

طراحی و ساخت موتور القایی خطی به منظور پمپ کردن مایعات خورنده شیمیایی

علی جعفری^۱، محمودرضا حقى فام^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی: ۱۴۳-۱۴۱۱۵

(دریافت مقاله: فروردین ۱۳۸۱، پذیرش مقاله: آذر ۱۳۸۱)

چکیده - در این تحقیق با استفاده از تئوری موتورهای خطی القایی (LIM)، نوعی موتور القایی خطی با ثانویه مایع طراحی و ساخته شده است. هدف اصلی از ساخت این موتور، بررسی امکان پمپاژ برخی مایعات خورنده شیمیایی مانند اسیدها، بازها، برخی سموم کشاورزی یا موارد مشابه است. در طراحی مایعات مذکور جایگزین بخش ثانویه و جامد موتور خطی شده است. تحقیق حاضر در صدد پاسخ به این پرسش است که آیا می‌توان مشابه جامدات به کار رفته در بخش ثانویه موتور خطی، در مایعات نیز با القای جریانهای داخلی و به تبع آن با ایجاد میدان مغناطیسی القایی، نیروی هیدرومکانیکی در آن القا کرد؟ نتایج آزمایشها، پاسخ نسبتاً رضایت بخشی به این پرسش می‌دهد. این نتایج بویژه برای مایعات با هدایت بهتر الکتریکی، جواب قابل قبول‌تری را نشان می‌دهد. با تکمیل و بهینه‌سازی نتایج حاصل از تحقیق حاضر می‌توان برای پمپ کردن مایعات خورنده شیمیایی بویژه در مواردی که پمپ کردن، بدون تماس مکانیکی (بدون نیاز به تماس مایع با پره‌های پمپ) از اهمیت بالایی برخوردار باشد استفاده کرد.

کلید واژگان: موتورهای خطی، پمپ مغناطیسی، مایعات شیمیایی.

۱- مقدمه

موتور القایی موتوری است که جریان AC به‌طور مستقیم استاتور را تغذیه کرده و رتور با عمل القا یا ترانسفورماتوری از طریق استاتور، انرژی دار می‌شود [۱]. هر چند مبنای کار موتورهای القایی برگرفته از اولین موتور الکتریکی است که در سال ۱۸۳۱ توسط فارادی ساخته شد، اما اختراع اولین موتور القایی در سال ۱۸۹۱ توسط فلمینگ به ثبت رسیده است [۲]. از آن زمان تا کنون نقش موتورهای القایی در زندگی بشر، بویژه در کارخانه‌ها و فرایند خودکارسازی تولید صنعتی و کشاورزی روز به روز در حال تکامل است [۳]. به‌طور کلی موتورهای الکتریکی

القایی را به دو نوع عمومی و مخصوص تقسیم بندی می‌کنند. نوع عمومی که ممکن است دارای رتور قفسه سنجایی یا رتور سیم پیچی شده باشند، بر مبنای تئوری میدانهای دوار مغناطیسی عمل می‌کنند [۴]. این نوع موتورها بیشترین کاربرد را در بخشهای مختلف صنعت و کشاورزی دارند [۳]. اما نوع مخصوص ماشینهای القایی کاربردهای ویژه ای دارند. هر چند مبنای تئوری کار آنها با سایر موتورهای القایی یکسان است، اما برخی ویژگیها در رفتار آنها موجب شده تا نامی مخصوص بر آنها گذاشته شود. برای شناخت این دسته از موتورها و انواع و کاربردهای خاص آن، مراجع [۵ و ۶] معرفی می‌شود. به‌علت ارتباط

می‌شود که آیا با استفاده از موتورهای القایی خطی، می‌توان مانند جسم جامد، حرکت در خط مستقیم را به مایع نیز وارد کرد؟ پاسخ به این پرسش موضوع تحقیق حاضر است. بدیهی است که در صورت امکان، کاربردهای بسیار گوناگون و جدیدی برای آن متصور می‌گردد که از آن جمله می‌توان به مواردی مانند پمپ کردن مایع‌های خورنده (مانند سموم یا کودهای مایع کشاورزی، اسیدها، بازها) و همچنین پمپ کردن مایع‌های خوراکی در کارخانه‌های تبدیل محصولات کشاورزی (مانند پمپ کردن آلبیمو و آب سرکه) اشاره کرد. برای بررسی این موضوع، ابتدا به سابقه تحقیقات مرتبط با ویژگیهای رفتار سیال (مایع یا گاز) در مجاورت میدان مغناطیسی می‌پردازیم. به‌طور کلی می‌توان گفت که در این زمینه تحقیقات چندانی انجام نشده است. اولین بار در سال ۱۹۶۰ در آمریکا، رفتار گازهای یونیزه در مجاورت میدان مغناطیسی بررسی و در نتیجه مولدهای تولید انرژی الکتریکی به نام مگنتو هیدرو دینامیک (M.H.D) ساخته شد [۱۲]. در خصوص مگنتو هیدرو دینامیک، تحقیقات بیشتری نیز انجام شده که از آن جمله می‌توان به مطالعات جنین و کراستوشچکوف^۲ در سال ۱۹۹۰ با عنوان "هیدرو دینامیک و مبادله گرمایی در سیال درون لوله، در مجاورت میدان مغناطیسی" [۱۳] و همچنین مطالعات استانسلاو^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۸ با عنوان "تحلیل ریاضی در مورد فشار سیالات مگنتو هیدرو دینامیک" [۱۴] و همچنین تحقیقات تامسون^۴ در همان سال با عنوان "اثرات القایی توسط مغناطیس در سیالات فرومگنتیک" اشاره کرد [۱۵].

