

مقدمه

اساس عملکرد یک فلومیترومغناطیسی بر پایه ایجاد ولتاژ القایی ناشی از حرکت مایعات از میان یک میدان مغناطیسی ایجاد شده، است که با استفاده از قانون القای فارادی بیان می‌شود [3,1]. فلومیتروهای الکترومغناطیسی به طور گسترده‌ای در اندازه‌گیری حجم شار قابل اندازه‌گیری در محیط صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که آن هم به خاطر دقت بسیار زیاد آنها می‌باشد. این خصوصیات، استفاده فلومیتروهای صنعتی را برای سیالات مختلف و مسئله دار نظیر پس آب‌ها، خمیر کاغذ، مخلوط‌های غیریکنواخت در صنایع غذایی و غیره پیشنهاد می‌کند.

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه طراحی فلومیتروهای الکترومغناطیسی و مسائل مربوط به آنها انجام شده است [11,1]. در مراجع [2,1] ایده‌ای اولیه به صورت تابع وزن دو بعدی ارائه شده است که درجه توزیع پروفیل سرعت مایع به سیگنال فلوی عبوری در مقطع عرضی لوله را نشان می‌دهد. همچنین مشخص شده است که برای یک فلومیترو با میدان مغناطیسی یکنواخت و الکترودهای نقطه‌ای، هر پروفیل فلوی خطی متقارن با سرعت متوسط عبوری v_m ، ولتاژی را به مقدار $\Delta U = Bv_m d$ ایجاد خواهد کرد [2,1]. البته ایده تابع وزن $\vec{W} = \vec{B} \times \vec{j}$ به صورت سه بعدی با استفاده از مفهوم جریان مجازی \vec{j} (Virtual Density Current) قابل توسعه است که در این حالت، شرایط برای یک فلومیترو ایده‌آل با یک سیال تراکم‌ناپذیر دارای $\text{curl} \vec{W} = 0$ می‌باشد. در این وضعیت، سیگنال در الکترودها متناسب با نرخ فلوی عبوری بدون در نظر گرفتن توزیع سرعت خواهد بود [3,5,6].

در مراجع [4,7] نحوه عملکرد یک فلومیترو الکترومغناطیسی برای یک لوله با مقطع دایره‌ای شکل ارائه شده است و این در حالی است که در مقاطع چهارگوش و سرباز، میزان ولتاژ القایی، مستقل از توزیع سرعت سیال می‌باشد [11,8]. همچنین در مراجع

[9,8] کالیبراسیون فلومیتروهای الکترومغناطیسی برای کانال با مقطع چهارگوش و سرباز با استفاده از شبکه‌های عصبی انجام شده است.

در این مقاله، هدف آن است که افزون بر ارائه اصول کلی طراحی فلومیتروهای الکترومغناطیسی با مقطع دایره‌ای شکل، چگونگی کالیبراسیون آنها را با استفاده از روش جدید شبکه‌های عصبی و با فرض مقطع دایره‌ای شکل لوله مورد نظر نشان دهیم. بدین منظور در بخش‌های (۲) و (۳)، اصول کلی و تحلیل فلومیتروهای الکترومغناطیسی ارائه گردیده و با استفاده از نرم‌افزار Matlab طراحی فلومیترو الکترومغناطیسی در قالب یک برنامه m-file آورده شده است. سپس در بخش (۴)، نحوه کالیبراسیون فلومیتروهای الکترومغناطیسی برای لوله با مقطع دایره‌ای بیان شده است. به منظور ارزیابی مطالب ارائه شده در بخش‌های (۳) و (۴)، در بخش (۵) نیز نتایج شبیه‌سازی طراحی فلومیترو الکترومغناطیسی و اثرات ضریب رسانایی و ارتفاع مایع در لوله بر ولتاژ القایی بین دو الکتروده ارائه گردیده است. همچنین با توجه به غیرخطی بودن تابع ضریب تصحیح در کالیبراسیون فلومیترو و استفاده از شبکه عصبی پیشنهادی، این ضریب تصحیح به شکل مطلوب و دقیقی تعیین شده است. این موضوع باعث کاهش خطا در فلومیترو می‌شود.

