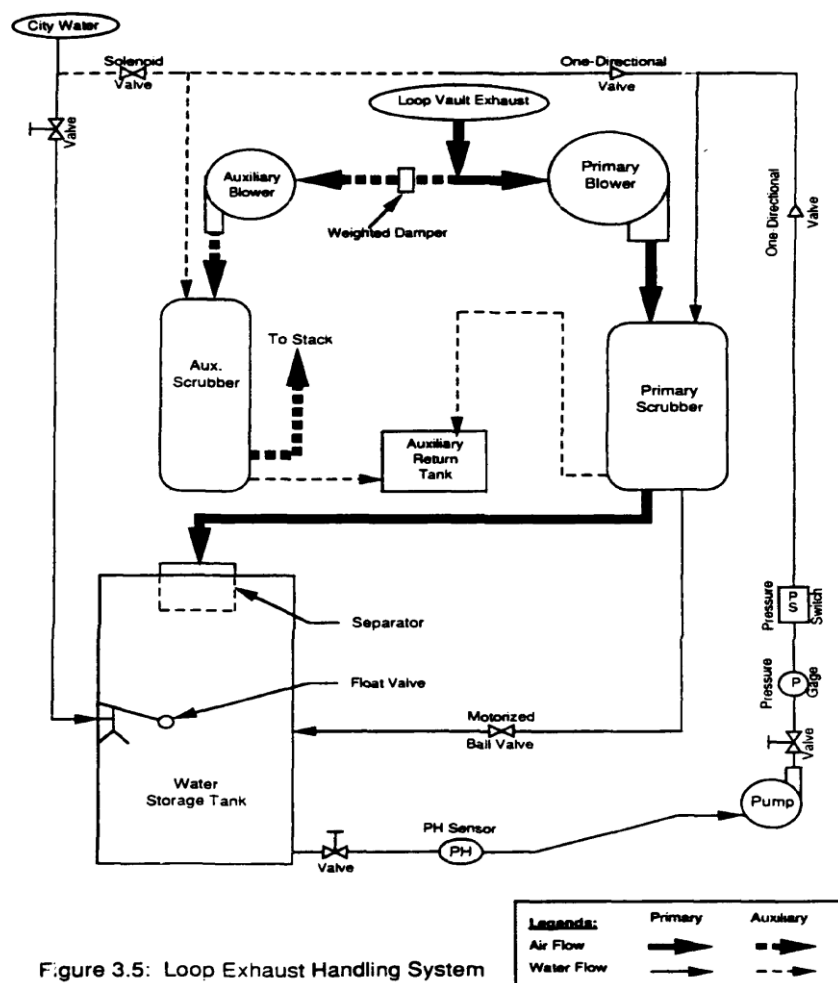


Figure 3.5: Loop Exhaust Handling System

شکل ۳-۶ مدار الکتریکی سیستم تصفیه کمکی را نشان میدهد بعد از فعال سازی (راه اندازی) این سیستم، دستگاه دهنده کمکی روشن میشود، سوپاپ مار پیچ باز شده و آب شهری جایگزین پمپ میشود. سوپاپ گلوله ای بسته میشود آب شهری در هر دو سیستم تصفیه پاشیده میشود در بخش کمکی آب به مخزن ذخیره کمکی می رود در سیستم تصفیه اول بخاطر بسته بودن سوپاپ گلوله ای حجم آب بالارفته و جریان هوا را قطع میکند و سپس در مخزن ذخیره فوران میکند این طراحی برای اطمینان خاطر داشتن از این نکته است که دهنده کمکی هوای سدیم لوپ را میزاداید نه هوای سیستم

تصفیه اول شکل ۳-۷ حجم آب را در سیستم تصفیه اول نشان میدهد در حالی که سیستم کمکی روشن است.

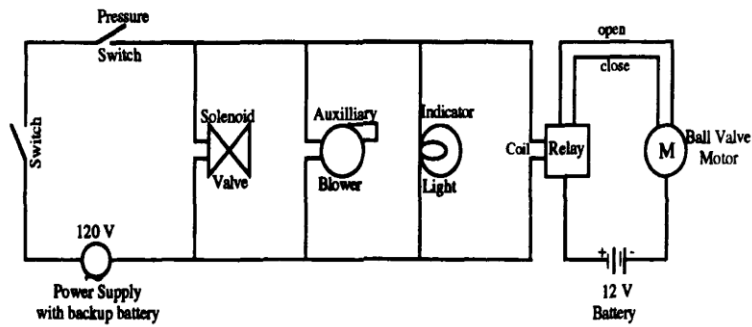


Figure 3.6: Electrical Circuit of the Auxiliary Scrubber System.

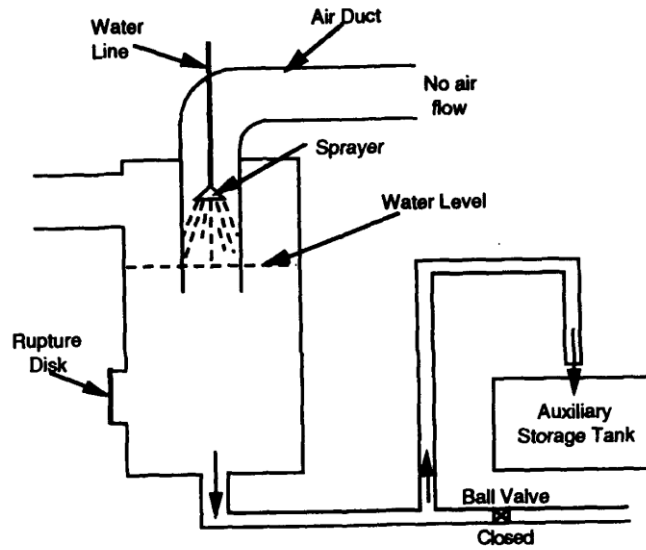


Figure 3.7: Water Level in Primary Scrubber during Auxiliary Cycle

فصل ۴

نتایج

در این فصل ضمن بررسی دقت و حساسیت روش عددی نتایج حاصل از تحلیل عددی پمپ‌های مغناطیسی بدست آمده و توزیع فشار و سرعت محوری تحت نیروهای مختلف مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان این بخش نیز منحنی مشخصه این پمپ‌ها آمده است.