یکی از آخرین تحقیقات انجام شده در زمینه پمپ‌های مغناطیسی، اختراع نوع خاصی پمپ مغناطیسی توسط جان اف راج در سی ام ماه می سال ۲۰۰۰ است [۱۶]. هدف وی

تحقیق حاضر با موتورهای خطی (بویژه موتورهای القایی خطی) ضمن معرفی اجمالی آن، اشاره‌ای کوتاه به سابقه و کاربردهای آن داریم.

در تعریف موتور خطی بیان شده که دسته‌ای از موتورهای مخصوص الکتریکی است که در آن انرژی الکتریکی مستقیماً به حرکت مکانیکی تبدیل می‌شود [۷]. به عبارت بهتر موتورهای خطی نوعی موتور دورانی هستند که استاتور آن به صورت مسطح در آمده باشد. تقسیم بندیهای مختلفی برای این موتورها ارائه شده است یکی از ساده ترین تقسیم‌ها عبارت است از: ۱- موتورهای DC خطی (LDM) ۲- موتورهای القایی خطی (LIM) ۳- موتورهای سنکرون خطی (LSM) (شامل نوع رلوکتانسی و پله‌ای) ۴- موتورهای نوسانی خطی ۵- موتورهای هیبریدی. برای شناخت بهتر این انواع به مراجع [۷ و ۸] می‌توان رجوع کرد. در اینجا لازم است توضیح داده شود که مشهورترین موتور خطی، نوع القایی است (یعنی LIM). پیشنهاد ساخت موتور القایی خطی اولین بار توسط وستون^۱ در سال ۱۸۴۱ ارائه شده است [۹]. ساخت اولین LIM نیز در سال ۱۸۹۰ به ثبت رسیده است [۱۰]. از آن زمان تا کنون کاربردهای بسیار زیادی برای موتورهای خطی ارائه شده است. برای نمونه می‌توان به کاربردهایی مانند قطارهای مغناطیسی، پرواز دهنده های سریع هواپیماها، نقاله‌ها، بالابرها و آسانسورها، دستگاههای تمیزش (جداکننده‌ها)، آسیابهای برقی، چکش‌های برقی، سیستمهای اتوماتیک صنعتی اره‌های برقی، رباتها، آزمایشگاههای تست شتاب بالا، شیکرها و ارتعاشگر اشاره کرد [۱۱].

نکته جالب توجه در تمامی موارد فوق، این است که در موتورهای القایی خطی، انرژی الکتریکی مستقیماً به حرکت خطی جسم جامد تبدیل شده و به تبع آن کاربردهای گوناگونی ایجاد شده است. اکنون این سؤال اساسی مطرح

2. Genin and Krasnoshechekova

3. Stanislaw

4. Thompson

1. Wheatstone

در این تحقیق ساختن نوعی پمپ مخصوص مغناطیسی برای حرکت مایع در مداری بسته، به منظور تولید ضربانهای خاص است. آبراهام پی لی و همکاران با پیگیری مطالعات جان اف راج، اختراع دیگری با عنوان "سنسورها و محرکهای مگنتوهیدرودینامیک" را در ۱۴ نوامبر سال ۲۰۰۰ در امریکا به ثبت رساندند [۱۷]. هدف از این اختراع، ساخت میکرو پمپ هیدرودینامیکی برای پمپ کردن، دبی سنجی مایع‌ها در سیستمهای میکرو فلوئیدی است. منظور از سیستمهای میکرو فلوئیدی، جریان سیال در کانالها و مسیرهای بسیار کوچک، برای مثال در ابزارهای بیولوژیکی است. لازم است توضیح داده شود که جابه‌جایی سیال با استفاده از پمپهای معمولی - که موجب به هم خوردن سیال می‌شود - در بیوتکنولوژی مشکلاتی را به وجود می‌آورد. مکانیزم اختراع وی، عبور سیال از درون کانال مربعی شکل، در معرض میدانهای مغناطیسی و جریان الکتریکی عمود بر هم، است. حال با توجه به سابقه تحقیقات، قصد داریم با ساخت موتور خطی مخصوص با ثانویه مایع، به دو پرسش اساسی زیر پاسخ دهیم:

۱. آیا با استفاده از تئوری موتورهای خطی القایی، امکان القای نیروی مکانیکی به یک مایع (مشابه بخش ثانویه فلزی در موتورهای خطی) وجود دارد؟
۲. در صورتی که پاسخ سوال اول مثبت باشد، آیا روابط حاکم در حالتی که ثانویه جامد باشد، برای حالت مایع نیز قابل استفاده است؟

روش به کار رفته در تحقیق حاضر برای پاسخ به دو سوال فوق بدین صورت است که ابتدا با استفاده از تئوری موتورهای خطی الکتریکی، موتور القایی خطی طراحی و ساخته شده است. برای پاسخگویی به سوال اول، در ثانویه موتور خطی مذکور، به جای فلزات جامد، از مایعات مورد آزمون استفاده می‌شود. سپس با توجه به در دست بودن روابط حاکم بر موتورهای خطی در حالت جامد فلزی، این محاسبات برای یافتن مقدار نیرو در واحد سطح القایی

(فشار القایی) به بخش ثانویه، برای چند مایع شیمیایی مختلف محاسبه و نتایج بدست آمده، با مقادیر حاصل از آزمایش‌ها مقایسه می‌شود. بدین ترتیب با رسم خط برازش بین نتایج آزمایشها و محاسبات تئوری و با توجه به ضریب همبستگی حاصل، به سوال دوم مبنی بر قابل استفاده بودن روابط تئوری موتورهای خطی در حالت جامد، برای حالت مایع می‌توان پاسخ گفت.