اصول کلی عملکرد فلومیترو - تعاریف اساسی

عملکرد یک فلومیترو الکترومغناطیسی بر اساس قانون ولتاژ القاء فارادی می‌باشد. از میان آنالیزهای تئوریک دیده شده است که برای میدان‌های مغناطیسی پایا، سیگنال فلوی عبوری، متناسب با نرخ حجم عبوری فلوی سیال در پروفیل سرعت عبوری می‌باشد. وابستگی بین ولتاژ الکتریکی القاء شده φ در ناحیه اندازه‌گیری به سرعت مایع \vec{v} (بر حسب متر) و چگالی میدان مغناطیسی \vec{B} (بر حسب تسلا) در شکل (۱) نشان داده شده است.

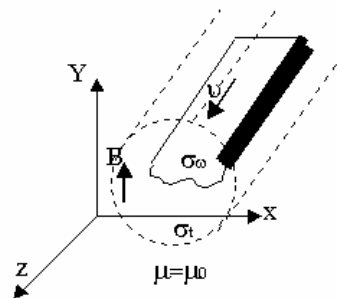
(Laurents Law)، سبب ایجاد یک میدان الکتریکی \vec{E} در درون سیال می گردد. تحت هر شرایطی، این میدان می تواند به صورت گرادیان پتانسیل الکتریکی φ بیان گردد. بدین ترتیب، ولتاژ القاء شده بین الکترودها در یک فلومیترا ساده را می توان به صورت زیر تعیین نمود:

$$\Delta U_{EE} = B \cdot d \cdot v_m = \frac{4B}{\pi \cdot d} Q \quad (1)$$

که در این رابطه، ΔU_{EE} و d به ترتیب اختلاف پتانسیل (بر حسب ولت) و فاصله بین دو الکتروده (بر حسب متر) می باشد. همچنین v_m سرعت متوسط در مقطع عرضی (بر حسب متر بر ثانیه) و Q نرخ فلوی عبوری (بر حسب m^3/sec) می باشد. گفتنی است که ΔU_{EE} در معادله (۱) به ضریب رسانایی الکتریکی، ویسکوزیته و فشار مایع عبوری وابسته می باشد. البته رابطه (۱)، یک معادله اساسی برای فلومیترا است و زمانی این رابطه ساده برقرار خواهد بود که: ۱- میدان مغناطیسی یکنواخت باشد. ۲- پروفیل سرعت، متقارن باشد [7,5].

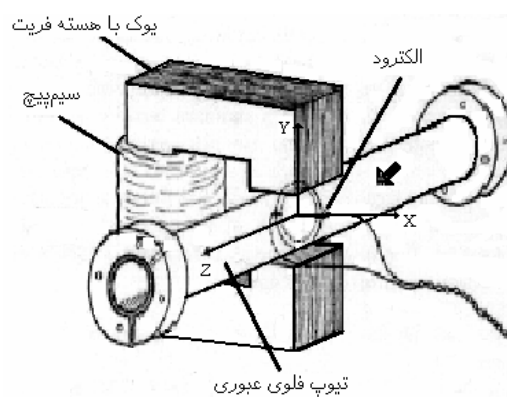
بنابر این، توضیح و شرح اصول عملکرد فلومیترا الکترومغناطیسی برای تعیین مشخصات الکتریکی و مغناطیسی محیط فلومیترا، لازم می باشد. از این رو، مایع عبوری به وسیله ضریب نفوذپذیری $\mu = \mu_0$ مشخص شده است. ضریب رسانایی آب σ_w و دیواره لوله σ_t (که بر حسب زیمنس بر متر S/m می باشد) دارای خواص یکسان هستند و هیچ کدام تابعی از میدان مغناطیسی و چگالی شار مایع نمی باشند که این موضوع، اتفاقات اثر هال (Hall Effect) را به حساب نمی آورد [8,9]. نوع شار عبوری و میدان به کار رفته نیز اثرات خودالقائی را در خود نخواهد داشت.