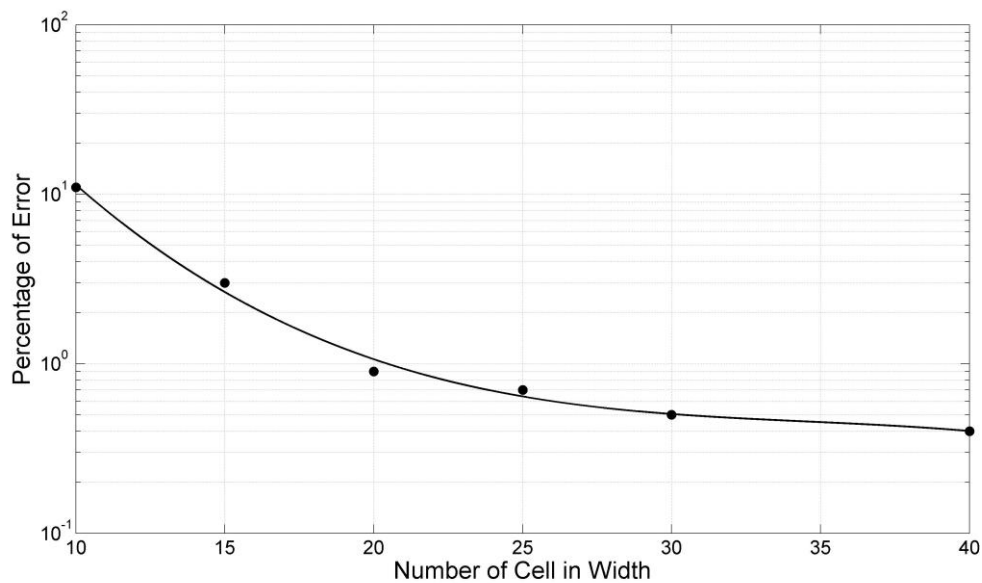
۴-۱- دقت و حساسیت

برای بررسی دقت و حساسیت روش عددی، نتایج حاصل از این تحلیل برای یک کانال مربعی در حالت بدون وجود اثر نیروهای حجمیبدست آمده و پاسخ توسعه یافته آن با نتایج حاصل از روش تحلیلی مقایسه شده است. بطور کلی پروفیل سرعت جریان توسعه یافته در یک کانال مستطیلی از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۳]:

$$u(y, z) = \frac{16a^2}{\mu\pi^3} \left(\frac{-d\hat{p}}{dx} \right) \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} (-1)^{(i-1)/2} \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{i\pi z}{2a}\right)}{\cosh\left(\frac{i\pi b}{2a}\right)} \right] \times \frac{\cos\left(\frac{i\pi y}{2a}\right)}{i^3} \quad (1-4)$$

که در رابطه فوق y و z محورهای گذرنده از مرکز مقطع کانال مستطیلی با ابعاد $2a$ و $2b$ هستند ($-a \leq y \leq a$ و $-b \leq z \leq b$). در شکل (۱-۴) میزان خطای حاصل از روش عددی نسبت به روش تحلیلی به ازای تعداد گره‌ها در هر یک از ابعاد مقطع کانال نشان داده شده است. در اینجا نسبت ۳ برای بعد طولی سلولها به ابعاد آنها در مقطع کانال اعمال شده است، همچنین در

این حالت جریان در عدد رینولدز ۳۰۰ بررسی شده و ابعاد مقطع کانال ۳*۳ سانتیمتر و طول کانال ۷۲ سانتی متر در نظر گرفته شده است. سیال مورد نظر برای این تحلیل پتاسیم مایع در دمای ۹۰۰ درجه فارنهایت ($\rho = 727.2 \text{ kh/m}^3$ و $\mu = 2.56 \times 10^{-7} \text{ pa.s}$) است. مطابق شکل با افزایش تعداد سلولها در ابتدا به شدت از میزان خطا کاسته میشود اما در تعداد سلولهای بالا روند این کاهش چندان قابل توجه نیست. با توجه به شکل به ازای تعداد سلول بیشتر از 20×20 میزان خطای عددی به کمتر از ۱ درصد کاهش می یابد. با توجه به هزینه بالای محاسباتی در تعداد گره های زیاد، حالت 20×20 حالت مناسبی برای تحلیل جریان به نظر میرسد.



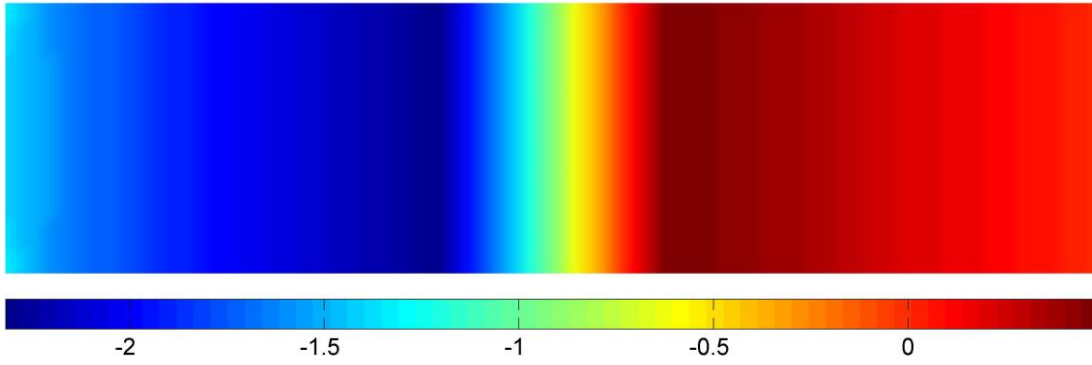
شکل (۴-۱): میزان خطای روش عددی نسبت به روش تحلیلی در حالت $Re = 300$

۴-۲- بررسی کلی جریان در پمپهای مغناطیسی

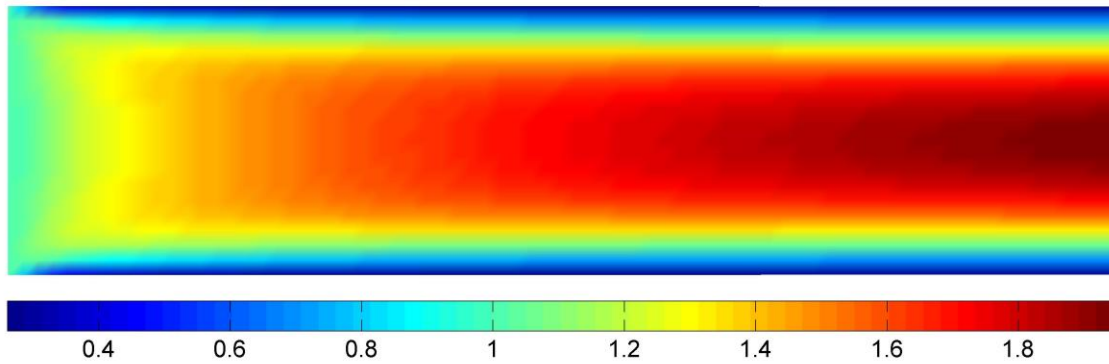
در این بخش جریان سیال پتاسیم مایع در کانالی با ابعاد 3×3 سانتیمتر و طول 40 سانتیمتر در عدد رینولدز 300 بررسی شده است. در این حالت تعداد گره ها در مقطع کانال 20×20 و تعداد سلولها در طول کانال 75 در نظر گرفته شده است. همچنین میدان مغناطیسی در فاصله 16 تا 24 سانتی متری طول کانال با شتاب 2.4273×10^{-4} برقرار است ($F = 1.11$).

در شکل (۲-۴) توزیع فشار استاتیکی بی بعد نشان داده شده است. مطابق شکل در فاصله 16 سانتیمتری ابتدا و 16 سانتیمتری انتهای کانال که در این فواصل میدان مغناطیسی برقرار نیست توزیع فشار مانند کلیه کانال های بسته ای است که فاقد نیروهای حجمی هستند و یک حالت افت فشار را که ناشی از اثرات ویسکوز است نمایش میدهند. اما در بازه 8 سانتیمتری حول مرکز طولی کانال، به دلیل برقرار بودن میدان مغناطیسی فشار استاتیکی بصورت خطی افزایش چشم گیری پیدا میکند. در واقع عملکرد پمپ مغناطیسی در این بازه کاملاً مشهود است. با توجه به شکل، وجود میدان مغناطیسی سبب افزایش فشار جریان (که هدف اصلی برقراری این میدان است) می شود.