۲- روابط حاکم بر موتورهای خطی

شکل ۱ تصویری از طرحواره موتور خطی دو قطبه و شش شیاره، از نوع دوطرفه با ثانویه جامد فلزی را نشان می‌دهد. فرض می‌شود به اولیه موتور خطی، جریانی سه فاز وارد شده و بخش ثانویه با فاصله هوایی معینی بر روی بخش اولیه قرار گرفته باشد. با استفاده از تئوری ماشینهای القایی می‌دانیم که در بخش اولیه موتور خطی، یک موج سیار مغناطیسی در امتداد طولی دستگاه ایجاد می‌شود [۴].

به عبارت بهتر به نظر می‌رسد که در بخش اولیه، یک آهنربای مجازی با سرعت U_s در طول موتور خطی حرکت می‌کند. سرعت آهنربای مجازی مذکور از لحاظ تئوری به فرکانس جریان و فاصله دو قطب طبق رابطه زیر بستگی دارد [۷].

$$u_s = 2\tau f = \lambda f \quad (1)$$

τ : گام قطب (گام کلایف)

λ : فاصله دو قطب (طول موج)

f : فرکانس برق

اگر فرض کنیم بخش ثانویه با سرعت u در طول موتور در حال حرکت باشد، آنگاه درصد اختلاف سرعت بخش ثانویه با سرعت آهنربای مجازی را مطابق رابطه زیر لغزش می‌نامند [۴].

$$s = \frac{u_s - u}{u_s} \quad (2)$$

اکنون به حرکت آهنربای مجازی در مجاورت بخش ثانویه

همچنان ادامه داشته باشد لازم است برطبق KCL، جریان i و چگالی جریان j بر طبق روابط زیر، در ثانویه جاری باشد [۱۲].

$$i = \frac{e_{ind} - BUR}{R} \quad (۷)$$

$$j = \frac{(e_{ind} - BUR)\sigma}{R} \quad (۸)$$

بدیهی است در ابتدای اتصال سیمهای استاتور به شبکه سه فاز، مقدار سرعت U ، صفر و $S = 1$ است. لذا e_{ind} و جریان i (و چگالی جریان j) بیشینه است. در حالی که سرعت ثانویه به سرعت حرکت آهنربای مجازی نزدیک شود (یعنی $u = u_s$) آنگاه $S = 0$ و متناظر با آن e_{ind} و i برابر صفر است. بنابراین ثانویه با سرعتی کمتر از u_s می‌تواند به حرکت خود ادامه دهد [۴].

اکنون فرض می‌کنیم ثانویه با سرعت U ($U < u_s$) در حرکت بوده و جریان i (و چگالی نظیر جریان j) در المان ثانویه موجود باشد. آنگاه برطبق رابطه لورنتس نیروی زیر به المان ثانویه وارد می‌شود [۱۹].

$$df = Bib = B(jdA) b \quad (۹)$$

اکنون با استفاده از روابط (۳) و (۶) و (۹) داریم:

$$df = B \left(\frac{\sigma e_{ind}}{b} \right) dA \cdot b = B \left(\frac{BSU_s b}{b} dA \cdot b \right) \quad (۱۰)$$

$$df = B^2 \sigma U_s b dA \quad (۱۱)$$

معادله (۱۱) نیروی وارد شده بر المان فرضی ثانویه را نشان می‌دهد. برای اینکه کل نیروی وارد شده بر ثانویه محاسبه شود، لازم است از معادله فوق در کل مساحت $kh\lambda$ انتگرال گیری شود. (در معادله فوق λ (تعداد شیار استاتور) $k =$ بوده و $c = k\lambda$ طول بعد استاتور است. در شکل (۱) $k = 1$ است.)

$$F = \int_{y=\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{x=0}^{\lambda} B^2 \sigma U_s b dx dy \quad (۱۲)$$

اما می‌دانیم که جریان استاتور سینوسی بوده و متناظر با آن

توجه می‌کنیم. برای این منظور در شکل ۱ به یک المان فرضی ثانویه در امتداد محور Z ها - که با سرعت ثابت u در امتداد محور X ها در حرکت است - نظر می‌افکنیم. با توجه به روابط مقدماتی الکترومغناطیس، انتظار می‌رود که با حرکت آهنربای فرضی ولتاژ زیر در المان مذکور القا شود [۱]:

$$e_{ind} = BSU_s b \quad (۳)$$

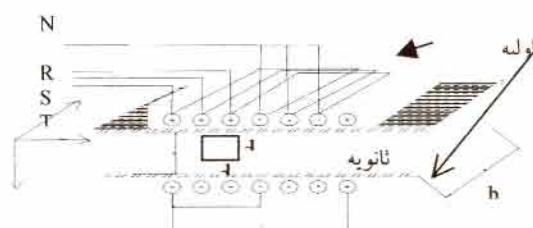
که در آن:

B : چگالی شار مغناطیسی

S : درصد لغزش

U_s : سرعت سنکرون

b : عرض موتور خطی



شکل ۱ طرحواره موتور القای خطی دو طرفه

القای ولتاژ فوق موجب می‌شود که جریان i و چگالی جریان j مطابق روابط زیر در المان مذکور جاری شود [۱۲]:

$$i = \frac{V}{R} \quad (۴)$$

$$jdA = \frac{e_{ind}}{b} \quad (۵)$$

$$j = \frac{\sigma e_{ind}}{b} \quad (۶)$$

که در آن σ هدایت الکتریکی بخش ثانویه است.

از طرفی از ابتدا فرض کردیم که ثانویه با سرعت ثابت u در حال حرکت است. حال اگر بخواهیم حرکت مذکور

39×12 و ابعاد ثانویه 39×12×0.2 Cm است. همچنین ابعاد هر شیار 0.5×2 Cm و فاصله دو شیار متوالی 1Cm بوده و بنابراین گام شیارها 1/5Cm است.

ب- نوع سیم پیچی اولیه (پخشی یا متمرکز همچنین یک طبقه یا دو طبقه): نوع سیم پیچی انتخابی، پخشی و یک طبقه بوده است.

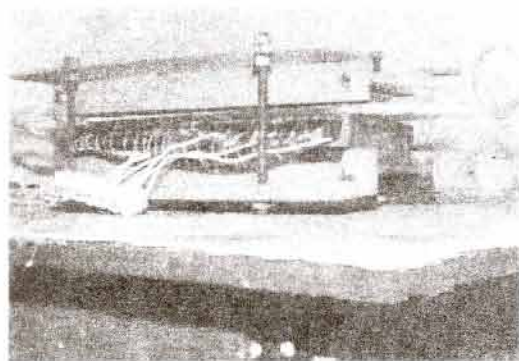
ج- نوع ثانویه (قفسه سنجابی یا هادی پیوسته، یک لایه یا دولایه): بدیهی است در پمپ مغناطیسی طراحی شده، نوع ثانویه از نوع هادی پیوسته و یک لایه است.

د- فرکانس f و تعداد فاز m: فرکانس پمپ مغناطیسی 50 هرتز و سه فاز است.

ه- ولتاژ ورودی و نوع اتصال اولیه: ولتاژ ورودی 220/380 و نوع سیم پیچی اولیه از نوع مثلث انتخاب شده است. و- انتظار مدت زمان کاری: از آنجا که مدل ساخته شده جنبه آزمایشگاهی داشته، لذا برای مدت زمان کاری کوتاه در نظر گرفته شده است.

ز- نوع عایق کاری (عالی یا معمولی): نوع عایق کاری پمپ مغناطیسی به دلیل دست ساز بودن از نوع معمولی است.

ح- تعداد قطب: پمپ مغناطیسی دو قطب در نظر گرفته شده است؛ یعنی 2p=2.



شکل ۲ تصویر موتور خطی ساخته شده

چگالی شار مغناطیسی B نیز سینوسی است. یعنی:

$$B = B_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (12)$$

بنابراین به جای B در معادله (۱۲)، مقدار متوسط آن را یعنی

$$B_{avg} = \frac{B_m}{\sqrt{2}}$$

$$F_{(N)} = \frac{B_m^2}{2} \sigma S U_s b k \lambda h \quad (14)$$

معادله (۱۴) نیروی متوسط وارد شده به حجم ثانویه درون موتور خطی را در هر لحظه نشان می‌دهد. برای محاسبه فشار القایی بر ثانویه، نیروی القایی را بر سطح مقطع ثانویه تقسیم می‌کنیم:

$$P_{pa} = \frac{B_m^2}{2} \sigma S U_s K \lambda \quad (15)$$

از طرفی بر طبق معادله (۲) سرعت واقعی ثانویه برابر $U = U_s(1-S)$ است، لذا توان مکانیکی تولید شده توسط موتور عبارت است از:

$$Power = FU = \frac{B_m^2}{2} \sigma U_s^2 S(1-S) b K \lambda h \quad (16)$$

۳- روش طراحی و ساخت پمپ مغناطیسی خطی

روش محاسبه و طراحی پمپ مغناطیسی القایی خطی، مشابه طراحی هر دستگاه الکترومغناطیسی دیگری است. به طور کلی در این طراحی‌ها، لازم است مجموعه معادلات $Y=AX$ محاسبه شود که در آن X مجموعه داده‌های طراحی ورودی، A مجموعه دستورها و معادلات ریاضی مرتبط با ادوات الکترومغناطیسی و Y مجموعه نتایج داده‌های خروجی حاصل از طراحی، است [۷].