از دیگر فرض هایی که برای ساده شدن طراحی در نظر گرفته شده، این است که بردار سرعت v را در سطح میدان مغناطیسی دارای یک مؤلفه در نظر گرفته ایم؛ یعنی بردار سرعت، دارای مولفه ای در راستای



شکل ۱ مدل الکتریکی فلومیترا الکترومغناطیسی

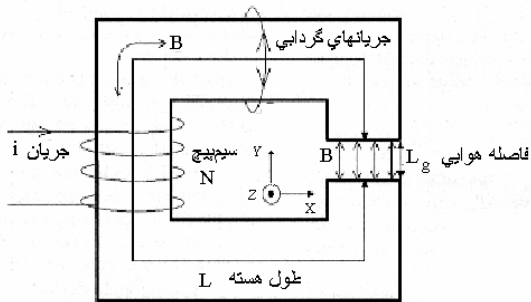
به طور کلی، برای یک فلومیترا الکترومغناطیسی متداول شامل قسمت هایی نظیر لوله با مقطع دایره ای برای عبور فلوی سیال و تولید کننده یک میدان مغناطیسی در مسیر فلوی سیال و یک جفت الکتروده در دیواره لوله را می توان مانند شکل (۲) در نظر گرفت. در صورتی که سیال در لوله ای با مقطع عرضی دایره ای شکل حرکت کند، آنگاه میدان مغناطیسی از یک سمت به سمت دیگر لوله (معمولاً توسط سیم پیچ های تحریک با یک جریان متناوب) ایجاد می شود. لوله نیز باید از مواد غیرمغناطیسی ساخته شود، چرا که میدان مغناطیسی می تواند خود لوله را تحت تأثیر قرار دهد [4,1].



شکل ۲ شماتیک یک فلومیترا الکترومغناطیسی

فعل و انفعالات میدان مغناطیسی با حرکت بارهای مثبت و منفی سیال و با استفاده از قانون لورنتز

می‌شوند و الکترومگنت نیز از یک هسته نوع C-type و یک سیم‌پیچ با تعداد دور N تشکیل می‌گردد که این موارد را می‌توان در شکل (۳) مشاهده نمود.



شکل ۳ پارامترهای طراحی الکترومگنت فلومیتر

برای کاهش تلفات جریان‌های گردابی در هسته، آن را توسط مواد عایقی مناسب با توجه به کاربرد آنها، عایق‌بندی می‌کنند. با توجه به ساختار هسته و سیم‌پیچ فلومیتر، و با استفاده از قانون آمپر برای مدار مغناطیسی آن، تعداد دور سیم‌پیچ (N) و طول فاصله هوایی بین دو قطب (L_g بر حسب متر) تعیین می‌گردند. در معادله (۲)، رابطه تقریبی در طراحی پارامترهای یاد شده در الکترومگنت فلومیتر ارائه شده است:

$$\oint \frac{B}{\mu} dL = \frac{B}{\mu_{Fe}} L + \frac{B}{\mu_{air}} L_g = Ni \Rightarrow B = \frac{\mu_{air} Ni}{L_g} \quad (2)$$

که در آن L طول هسته (بر حسب متر) و μ_{Fe} و μ_{air} ، به ترتیب، ضرایب نفوذپذیری هسته فریت و هوا می‌باشند. قسمت دوم یک فلومیتر الکترومغناطیسی، واحد پردازش سیگنال می‌باشد که در شکل (۴) نشان داده شده است. در این قسمت سیگنال آشکار شده (که معمولاً در حد میلی ولت می‌باشد و در مقایسه با ولتاژهای ناخواسته و نویزها بسیار کوچک می‌باشد) فیلتر گردیده و سپس تقویت می‌شود.