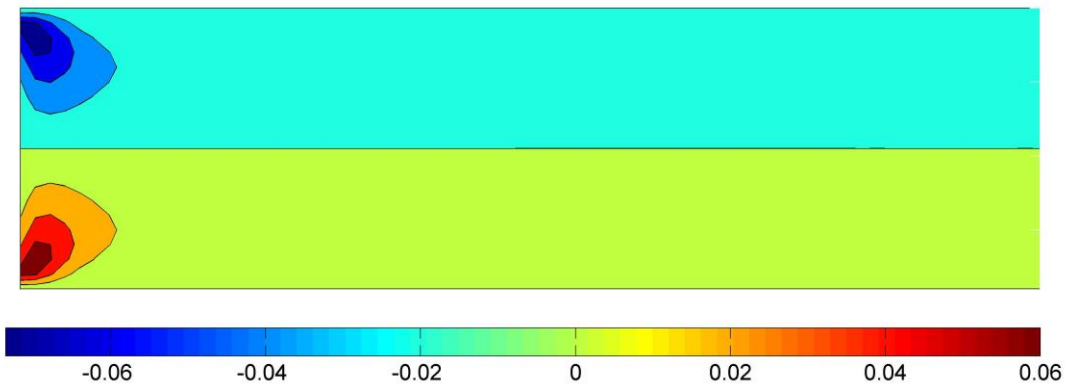
در شکل (۳-۴) و (۴-۴) بترتیب سرعت های محوری و یکی از سرعت های عرضی بصورت بی بعد نشان داده شده است. مطابق شکل وجود میدان مغناطیسی میدان سرعت را چندان تحت تاثیر قرار نمیدهد و میدان سرعت همچنان روند جریان در کانال های بدون نیروی حجمی را تعقیب می کند. بنابراین میدان مغناطیسی تنها با گرادینان فشار محوری بالانس میشود (شکل ۲-۴).



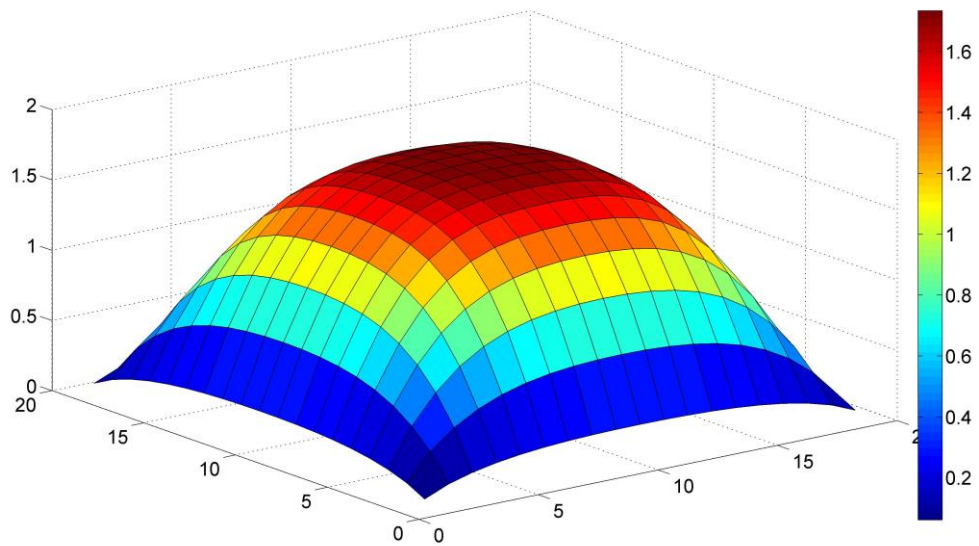
شکل (۲-۴): توزیع فشار استاتیکی در $Re = 300$ و $a_M = 2.4273 \times 10^{-4}$



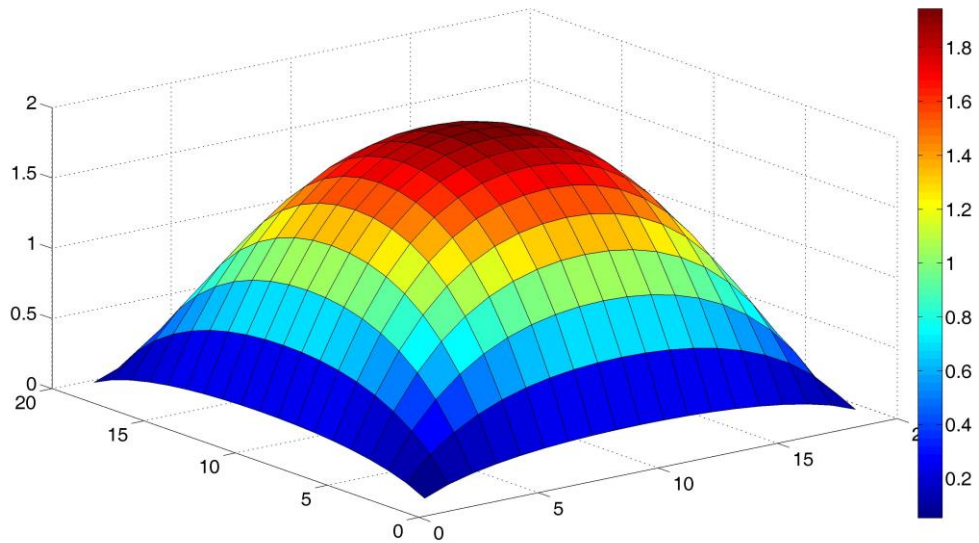
شکل (۳-۴): توزیع سرعت محوری در $Re = 300$ و $a_M = 2.4273 \times 10^{-4}$



شکل (۴-۴): توزیع یکی از سرعت‌های عرضی در $Re = 300$ و $a_M = 2.4273 \times 10^{-4}$



شکل (۴-۵): توزیع سرعت محوری در مقطع میانی در $Re = 300$ و $a_M = 2.4273 \times 10^{-4}$



شکل (۴-۶): توزیع سرعت محوری در مقطع خروجی در $Re = 300$ و $a_M = 2.4273 \times 10^{-4}$

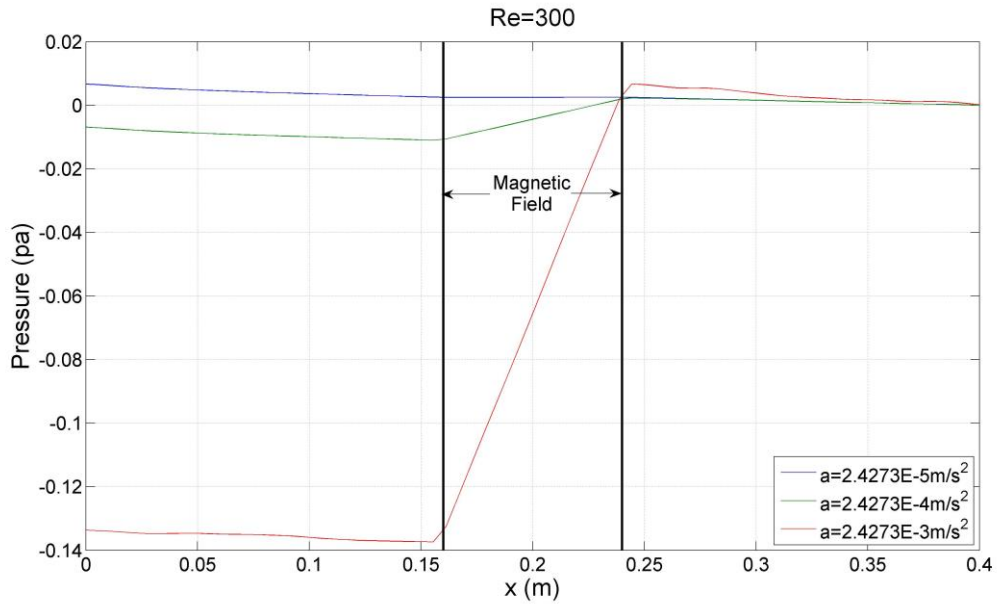
۴-۳- بررسی اثر پارامترهای میدان جریان و میدان مغناطیسی

در این بخش اثر پارامترهای مختلف بر جریان در غالب عدد رینولدز و شتاب میدان مغناطیسی بررسی شده و در پایان منحنی مشخصه پمپ‌های مغناطیسی بدست آمده است.