در طراحی پمپ یا موتور خطی القایی حاضر (که در شکل ۲ نشان داده شده است)، داده‌های ورودی طراحی عبارتند از:

الف- ابعاد هندسی دستگاه: ابعاد اولیه پمپ 5 Cm×

یعنی:

$$N_1 = 65 \times 4 = 260 \text{ turns}$$

سرعت سنکرون: سرعت سنکرون از رابطه ۱ چنین به دست می‌آید:

$$U_s = 2\pi f = 2 \times 18 \times 50 = 1800 \text{ cm/sec} = 18 \text{ m/sec}$$

چگالی جریان الکتریکی مؤثر j در بخش اولیه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$j = \frac{\sqrt{2} m I N_1}{\tau 2 p} \quad (17)$$

که در آن:

m : تعداد فاز

I : جریان ورودی

بنابر این:

$$j = \frac{\sqrt{2} \times 3 \times 15 \times 260}{18 \times 2} = 460 \text{ A/cm}^2$$

شار مغناطیسی تولید شده در اولیه (φ): شار مغناطیسی تولیدی در اولیه مشابه موتورهاى القایى از رابطه زیر به دست می‌آید [۷].

$$\varphi = \frac{E_{eff}}{\sqrt{3} \sqrt{2} \pi N_1 f} \quad (\text{برای حالت ستاره}) \quad (18)$$

$$\varphi = \frac{E_{eff}}{\sqrt{3} \pi N_1 f} \quad (\text{برای حالت مثلث}) \quad (19)$$

از آنجا که سیم بندی پمپ مغناطیسی از نوع مثلث انتخاب شده، داریم:

$$\varphi = \frac{E_{eff}}{\sqrt{3} \pi N_1 f} = \frac{220}{\sqrt{3} \pi \times 260 \times 50} = 0.0031 \text{ Web}$$

چگالی شار مغناطیسی B_{mz} : چگالی شار مغناطیسی در امتداد محور z ها چنین محاسبه می‌شود [۷]:

اکنون به شرح محاسبات طراحی می‌پردازیم [۷]:

تعداد شیارها (Z): تعداد شیارها با توجه به ابعاد هندسی مدل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = \frac{\text{فاصله دو شیار} \times 2(2-3.8) - \text{طول پمپ خطی}}{\text{عرض هر شیار} + \text{فاصله دو شیار}} = \frac{1+0.5}{1+0.5} = 24$$

گام قطبی (گام کلایف): گام قطبی چنین محاسبه می‌شود [۷]:
بر حسب تعداد شیار:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{2} = 12$$

بر حسب سانتیمتر:

$$\tau = 12 \times (\text{عرض هر شیار} + \text{فاصله دو شیار}) = 12 \times 1.5 = 18 \text{ cm}$$

فاصله دو قطب λ :

$$\lambda = 2 \times \tau = 2 \times 18 = 36 \text{ cm}$$

تعداد شیار زیر هر قطب q (تعداد کلایف هر قطب):

این پارامتر طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$q = \frac{Z}{2p.m} = \frac{24}{2 \times 3} = 4$$

تعداد دور هر کلایف (N):

مساحت هر شیار

$$N = \frac{\text{ضرب تارکیم سیم پیچی}}{(\text{قطر سیم})^2} \times \text{مساحت هر شیار}$$

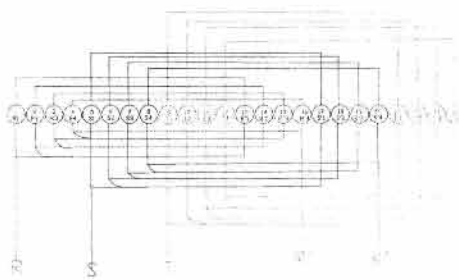
$$\frac{20 \times 5}{0.95^2} \times 0.6 \approx 65$$

قطر سیم انتخاب شده برابر 0.95mm است.

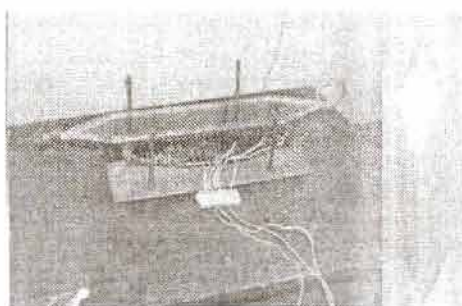
ضرب تارکیم سیم پیچی در موتورهای الکتریکی، بر حسب دقت سیم پیچی و تعداد و قطر عایق‌های نسوز، به‌طور تجربی بین ۰/۶ تا ۰/۸ انتخاب می‌شود.

تعداد دور هر فاز (N_1): تعداد دور هر فاز از حاصل ضرب تعداد کلایف هر فاز در تعداد دور هر کلایف به دست می‌آید.

خلاصه نتایج محاسبات آن در جدول ۱ آمده است. نقشه فنی سیم پیچی پمپ مغناطیسی در شکل ۳ و تصویر پمپ مغناطیسی ساخته شده در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۳ نقشه فنی سیم پیچی مدار اولیه موتور پمپ خطی



شکل ۴ بخش ثانویه بر روی بخش اولیه موتور خطی

پس از طراحی و ساخت بخش اولیه پمپ مغناطیسی، بخش مایع - که ظرفی شیشه‌ای و مسطح به ارتفاع ۲mm بوده - ساخته شد. شکل ۵ بخش مایع را در روی بخش اولیه پمپ نشان می‌دهد.