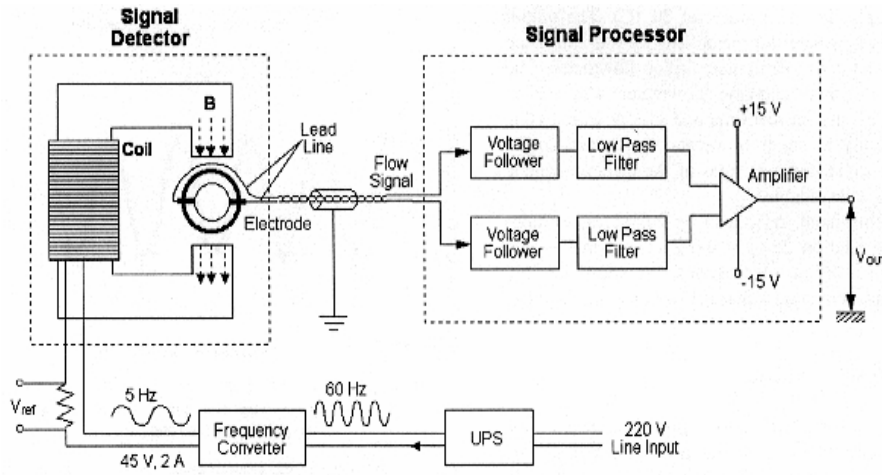
v_z است و در نتیجه $\partial v_z / \partial z = 0$ می‌باشد. البته بردار سرعت در حالت شرایط کاملاً توپر لوله تعریف شده است و آنالیز میدان مغناطیسی توزیع شده فقط می‌تواند به حالت پایدار محدود شود که این هم به‌خاطر بررسی در فرکانس پایین می‌باشد (یعنی $\partial v_z / \partial z = 0$ است که متغیر z، مقدار یا پارامتر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد) [9,8].

آنالیز فلومیتر الکترومغناطیسی

در این مقاله، طراحی فلومیتر الکترومغناطیسی با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری و برنامه‌نویسی m-file توسط نرم‌افزار Matlab ارائه می‌شود.

آشکارسازی و پردازش سیگنال خروجی. الکترومگنت یک فلومیتر الکترومغناطیسی می‌تواند توسط دو نوع سیستم تحریک AC و DC تغذیه گردد. از آنجا که بیشتر اندازه‌گیری‌ها روی سیالات با رسانایی کم انجام می‌گردد، می‌توان از سیستم تحریک سینوسی با استفاده از منبع AC بهره جست. این نوع منبع تغذیه را می‌توان به‌وسیله یک کنورتر فرکانسی و یک سیستم منبع تغذیه بدون وقفه (Uninterrupted Power Supply) UPS کنترل کرد. استفاده از تبدیل فرکانسی منبع تغذیه الکترومگنت فلومیتر، به‌خاطر کاهش پیک نویزهای ایجاد شده توسط ولتاژ AC می‌باشد که معمولاً به‌صورت سیگنال‌های خطا در قسمت آشکارسازی این نوع فلومیترهای با تحریک AC بوجود می‌آید [1,2,7].

به‌طور کلی، فلومیترهای الکترومغناطیسی از دو قسمت آشکارسازی سیگنال (Signal Detecting Unit) و پردازش سیگنال (Signal Processing Unit) تشکیل می‌گردند. قسمت آشکارسازی سیگنال از بخش‌هایی نظیر یک لوله فلوی سیال و غیر رسانا، الکترودها و یک الکترومگنت تشکیل شده است. الکترودها معمولاً به‌صورت قُبه‌ای شکل (Cupolar Shape) در نظر گرفته



شکل ۴ شماتیک دیاگرام واحد پردازش سیگنال

ناحیه اندازه‌گیری خواهد بود. در نتیجه، رابطه (۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$U_e = w \cdot \int_V \vec{v} \cdot \vec{a} dv \quad (6)$$

که در آن \vec{a} بردار واحد و موازی با بردار \vec{W} بوده و W نیز طول بردار \vec{W} می‌باشد.