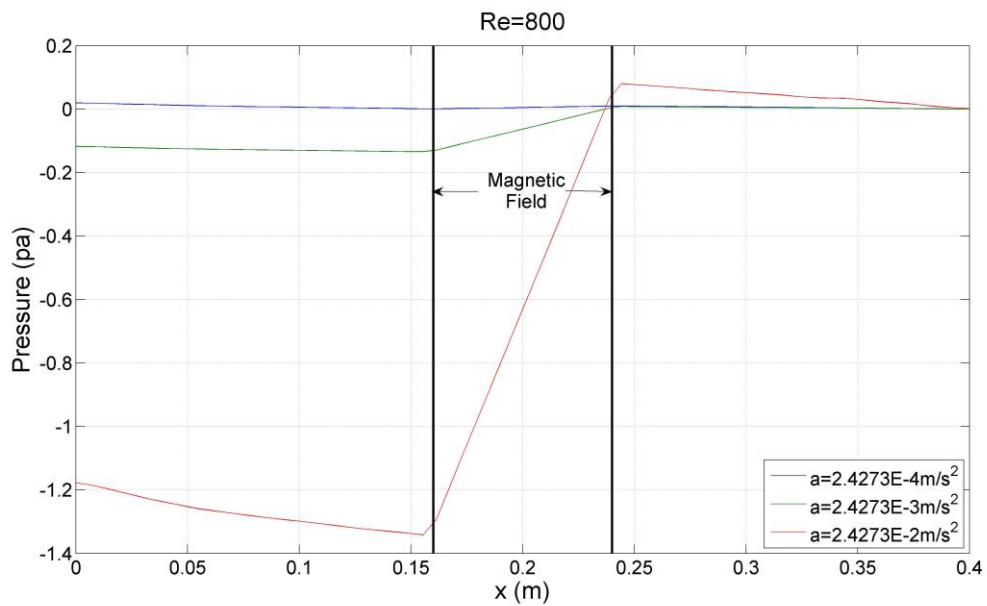
در اشکال (۷-۴) تا (۹-۴) اثر شتاب میدان مغناطیسی در اعداد رینولدز مختلف (در سرعت‌های مختلف برای پتاسیم مایع و در هندسه مشابه بخش ۴-۲) نمایش داده شده است. مطابق شکل در میدان‌های مغناطیسی کوچک اثر افزایشی فشار نسبت به میدانهای مغناطیسی بزرگ بسیار کمتر است. به نحوی که در شتاب‌های مغناطیسی کوچک، افزایش فشار چندان مشهود نبوده و رفتار پمپاژ تنها در میدانهای مغناطیسی بزرگ مشهود است.

در شکل (۱۰-۴) توزیع فشار استاتیکی بی بعد در $Re = 300$ و در دو حالت $a_M = 2.4273 \times 10^{-4}$ و $a_M = 2.4273 \times 10^{-5}$ نشان داده شده است. با توجه با این دو توزیع فشار میتوان دریافت که در حالت میدان مغناطیسی ضعیف، افزایش فشار بسیار کوچک بوده و چندان قابل توجه نیست.

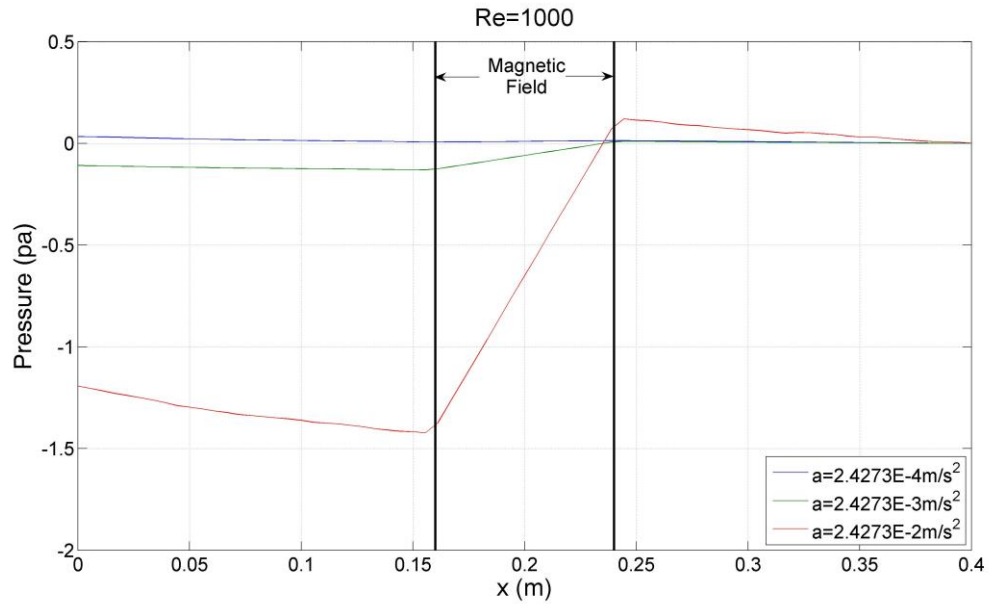
در اشکال (۱۱-۴) تا (۱۳-۴) اثر عدد رینولدز در شتابهای مختلف میدان مغناطیسی بر توزیع فشار محوری نشان داده شده است. مطابق شکل در میدانهای مغناطیسی کوچک اثر افزایش فشار چندان مشهود نیست و افزایش فشار تنها در میدانهای مغناطیسی بزرگ به شکل موثری مشهود است.