شکل ۵ طرح مانومتر U شکل برای اندازه گیری فشار وارد شده بر مایع‌های مورد آزمون

$$B_{mz} = \frac{0.5\pi\phi}{b\tau} \quad (20)$$

که در آن:

b عرض پمپ در شکل ۱ است.

بنابر این داریم:

$$B_{mz} = \frac{0.5 \times \pi \times 0.0031}{0.12 \times 0.18} = 0.22 \text{ Web/m}^2$$

نیروی جاذبه بین اولیه و ثانویه F_z : این نیرو از رابطه تجربی زیر بدست می‌آید [۷]:

$$F_z \approx \frac{\mu_0 A_g N_1^2}{4h^2} \quad (21)$$

که در آن:

A_g : مساحت فاصله هوایی

h: ارتفاع فاصله هوایی

بنابر این:

$$F_z \approx \frac{4\pi \times 10^{-7} \times (0.39 \times 0.12) \times 260^2}{4 \times 0.02^2} = 24.8 \text{ N}$$

توان مصرفی پمپ مغناطیسی: توان مصرفی (یا توان اکتیو) پمپ مغناطیسی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \quad (22)$$

$\cos \phi$ دستگاه و جریان مصرفی خط اندازه گیری شده و مقدار آنها به ترتیب ۰.۸۱ و ۱۵ آمپر به دست آمده است. بنابر این:

$$P_{in} = \sqrt{3} \times 220 \times 15 \times 0.8 = 4572.6 \text{ Wat} = 6.1 \text{ hp}$$

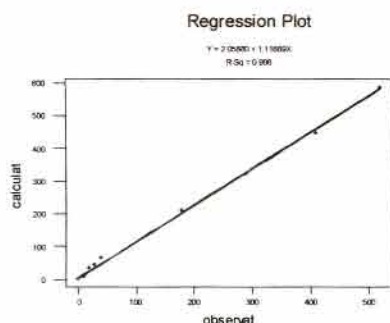
فشار انتقالی به مایع بر حسب هدایت الکتریکی آنها متفاوت بوده و از رابطه ۱۵ به دست می‌آید. این محاسبات انجام شده و نتیجه در جدول ۲ آمده است.

روابط فوق، معادلات ریاضی حاکم بر طراحی و تئوری عملکرد موتورهای خطی را نشان می‌دهد. پمپ مغناطیسی خطی ساخته شده نیز مطابق محاسبات فوق (برگرفته از روش طراحی موتورهای خطی القایی) ساخته شده که

جدول ۱ خلاصه مشخصات فنی پمپ القایی خطی ساخته شده، به‌دست آمده ازداده های طراحی.

ردیف	پارامتر	مقدار	ردیف	پارامتر	مقدار
۱	ابعاد اولیه	$39 \times 12 \times 5 \text{ cm}^3$	۱۴	نمره سیم	0.95mm
۲	فاصله هوایی	2mm	۱۵	گام سیم پیچی هر کلاف (گام قطب) (τ)	18 cm
۳	ابعاد ثانویه (بخش متحرک)	$39 \times 12 \times .02 \text{ cm}^3$	۱۶	ولتاژ ورودی (v)	220v/380v
۴	تعداد شیار (z)	24	۱۷	جریان مصرفی	15A
۵	ابعاد هر شیار	$0.5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$	۱۸	چگالی جریان الکتریکی	460A/cm
۶	گام شیار γ	1.5Cm	۱۹	فرکانس (f)	50Hz
۷	فاصله دو قطب (λ)	36 cm	۲۰	سرعت سنکرون U_s	18m/s
۸	وزن تقریبی هسته اولیه	20 kg	۲۱	شار مغناطیسی هر فاز (ϕ)	0.0031 Web
۹	تعداد شیار زیر هر قطب q	4	۲۲	چگالی شار مغناطیسی هر فاز (B)	0.22 Web/m ²
۱۰	تعداد قطب p_2	2	۲۳	نیروی جاذبه بین اولیه و ثانویه	24.8N
۱۱	تعداد دور هر کلاف N	65	۲۴	نقطه اشباع مغناطیسی هسته	1.6 Tesla
۱۲	تعداد کلاف هر فاز	4	۲۵	توان مصرفی	6 Hp
۱۳	تعداد دور هر فاز N_1	4×65	۲۶		

برابر ۹۹/۸٪ $r =$ به‌دست آمده که همبستگی نسبتاً قابل قبولی را بین دو محور نشان می‌دهد.



شکل ۶ نمایش خط برازش بین نتایج آزمایشها و محاسبات تئوری

$$r = 99.8\%$$

در کنار شیلنگ‌های مذکور، دو عدد خط کش برای اندازه‌گیری ارتفاع مانومتری نصب شده و پس از روشن کردن پمپ، ارتفاع مانومتری ایجاد شده برای هر یک از مایع‌های مورد آزمون اندازه‌گیری و نتایج در جدول ۲ ثبت شده است. شکل ۵ طرحواره این آزمایشها را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایشها با نتایج محاسبات تئوری، مقدار فشار القایی برای تمامی مایعات از رابطه ۱۵ محاسبه و در ستون کناری نتایج آزمایشهای عملی در جدول ۲ ثبت شده است. اکنون به نتایج به‌دست آمده در جدول ۲ دقت می‌کنیم. به منظور پی بردن به وجود ارتباط منطقی بین محاسبات تئوری و نتایج اندازه‌گیری شده در شکل ۶، خط برازش بین دو مقدار فوق ترسیم شده است. در شکل مذکور ضریب همبستگی بین دو محور x ها و y ها