محاسبه تابع توزیع وزن. طراحی ترانسیدوسر اولیه برای یک لوله فلومیترا، محاسباتی را برای تابع توزیع وزن W درخواست می‌کند که به وسیله شکل ناحیه اندازه‌گیری، شکل و اندازه الکترودها و نرخ ضریب رسانائی مایع و دیواره لوله تعیین می‌گردد. سپس از یک مدل عددی لوله برای حل معادله لاپلاس زیر استفاده می‌گردد:

$$\text{div}(\sigma \cdot \text{grad} \phi) = 0 \quad (7)$$

با در نظر گرفتن شرایط حدی دیریکله (Dirichlet Conditions)، یعنی ولتاژ $\phi = 0$ روی الکتروود اول و ولتاژ $\phi = 1$ روی الکتروود دوم، تابع توزیع وزن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{j} = -\alpha \cdot \sigma \cdot \text{grad} \phi \quad (8)$$

مدل ریاضی لوله فلوی عبوری. معادله اساسی در تئوری فلومیتراهای الکترومغناطیسی توسط آقای شرکلیف (Shercliff) به صورت زیر داده شده است [1,2]:

$$\text{div}(\sigma \cdot \text{grad} \phi) = \text{div}[\sigma(\vec{v} \times \vec{B})] \quad (3)$$

که در آن σ ضریب رسانائی هم مایع و هم لوله می‌باشد. در نتیجه، ولتاژ القاء شده U_e بین دو نقطه در حجم ناحیه اندازه‌گیری (به عنوان مثال روی الکترودهای فلومیترا) به صورت زیر می‌باشد:

$$U_e = \phi_{e_1} - \phi_{e_2} = \int_V \vec{v} \cdot (\vec{B} \times \vec{j}) \cdot dv \quad (4)$$

در این رابطه V حجم ناحیه اندازه‌گیری و \vec{j} بردار چگالی جریان مجازی می‌باشد [1-2,8-10]. بردار $\vec{W} = \vec{B} \times \vec{j}$ نیز به عنوان تابع وزن، تعبیر شده که توسط آقایان بویر (Bevir) و شرکلیف بیان گردیده است [3,1].

حال اگر سیم پیچ تحریک فلومیترا، میدانی تولید کند که باعث شود تا بردار \vec{W} ثابت باشد، یعنی،

$$\vec{B} \times \vec{j} = \vec{W} = \text{const} \quad (5)$$

آنگاه داخل محدوده حجم V ، ولتاژ بین الکترودها متناسب با سرعت متوسط شار عبوری در

رسانائی مایع به دیواره لوله وابسته می‌باشد. از آنجا که تنظیم توزیع چگالی شار مغناطیسی \vec{B} نمی‌تواند به تنهایی و به‌طور کامل، بردار وزن \vec{W} را به‌شکل یکنواخت ایجاد کند، استفاده از یک تابع ضریب تصحیح برای کالیبراسیون مفید می‌باشد.

لازم به ذکر است که تعیین تابع انتقال فلومیترو خطای اندازه‌گیری ایجاد شده توسط تغییر مشخصات فلوی عبوری در هر مرحله از طراحی، لازم است. روش کالیبراسیون خشک (Dry Calibration) براساس شبیه‌سازی عددی، به طراح این اجازه را می‌دهد که تابع انتقال را برای اندازه‌گیری خطا در تمام محدوده تغییرات در سطح مایع و ضرایب رسانائی مایع و بدنه لوله تخمین بزند.