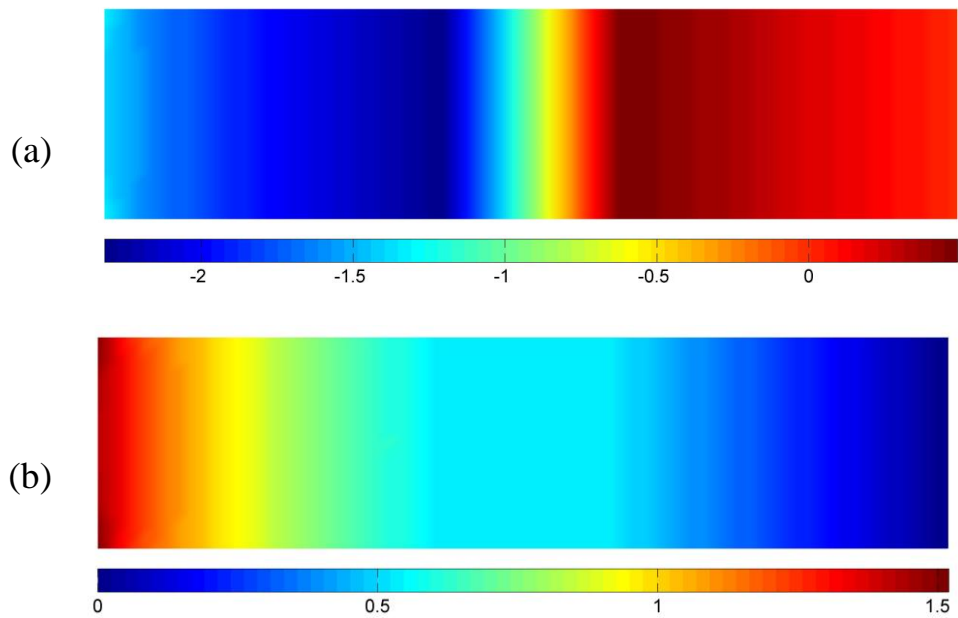
شکل (۴-۷): توزیع فشار در راستای محور طولی کانال
در شتابهای مختلف میدان مغناطیسی و در $Re = 300$



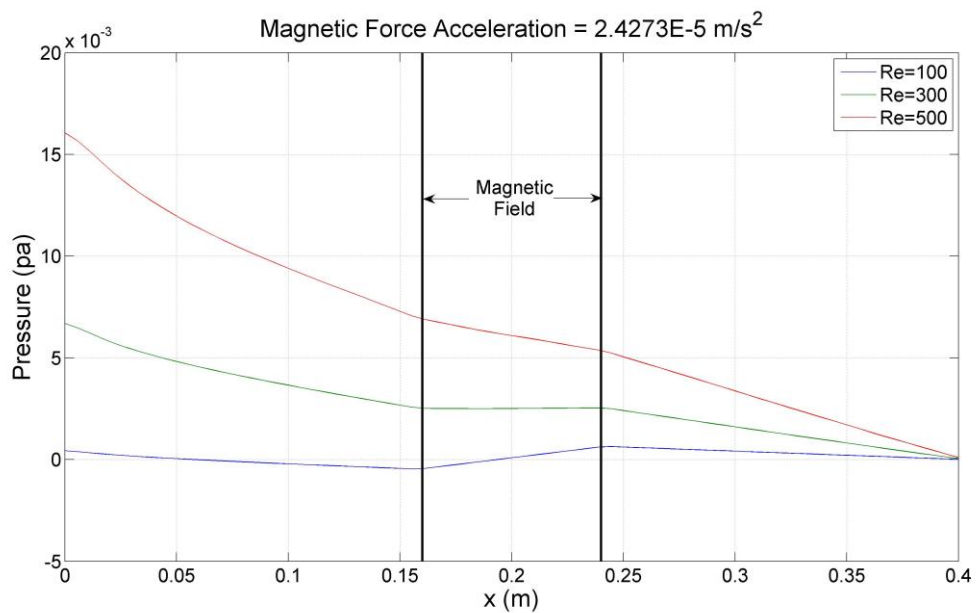
شکل (۴-۸): توزیع فشار در راستای محور طولی کانال
در شتابهای مختلف میدان مغناطیسی و در $Re = 800$



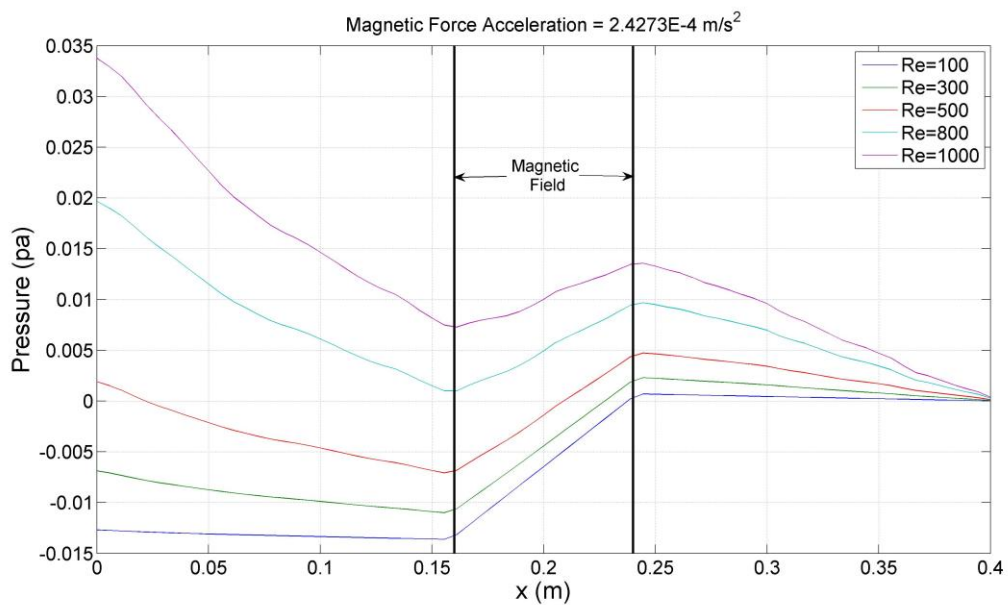
شکل (۴-۹): توزیع فشار در راستای محور طولی کانال
در شتابهای مختلف میدان مغناطیسی و در $Re = 1000$



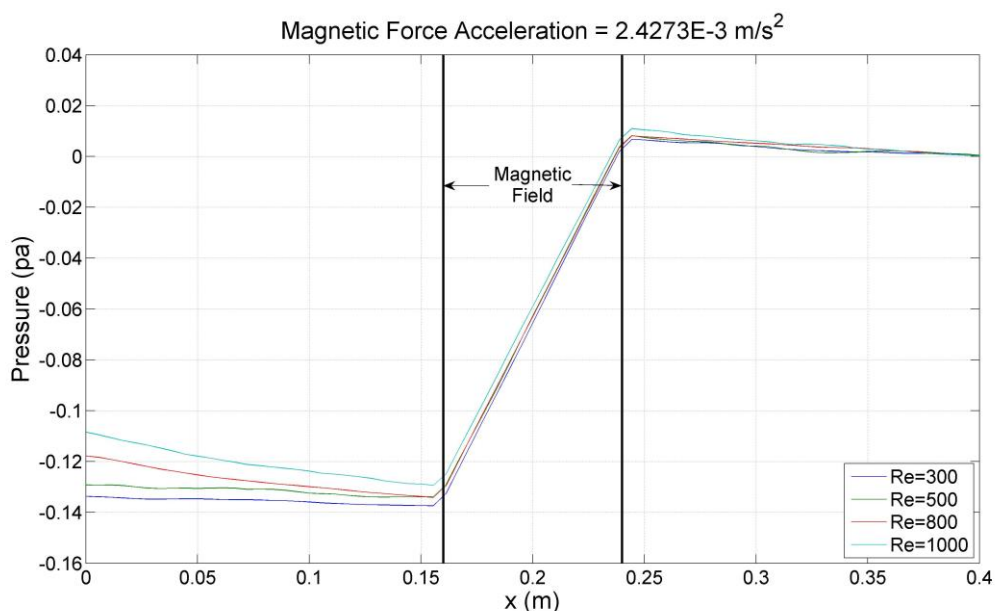
شکل (۴-۱۰): توزیع فشار استاتیکی در $Re = 300$
 $a_M = 2.4273 \times 10^{-5} m/s^2$: (b) و $a_M = 2.4273 \times 10^{-4} m/s^2$: (a)