جدول ۲ نتایج آزمایشات اثر میدان مغناطیسی سیار ناشی از موتور خطی بر روی تعدادی مایعات شیمیایی و کودهای کشاورزی

ردیف	جنس ثانویه (مایع‌های مورد آزمون)	ضریب هدایت الکتریکی $(\Omega m)^{-1}$	فشار وارد شده به ثانویه (از محاسبات) (پاسکال)	فشار وارد شده به ثانویه (از آزمایش) (پاسکال)	اختلاف ارتفاع مانومتری mm
۱	HCL صنعتی	70.92	588	520	53
۲	جوهر گوگرد	39.06	323.9	290	29
۳	NaOH	25.6	212.3	180	18
۴	KOH	54.05	448.3	410	41
۵	جیوه	10^6	8.2×10^6	شدید	شدید
۶	کود ازته	5.2	43	29	3
۷	کود فسفات ۱+HCL	8.1	67	40	4
۸	کود پتاسه ۱+HCL	4.3	35	20	2
۹	کود کلات آهن ۱+HCL	1	8.3	9.8	1
۱۰	سم مالاتین ۱+HCL	1.5	12.5	9.8	1
۱۱	سم فوزالین ۱+HCL	1	8.3	9.8	1
۱۲	سم آزیفوس ۱+HCL	1	8.3	9.8	1
۱۳	سم دیازن ۱+HCL	1	8.3	9.8	1

۴- بحث و بررسی

همانگونه که اشاره شد، هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی امکان القای نیروی مکانیکی در راستای معین به مایع شیمیایی با روش موتورهای القای خطی بوده است. با استناد به نتایج به دست آمده در جدول ۲ دریافتیم که القای نیروی مکانیکی به یک مایع در ثانویه موتور خطی امکان پذیر است. همچنین با توجه به خط برازش شکل ۶ دریافتیم که روابط ریاضی موتورهای خطی با ثانویه جامد برای حالت ثانویه مایع نیز قابل استفاده است. نکته قابل توجه، بررسی عوامل مؤثر بر افزایش کارایی القای نیرو است. با دقت مجدد در نتایج جدول ۲ سهولت می توان دریافت که مقدار فشار القایی تناسب مستقیم با هدایت

الکتریکی مایع دارد که این نتیجه گیری کاملاً منطقی بوده و روابط (۱۴) و (۱۵) و (۱۶) نیز آن را تایید می کند. معنی دیگر عبارت فوق آن است که هر اندازه هدایت الکتریکی مایع بیشتر باشد، توجیه پمپ شدن مایع با روش حاضر بیشتر است.

از دیگر نکات قابل توجه برای افزایش کارایی پمپ، بررسی ارتباط بین چگالی شار عبوری از مایع (B) و مقدار فشار القایی است. بر طبق رابطه (۱۵) مقدار فشار القایی با مجذور B متناسب است. بعبارت بهتر چنانچه بتوانیم مقدار چگالی شار عبوری از مایع را دو برابر کنیم، مقدار فشار القا شده به آن چهار برابر می شود. از طرف دیگر در هر مدار مغناطیسی (از جمله مدار موتور خطی)

ارتباط نیروی مگنتو موتیو با چگالی شار مغناطیسی چنین است:

$$MMF = (B.A)R_m \quad (23)$$

که در آن:

MMF نیروی مگنتو موتیو

A سطح مقطع مدار مغناطیسی

R_m مقاومت مغناطیسی کل مدار مغناطیسی

به علت ناچیز بودن مقاومت مغناطیسی بخش اولیه، مقدار مقاومت مغناطیسی تقریباً برابر مقاومت مغناطیسی بخش ثانویه (مایع) است. لذا با اعمال رابطه مقاومت مغناطیسی در رابطه (۲۳) داریم:

$$MMF = B \frac{l}{\mu} \Rightarrow B = \frac{Ni\mu}{l} \quad (24)$$

مفهوم رابطه (۲۴) آن است که با توجه به ثابت بودن مقادیر N و I و μ ، برای افزایش چگالی شار مغناطیسی کافی است طول بخش مایع در مدار مغناطیسی موتور خطی (یعنی ارتفاع h در شکل ۱) را کاهش دهیم. بعبارت بهتر چنانچه طول مذکور را نصف نماییم، مقدار فشار القایی به مایع دو برابر خواهد شد.

نکته دیگر در مورد رابطه (۲۴) آن است که مقدار چگالی شار عبوری، متناسب با ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی مایع است. مفهوم این گفته آن است که چنانچه ضریب مذکور برای مایعی دو برابر مایع دیگری باشد، مقدار فشار القایی به آن چهار برابر مایع دوم خواهد بود. این نکته برای مایع‌های با خواص مغناطیسی بالا (یا مایعاتی که قابلیت افزایش این خواص را دارند) از درجه اهمیت بالایی برخوردار است.