تعیین تابع ضریب تصحیح، یک بخش جزئی از بهبود الگوریتم طراحی فلومیترو می‌باشد. بنابراین طراح، با توجه به یک بررسی محلی نسبت به تغییرات در بازه سطح مایع و ضرایب رسانائی می‌تواند مجموعه نتایج به‌صورت یک فایل اطلاعاتی برای طراحی ساختار فلومیترو و توزیع چگالی شار مغناطیسی به‌دست آورد. آنالیزهای انجام گرفته منجر به ایجاد یک مجموعه روابط بین سیگنال فلوی سیال عبوری و متغیرهای مورد نظر خواهد گردید که به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

$$Q = k \cdot k_{h\sigma} \cdot v_m \cdot h \quad (11)$$

در این رابطه Q فلوی عبوری (بر حسب m^3/sec)، k ثابت کالیبراسیون (بر حسب متر)، $k_{h\sigma}$ ضریب تصحیح، v_m سرعت متوسط (بر حسب m/sec) و h سطح مایع (بر حسب m) می‌باشد. همچنین ضریب تصحیح مورد نظر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_{h\sigma} = \frac{U(\sigma_{st}, h_{full})}{U(\sigma_n, h_n)} \quad (12)$$

که در این رابطه، $U(\sigma_{st}, h_{full})$ پتانسیل الکتروموتور محاسبه شده برای مقدار متوسط ضرایب رسانائی مایع (σ_{st}) و دیواره لوله در حالت کاملاً توپر لوله است و

$$\vec{W} = \vec{B} \times \vec{j} \quad (9)$$

گفتنی است که ضریب α برای نرمالیزه کردن چگالی جریان کل عبوری از بین دو الکتروود در نظر گرفته شده است که برابر خواهد بود با:

$$\alpha = \frac{1}{\int_{S_e} \sigma \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} ds} \quad (10)$$

در این رابطه، S_e سطح الکتروود اندازه‌گیر و σ ضریب رسانائی سیال و دیواره لوله است.

کاربرد شبکه‌های عصبی در کالیبراسیون فلومیترو الکترومغناطیسی

کالیبراسیون فلومیتروهای الکترومغناطیسی به‌عنوان یکی از مسائل مهم در روند طراحی آنها به حساب می‌آید. اهمیت این موضوع از آن جا ناشی می‌شود که ممکن است ضریب هدایت سیال، تغییر نماید و این موضوع، موجب تغییر در ولتاژ القاء شده می‌گردد. این در حالی است که تغییر ولتاژ، به‌معنای تغییر فلوی سیال می‌باشد و لذا این نوع تغییرات، نباید مقدار فلوی گذرنده را با عدد دیگری نشان دهد. از این رو، با اعمال ضریب کالیبراسیون به مقدار خوانده شده، می‌توانیم تأثیر تغییرات ضریب هدایت یا هر عامل دیگر را جبران نماییم. از آنجا که ضریب کالیبراسیون، تابعی غیرخطی از ضریب هدایت الکتریکی سیال و دیگر پارامترهای ممکن می‌باشد، ارائه رابطه‌ای که بتواند مقدار این ضریب را با توجه به ضریب هدایت الکتریکی و یا دیگر پارامترها محاسبه نماید، از اهمیت بسیار زیادی در روند طراحی برخوردار خواهد بود.

هدف اصلی در طراحی فلومیتروهای استفاده شده در وضعیت لوله‌های کاملاً توپر، ساختن تابع توزیع وزن یکنواخت در درون آن می‌باشد. از آنجا که همواره وضعیت فلوی عبوری توپر در داخل لوله فلومیترو برقرار نمی‌باشد، مقادیر تابع توزیع وزن و فلوی عبوری داخل لوله، به تغییرات دو پارامتر سطح مایع و نسبت ضرایب