شکل (۴-۱۱): توزیع فشار در راستای محور طولی کانال
در اعداد رینولدز مختلف و در $a_M = 2.4273 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$



شکل (۴-۱۲): توزیع فشار در راستای محور طولی کانال
در اعداد رینولدز مختلف و در $a_M = 2.4273 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$



شکل (۴-۱۳): توزیع فشار در راستای محور طولی کانال
در اعداد رینولدز مختلف و در $a_M = 2.4273 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$

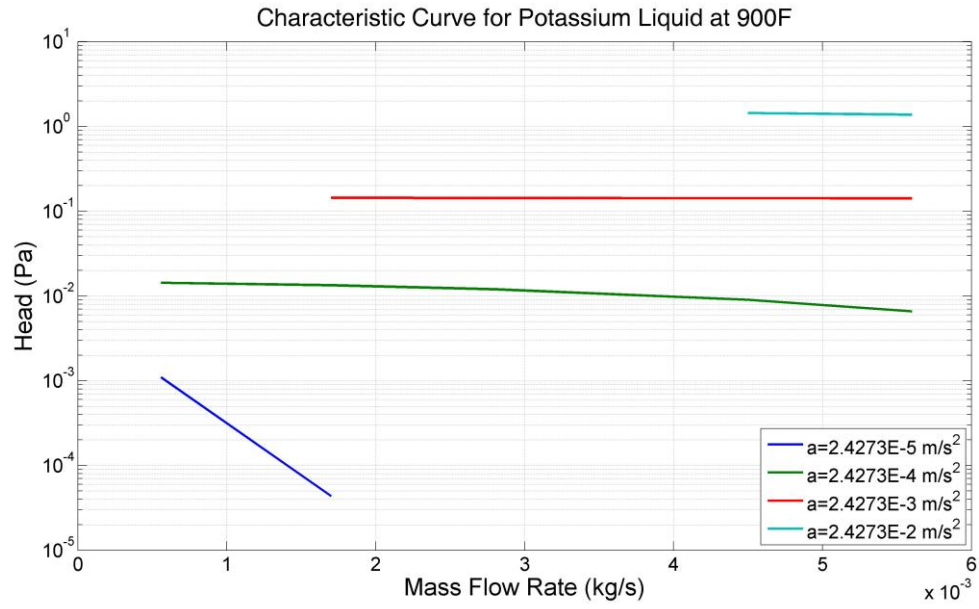
مطابق شکل (۴-۱۱) در میدانهای مغناطیسی $a_M = 2.4273 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (میدان مغناطیسی بسیار کوچک) اثر میدان بر افزایش فشار چندان قابل توجه نیست و با افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش میزان افت فشار کانال، تاثیر این شتاب در افزایش فشار کمتر به چشم میآید. به نحوی که در عدد رینولدز ۱۰۰ این میدان تنها مقدار اندکی فشار را افزایش میدهد اما در اعداد رینولدز بالاتر توانایی غلبه بر افت فشار را از دست میدهد.

در شکل (۴-۱۲) در میدان مغناطیسی $a_M = 2.4273 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ روند مشابهی به چشم میخورد با این تفاوت که در اینجا به دلیل بزرگ بودن نسبی میدان تا عدد رینولدز بزرگ ۱۰۰۰ نیز

افزایش فشار وجود دارد (افزایش محدوده رینولدزی که در آن فشار حاصل از میدان بر افت فشار غلبه می‌کند).

در شکل (۴-۱۳) نیز مقادیر فشار در یک میدان مغناطیسی بسیار بزرگ ($a_M = 2.4273 \times 10^{-3} m/s^2$) نشان داده شده است. مطابق شکل و در محدوده رینولدز نمایش داده شده اثر افزایش فشار میدان بسیار قویتر از اثر افت فشار کانال است و تقریباً در تمامی اعداد رینولدز فشار به میزان یکسانی در ناحیه پمپاژ افزایش می‌یابد. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که در صورت قوی بودن میدان مغناطیسی نسبت به میزان افت فشار، افزایش فشار تا حد قابل توجهی مستقل از عدد رینولدز بوده و بیشتر تابعی از شتاب میدان مغناطیسی است. چنین نتیجه‌ای را میتوان با توجه به عدم تاثیر میدان مغناطیسی بر توزیع سرعت جریان نیز گرفت.

در شکل (۴-۱۴) منحنی مشخصه پمپ مغناطیسی در شتاب‌های مختلف میدان مغناطیسی نشان داده شده است. مطابق شکل میتوان دریافت که در میدان مغناطیسی بسیار ضعیف ($a_M = 2.4273 \times 10^{-5} m/s^2$)، تاثیر پمپ بر جریان بسیار اندک بوده و نیروی پمپاژ عمدتاً صرف غلبه بر افت فشار میشود. اما با افزایش شدت میدان مغناطیسی، این میدان بر افت فشار غلبه می‌یابد و میزان افت منحنی مشخصه در محدوده نشان داده در شکل تنها کاهش اندکی می‌یابد. البته بایستی توجه داشت که تمامی منحنی‌های نشان داده شده در شکل در مقادیر دبی جرمی فراتر از این منحنی دچار افت میشوند (به دلیل افزایش افت فشار در ناحیه پمپاژ).



شکل (۴-۱۴): منحنی مشخصه پمپ مغناطیسی برای پتاسیم مایع در $900F$

1. Verkamp, J.P. and Rhudy, R.G., "Electromagnetic Alkali Metal Pump Research Program," Report NASA CR-380, Contract NAS 3-2543, General Electric Company, February 1966.
2. Blake, L.R., "Conduction and Induction Pumps for Liquid Metals," *Proc. IEE*,
Part A, Vol. 104, No. 13, February 1957.
3. Watt, D.A., "The Design of Electromagnetic Pumps for Liquid Metals," Paper No. 2763, *IEE*, December 1958.
4. "Hastelloy Alloy B", Haynes Stellite Company, 1962.
5. International Nickel Company, "Engineering Properties of Inconel," 1963.
6. Lyon, R.N., Ed., "Liquid Metals Handbook," Revised, Second Edition, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
7. Jackson, C.B., Ed., "Liquid Metals Handbook-Sodium (NaK) Supplement," Third Edition, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
8. *Liquid-Metals Handbook: Sodium-NaK Supplement*, C.B Jackson, ed., Atomic Energy Commission and Department of the Navy, Washington, DC, 1955.
9. Baker, R.S.; and Tessier, M.J.: *Handbook of Electromagnetic Pump Technology*, Elsevier Science Publishing, New York, 1987.
10. Barnes, A.H.: "Direct Current Electromagnetic Pumps," *Nucleonics*, Vol. 11, No. 1, p 16, January 1953.
11. Blake, L.R.: "Conduction and Induction Pumps for Liquid Metals," *Proceedings of the IEE*, 104A, Paper No. 2111 U, p 49, July 1956.
12. Childs, B.M.: "Electromagnetic Pumps and Flow Meters for Fast-Reactor Development," GEC
13. Watt, D.A.: "The Design of Electromagnetic Pumps for Liquid Metals," *Proceedings of IEE*, No. 2763 U, December 1958.
14. Markusic, T.E.; Polzin, K.A.; and Dehoyos, A.: "Electromagnetic Pumps for Conductive-Propellant Feed Systems," 29th International Electric Propulsion Conference, IEPC Paper 2005-295, October 2005.
15. Zargham, F.M.; Atwell, J.C.; Salamah, S.A.; and Sinhg, V.N.: "Thermoelectric Electro-Magneto Pump Design for the SP-100 Reference Flight System," 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol. 2, p 1227, 1989.