آخرین عامل مؤثر بر افزایش فشار القایی (صرف نظر از ابعاد دستگاه)، مقدار سرعت سنکرون (U_s) است که آن نیز برطبق رابطه (۱) با فرکانس جریان متناسب است. به عبارت بهتر چنانچه بتوانیم فرکانس جریان را (با مبدل فرکانسی) دو برابر کنیم، فشار القا شده به مایع نیز دو برابر

خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

مهمترین نتیجه حاصل از تحقیق حاضر، یافتن پاسخ دو پرسش مطرح شده در انتهای مقدمه این مقاله است. هر چند نتایج به دست آمده در جدول ۲ کارایی پایینی را برای پمپ کردن مایع‌های مورد آزمون نشان می‌دهد. اما یافتن پاسخ دو پرسش مطرح شده، خود موفقیت در خور توجهی است. همانگونه که اشاره شد، قبل از شروع آزمایشهای تحقیق این نگرانی وجود داشت که القای جریان الکتریکی درون مایع در راستای عمود بر میدان مغناطیسی امکان پذیر نباشد زیرا تصور می‌شد که با توجه به خاصیت مولکولهای مایع (که قابلیت لغزش بر روی یکدیگر دارند) جهت جریان القایی دائماً تغییر کرده و لذا نتوان نیروی منظمی به مایع القا کرد. اما نتایج آزمایشهای عملی و مقایسه با محاسبات تئوری نشان داد که رفتار مایع در مقابل میدان متحرک مغناطیسی با رفتار جامد شباهتهای لازم را دارد (شکل ۶). همچنین دریافتیم که افزایش دو عامل هدایت الکتریکی و هدایت مغناطیسی مایع، تأثیر مستقیمی در افزایش کارایی و فشار القایی به مایع را در بر دارد.

در پایان لازم است توضیح دهیم که اخیراً در برخی صنایع، بنا به دلایل مختلف به افزایش خاصیت نفوذ پذیری مغناطیسی یا افزایش ضریب هدایت الکتریکی برخی مایعات صنعتی اقدام کرده‌اند. به عنوان مثال اخیراً مطالعات زیادی برای هادی کردن پلیمرها صورت گرفته است [۱۸] (پلیمرها عایق جریان الکتریسیته اند). همچنین شنیده شده که در چند ماه اخیر یکی از شرکتهای رنگ سازی کشور، رنگی با خواص مغناطیسی بالا تولید کرده است. بدیهی است نتایج تحقیق حاضر می‌تواند برای چنین مواردی سودمند باشد.

۶- منابع

- [11] Jones, G.P.; *Electrical Engineer's Reference Book*, Butterworth Heinemann Ltd.; England; 1993; First Edition.
- [12] Rai, G.D.; *Non Conventional Energy Sources*; Khanna Publishers, India; 1994.
- [13] Genin, L.G.; et al.; "The Hand Heat Exchange of a Conducting Fluid in a Tube Within a Longitudinal Magnetic Field;" *Magnetohydrodynamics*, ISSN1, Vol. 26; 1990; pp. 50-6.
- [14] Stanislaw K.; et al.; "Analysis of Magnetohydrodynamic Pressure Conducting Fluids;" *IEEE, Transactions on Magnetics*; No. 34; 1998; pp.3138-41.
- [15] Thompson Marc; "Simple Models and Measurements of Magnetically Induced Heating Effects in Ferromagnetic Fluids;" *IEEE Transactions Magnetics*; No. 5, Vol. 34; 1998; pp.3755-64.
- [16] Roach, J.F.; "Magneto Hydrodynamic Pump;" USA Patent; No. 6068449; 2000.
- [17] Lee, Abraham P.; "Magnetohydrodynamic Actuators and Sensors;" USA Patent No. 6146103; 2000.
- [18] Rupprecht, L.; "Conductive Polymers and Plastics in Industrial Applications;" *Plastics Design Library*; Canada; 1999; pp. 18-24.
- [19] Nasar, S.; *Electric Machines and Electromechanics*; McGraw-Hill; USA; 1981; First Edition.
- [1] Fitzgerald, A.E.; Kingsley, C.; Umans, S.D.; *Electric Machinery*; Mc Graw Hill Book Co., N.Y.; 1988; Third Edition.
- [2] Laith Waite, E.R.; *A History of Linear Electric Motors*; MacMillan education. Ltd, Hong Kong; 1987; First Edition.
- [3] Stout, B.A.; *Energy in Word Agriculture*; Elsevier Publisher, USA.; 1989; First Edition.
- [4] Chapman, S.J.; *Electric Machinery Fundamentals*; McGraw Hill, USA.; 1991; Second Edition.
- [5] Leander, M.; Morgan, D.; *Electromagnetic and Electromechanical Machines*;" John Wiley & Sons Inc.; Singapore; 1987; pp.427-522; First Edition.
- [6] Bradley, D.; *Basic Electrical Power and Machine*;" Chapman & Hall Publisher; U.K.; 1994; First Edition.
- [7] Gieros, J.F.; *Linear Induction Drivers*; Clarendon Press; oxford, USA.; 1994; First Edition.
- [8] Gierops, J.F.; Piech, Z.J.; *Linear Synchronous Motors*; CRC Press, USA.; 2000; First Edition.
- [9] Yamada, H.; *Handbook of Linear Motor Applications*; Kogyo Chosakai pub. Co. Ltd., Japan; 1986; First Edition.
- [10] Pawluk, K.; Szczepanski, W.; *Linear Electric Motors*; WNT, Warsaw; 1974; First Edition.