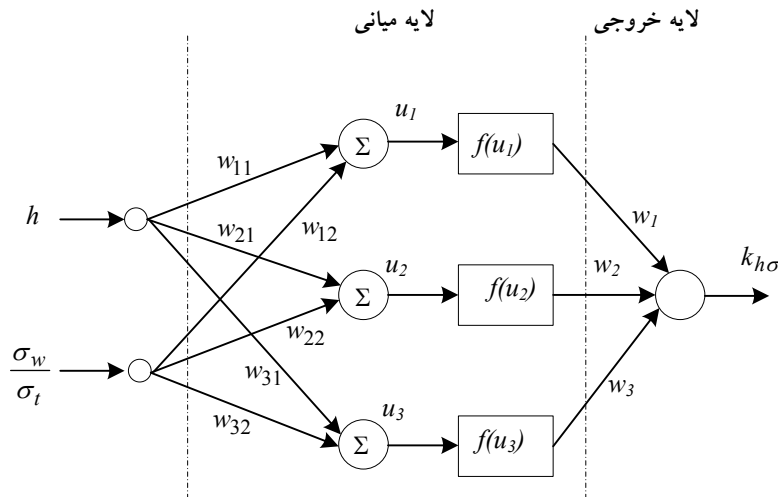
خروجی شبکه عصبی با استفاده از رابطه (۱۲) به دست می‌آید. این اطلاعات، در برنامه شبکه عصبی نوشته شده به عنوان تابع هدف یا خروجی مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، ورودی‌های شبکه عصبی نیز سطح مایع و نسبت رسانایی مایع به دیواره لوله می‌باشد. بنابراین شکل ضرب تصحیح به دست آمده در خروجی این شبکه عصبی به صورت زیر خواهد بود:

$$k_{h\sigma} = w_1 \cdot f(w_{11}h + w_{12} \frac{\sigma_w}{\sigma_t}) + w_2 \cdot f(w_{21}h + w_{22} \frac{\sigma_w}{\sigma_t}) + w_3 \cdot f(w_{31}h + w_{32} \frac{\sigma_w}{\sigma_t}) \quad (13)$$

در این رابطه w_{ij} توابع وزن شبکه عصبی، $f = 1/(1 + e^{-u})$ تابع سیگموئیدال تک قطبی، h سطح مایع و σ_w, σ_t به ترتیب، ضرایب رسانایی دیواره لوله و مایع می‌باشند.

$U(\sigma_n, h_n)$ پتانسیل الکتروود محاسبه شده برای سطح مایع h_n و ضریب رسانایی σ_n می‌باشد.

از آنجا که این ضریب تصحیح، به صورت تابع غیرخطی پیچیده‌ای از سطح مایع و ضریب رسانایی می‌باشد (یعنی $k_{h\sigma} = f(h, \sigma)$)، لذا برای یافتن این تابع، از یک ساختار شبکه عصبی مصنوعی سه لایه پیشخور TLANN (Three Layer Artificial Neural Network) استفاده می‌گردد. در این شبکه عصبی، نرون‌های لایه مخفی آن از تابع سیگموئیدال (Sigmoidal Activation Function) تبعیت می‌کند و نرون لایه خروجی نیز به صورت خطی است. این ساختار را می‌توان در شکل (۵) مشاهده نمود. ضرایب وزنی در این شبکه به وسیله روش پس انتشار خطا (Back Propagation Method) BPM انتخاب می‌گردند که با استفاده از اجرای برنامه کامپیوتری به ازای تغییرات سطح مایع همراه با تغییرات نسبت رسانایی مایع به دیواره لوله، اطلاعات لازم برای



شکل ۵ ساختار شبکه عصبی سه لایه پیشنهادی

با فرض آنکه میدان موردنظر، فاقد فضای باردار الکتریکی باشد، آنگاه خواهیم داشت:

$$V(i, j) = \frac{1}{4} [V(i+1, j) + V(i, j+1) + V(i-1, j) + V(i, j-1)] \quad (15)$$