16. Barnes, A.H.: "Pumping of Liquid Metals," *International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Vol. 9, p 259, 1955.
17. Gahan, J.W.; Pileggi, P.T.; and Powell, A.H.: "Primary Loop Electromagnetic Pump Design," *NASA Contractor Report CR-1571*, General Electric Co., Cincinnati, OH, June 1970.
18. Cage, J.F.: "Electromagnetic Pumps for High-Temperature Liquid Metal," *Mechanical Engineering*, p 467, June 1953.
19. "Instruction Book for Style VI AC Conduction Electromagnetic Pump," *Creative Engineers, Inc. Phoenix, MD, 2006*.
20. *Special Technical Data 52-365, "T-111, Tantalum Base Alloy Refractory Metal," Westinghouse Electric Corporation, 1963.*
21. Lyon, R.N., Ed., "Liquid Metals Handbook," *Revised, Second Edition, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.*
22. Jackson, C.B., Ed., "Liquid Metals Handbook-Sodium (NaK) Supplement," *Third Edition, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.*
23. White, F.M., "Viscous Fluid Flow", *Second Edition, McGraw-Hill. Inc, 1991.*

اصطلاحات

Triggering	تحريك راه انداز
Tap	سوچاپ توپى
Tapped	جدول درجه اى - طبقه اى
Spool	محور توخالى - قرقره - بولين
Gating	راهگاهى - تعديه
Hollow	پوك - توخالى - حفره اى
Canned	بسته بندى شده - سربسته
Conditioning	تغيير شرايط - بهسازى
Frequency divider	تقسيم كننده بسامد يا تواتر
Can	انبار - ظرف حلبى
Stator core	مغزى استاتور

ضمیمه

```
clear;
% Data
LReal=0.4;
UReal=0.00256;
byReal=0.03;
bzReal=0.03;
nxR=75;
nyR=20;
nzR=20;
DhReal=2*byReal*bzReal/(byReal+bzReal);

dt=0.0005;
nt=30000;
c=20;

% Properties
nu=2.56E-7;
rou=727.2;

% Non_Dimension
Re=UReal*DhReal/nu;
%Pin=PReal/(rou*UReal^2);
L=LReal/DhReal;
by=byReal/DhReal;
bz=bzReal/DhReal;
Dh=1;

x=linspace(0,L,nxR-2);
y=linspace(0,by,nyR-2);
z=linspace(0,bz,nzR-2);

dx=x(2)-x(1);
dy=y(2)-y(1);
dz=z(2)-z(1);
nx=2*nxR-1;
ny=2*nyR-1;
nz=2*nzR-1;

%
*****
**
% Magnet
nx1=60;
nx2=90;
Fsv=2.4273E-5; % shetabe niruye hajmi (m/s^2)
F=Fsv*DhReal/UReal^2;
```

```

% Initial Value
for i=1:nz+1
    u(:,:,i)=ones(nx,ny+1);
    v(:,:,i)=zeros(nx,ny);
    if i~=nz+1
        w(:,:,i)=zeros(nx,ny+1);
        P(:,:,i)=zeros(nx,ny);
    end
end

% Balance
for i=nx1:nx2
    P(i,,:,)=F*(i-nx1+1)*dx/2;
end

%
*****

u0xy=-ones(nx,ny+1);
u0xz=-ones(nx,nz+1);
v0xy=zeros(nx,ny);
v0yz=zeros(ny,nz+1);
w0xz=zeros(nx,nz);
w0yz=zeros(ny+1,nz);

unew=u;
vnew=v;
wnew=w;
Pnew=P;

CBank={};

handle=waitbar(0, 'Please wait...');

for t=1:nt
    % Unew
    for i=1:nxR-2
        for j=1:nyR-1
            for k=1:nzR-1

%*****
                if (2*i+1>=nx1) & (2*i+1<=nx2)
                    FTerm=F;
                else
                    FTerm=0;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

PTermX=(P(2*i+2,2*j,2*k)-P(2*i,2*j,2*k))/dx;
CTerm1X=((u(2*i+3,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j,2*k))^2/4-
(u(2*i+1,2*j,2*k)+...
    u(2*i-1,2*j,2*k))^2/4)/dx;
    if j~=1

CTerm2X=((u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j+2,2*k))*(v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i+
2,2*j+1,2*k))/4-...
    (u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j-
2,2*k))*(v(2*i,2*j-1,2*k)+v(2*i+2,2*j-1,2*k))/4)/dy;
    else

CTerm2X=((u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j+2,2*k))*(v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i+
2,2*j+1,2*k))/4-...
    (u(2*i+1,2*j,2*k)+u0xz(2*i+1,2*k))*(v(2*i,2*j-
1,2*k)+v(2*i+2,2*j-1,2*k))/4)/dy;
    end
    if k~=1

CTerm3X=((u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j,2*k+2))*(w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i+
2,2*j,2*k+1))/4-...
    (u(2*i+1,2*j,2*k-
2)+u(2*i+1,2*j,2*k))*(w(2*i,2*j,2*k-1)+w(2*i+2,2*j,2*k-1))/4)/dz;
    else

CTerm3X=((u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j,2*k+2))*(w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i+
2,2*j,2*k+1))/4-...
    (u0xy(2*i+1,2*j)+u(2*i+1,2*j,2*k))*(w(2*i,2*j,2*k-1)+w(2*i+2,2*j,2*k-
1))/4)/dz;
    end

STerm1X=(u(2*i-1,2*j,2*k)-
2*u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+3,2*j,2*k))/(Re*dx^2);
    if j~=1
        STerm2X=(u(2*i+1,2*j-2,2*k)-
2*u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j+2,2*k))/(Re*dy^2);
        else
            STerm2X=(u0xz(2*i+1,2*k)-
2*u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j+2,2*k))/(Re*dy^2);
            end
            if k~=1
                STerm3X=(u(2*i+1,2*j,2*k-2)-
2*u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j,2*k+2))/(Re*dz^2);
                else
                    STerm3X=(u0xy(2*i+1,2*j)-
2*u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j,2*k+2))/(Re*dz^2);
                    end

%*****
unew(2*i+1,2*j,2*k)=u(2*i+1,2*j,2*k)+dt*(-PTermX-
CTerm1X-CTerm2X-CTerm3X+...
    STerm1X+STerm2X+STerm3X+FTerm);
end

```

```

        end
    end
    if t/10==ceil(t/10);
        u(21,10,10)
    end

                                                                    %Vnew
    for i=1:nxR-2
        for j=1:nyR-2
            for k=1:nzR-1
                PTermY=(P(2*i,2*j+2,2*k)-P(2*i,2*j,2*k))/dy;
                if i~=1

CTerm1Y=((u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j+2,2*k))*(v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i+
2,2*j+1,2*k))/4-...
                (u(2*i-1,2*j,2*k)+u(2*i-
1,2*j+2,2*k))*(v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i-2,2*j+1,2*k))/4)/dx;
                else

CTerm1Y=((u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j+2,2*k))*(v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i+
2,2*j+1,2*k))/4-...
                (u(2*i-1,2*j,2*k)+u(2*i-
1,2*j+2,2*k))*(v(2*i,2*j+1,2*k)+v0yz(2*j+1,2*k))/4)/dx;
                end

                CTerm2Y=((v(2*i,2*j+3,2*k)+v(2*i,2*j+1,2*k))^2/4-
(v(2*i,2*j+1,2*k)+...
                v(2*i,2*j-1,2*k))^2/4)/dy;

                if k~=1

CTerm3Y=((v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i,2*j+1,2*k+2))*(w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i,
2*j+2,2*k+1))/4-...
                (v(2*i,2*j+1,2*k-
2)+v(2*i,2*j+1,2*k))*(w(2*i,2*j,2*k-1)+w(2*i,2*j+2,2*k-1))/4)/dz;
                else

CTerm3Y=((v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i,2*j+1,2*k+2))*(w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i,
2*j+2,2*k+1))/4-...
                (v0xy(2*i,2*j+1)+v(2*i,2*j+1,2*k))*(w(2*i,2*j,2*k-1)+w(2*i,2*j+2,2*k-
1))/4)/dz;
                end

                if i~=1
                    STerm1Y=(v(2*i-2,2*j+1,2*k)-
2*v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i+2,2*j+1,2*k))/(Re*dx^2);
                    else
                        STerm1Y=(v0yz(2*j+1,2*k)-
2*v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i+2,2*j+1,2*k))/(Re*dx^2);
                    end

                    STerm2Y=(v(2*i,2*j-1,2*k)-
2*v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i,2*j+3,2*k))/(Re*dy^2);

                    if k~=1

```

```

        STerm3Y=(v(2*i,2*j+1,2*k-2)-
2*v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i,2*j+1,2*k+2))/(Re*dz^2);
        else
        STerm3Y=(v0xy(2*i,2*j+1)-
2*v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i,2*j+1,2*k+2))/(Re*dz^2);
        end

        vnew(2*i,2*j+1,2*k)=v(2*i,2*j+1,2*k)+dt*(-PTermY-
CTerm1Y-CTerm2Y-CTerm3Y+...
        STerm1Y+STerm2Y+STerm3Y);
    end
end
end

                                % wnew

for i=1:nxR-2
    for j=1:nyR-1
        for k=1:nzR-2
            PTermZ=(P(2*i,2*j,2*k+2)-P(2*i,2*j,2*k))/dz;
            if i~=1

CTerm1Z=((u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j,2*k+2))*(w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i+
2,2*j,2*k+1))/4-...
                (u(2*i-1,2*j,2*k)+u(2*i-1,2*j,2*k+2))*(w(2*i-
2,2*j,2*k+1)+w(2*i,2*j,2*k+1))/4)/dx;
            else

CTerm1Z=((u(2*i+1,2*j,2*k)+u(2*i+1,2*j,2*k+2))*(w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i+
2,2*j,2*k+1))/4-...
                (u(2*i-1,2*j,2*k)+u(2*i-
1,2*j,2*k+2))*(w0yz(2*j,2*k+1)+w(2*i,2*j,2*k+1))/4)/dx;
            end

            if j~=1

CTerm2Z=((v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i,2*j+1,2*k+2))*(w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i,
2*j+2,2*k+1))/4-...
                (v(2*i,2*j-1,2*k)+v(2*i,2*j-
1,2*k+2))*(w(2*i,2*j-2,2*k+1)+w(2*i,2*j,2*k+1))/4)/dy;
            else

CTerm2Z=((v(2*i,2*j+1,2*k)+v(2*i,2*j+1,2*k+2))*(w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i,
2*j+2,2*k+1))/4-...
                (v(2*i,2*j-1,2*k)+v(2*i,2*j-
1,2*k+2))*(w0xz(2*i,2*k+1)+w(2*i,2*j,2*k+1))/4)/dy;
            end

            CTerm3Z=((w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i,2*j,2*k+3))^2/4-...
                (w(2*i,2*j,2*k-1)+w(2*i,2*j,2*k+1))^2/4)/dz;

            if i~=1
                STerm1Z=(w(2*i-2,2*j,2*k+1)-
2*w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i+2,2*j,2*k+1))/(Re*dx^2);
            else
                STerm1Z=(w0yz(2*j,2*k+1)-
2*w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i+2,2*j,2*k+1))/(Re*dx^2);
            end

```

```

        if j~=1
            STerm2Z=(w(2*i,2*j-2,2*k+1) -
2*w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i,2*j+2,2*k+1))/(Re*dy^2);
            else
                STerm2Z=(w0xz(2*i,2*k+1) -
2*w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i,2*j+2,2*k+1))/(Re*dy^2);
            end

            STerm3Z=(w(2*i,2*j,2*k-1) -
2*w(2*i,2*j,2*k+1)+w(2*i,2*j,2*k+3))/(Re*dz^2);

            wnew(2*i,2*j,2*k+1)=w(2*i,2*j,2*k+1)+dt*(-PTermZ-
CTerm1Z-CTerm2Z-CTerm3Z+...
                STerm1Z+STerm2Z+STerm3Z);
        end
    end
end

% BC
% X
unew(1, :, :)=1;
unew(nx, :, :)=unew(nx-2, :, :);

v0yz(:, :)=vnew(2, :, :);
vnew(nx-1, :, :)=0;

w0yz(:, :)=wnew(2, :, :);
wnew(nx-1, :, :)=0;

% Y
vnew(:, 1, :)=0;
vnew(:, ny, :)=0;

u0xz(:, :)=unew(:, 2, :);
unew(:, ny+1, :)=unew(:, ny-1, :);

w0xz(:, :)=wnew(:, 2, :);
wnew(:, ny+1, :)=wnew(:, ny-1, :);

% Z
wnew(:, :, 1)=0;
wnew(:, :, nz)=0;

u0xy(:, :)=unew(:, :, 2);
unew(:, :, nz+1)=unew(:, :, nz-1);

v0xy(:, :)=vnew(:, :, 2);
vnew(:, :, nz+1)=vnew(:, :, nz-1);

% Improve
unew(:, ny+1, nz+1)=unew(:, ny-1, nz+1);

```

```

u=unew;
v=vnew;
w=wnew;

                                %Pnew
for i=1:nxR-1
    for j=1:nyR-1
        for k=1:nzR-1
            Pnew(2*i,2*j,2*k)=P(2*i,2*j,2*k)-
dt*(c^2*(u(2*i+1,2*j,2*k)-u(2*i-1,2*j,2*k))/dx+...
        c^2*(v(2*i,2*j+1,2*k)-v(2*i,2*j-1,2*k))/dy+...
        c^2*(w(2*i,2*j,2*k+1)-w(2*i,2*j,2*k-1))/dz);
        end
    end
end
P=Pnew;

Controls=4000;
if nt>Controls
    if t/Controls==ceil(t/Controls)
        CBankV={u,v,w,P};
        CBank=[CBank;CBankV];
    end
else
    CBankV={u,v,w,P};
    CBank=[CBank;CBankV];
end
waitbar(t/nt,handle);

end
close(handle);
save CMarker3 CBank

```