در صورتی که تقسیم شبکه به صورت منظم و با اضلاع مساوی نباشد (یعنی $h_{g1} \neq h_{g2} \neq h_{g3} \neq h_{g4}$)، رابطه اخیر به شکل زیر تغییر می کند:

$$V(i, j) = \frac{\left\{ \frac{V(i+1, j)}{h_{g3}} + \frac{V(i-1, j)}{h_{g1}} \right\} / (h_{g1} + h_{g3})}{\frac{1}{h_{g1} h_{g3}}} + \frac{\left\{ \frac{V(i, j+1)}{h_{g2}} + \frac{V(i, j-1)}{h_{g4}} \right\} / (h_{g2} + h_{g4})}{\frac{1}{h_{g2} h_{g4}}} \quad (16)$$

همچنین رابطه (۱۵) را می توان به شکل دیگری نیز، بر اساس ولتاژ نقاط چهارگوش اطراف نقطه (i, j) ، به صورت زیر، بیان نمود:

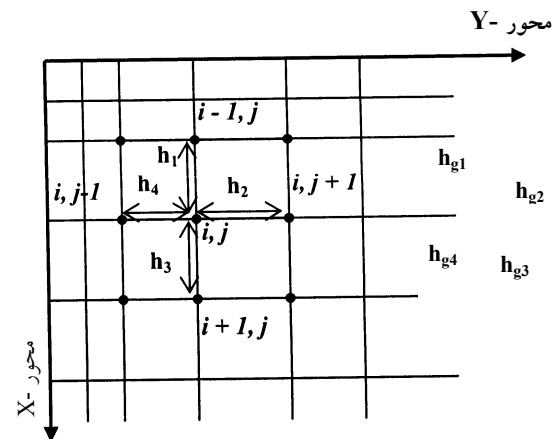
$$V(i, j) = \frac{1}{4} [V(i+1, j+1) + V(i+1, j-1) + V(i-1, j+1) + V(i-1, j-1)] \quad (17)$$

البته هرچه اضلاع شبکه، کوچکتر باشد، نتیجه دقیق تری در تعیین خطوط هم پتانسیل و خطوط میدان به دست می آید. در این روش، نخست پتانسیل تمام نقاط مجهول شبکه را به طور معقول تخمین زده و سپس با استفاده از روابط (۱۵) یا (۱۷)، پتانسیل تمام نقاط شبکه، مجدداً اصلاح می شوند. این روند، تا دستیابی به دقت موردنظر برای تعیین پتانسیل همه نقاط شبکه تکرار می گردد.

روش عددی حل مسئله

یکی از روش های اساسی در حل معادلات میدان های الکتریکی در فلومیترهای الکترومغناطیسی (معادله (۳))، استفاده از روش حل تفاضل محدود (FDM) می باشد. در این روش، معادلات یاد شده را به معادلات خطی تبدیل می کنیم که این کار با تقسیم ناحیه موردنظر به صورت شبکه های منظم و مطابق با شکل (۶) صورت می گیرد. با توجه به آنکه تغییرات پتانسیل در داخل میدان، به صورت پیوسته می باشد، لذا با استفاده از بسط سری تیلور حول هر نقطه (i, j) در شکل (۶) و استفاده از تقریب خطی، ولتاژ نقاط $(i+1, j)$ ، $(i, j+1)$ ، $(i, j-1)$ و $(i-1, j)$ با فرض $h_{g1} = h_{g2} = h_{g3} = h_{g4} = h_g$ به صورت زیر تعیین می گردد:

$$\begin{aligned} V(i+1, j) &= V(i, j) + h_g \cdot V_x(i, j) + \frac{1}{2} h_g^2 V_{xx}(i, j) \\ V(i, j+1) &= V(i, j) + h_g \cdot V_y(i, j) + \frac{1}{2} h_g^2 V_{yy}(i, j) \\ V(i-1, j) &= V(i, j) - h_g \cdot V_x(i, j) + \frac{1}{2} h_g^2 V_{xx}(i, j) \\ V(i, j-1) &= V(i, j) - h_g \cdot V_y(i, j) + \frac{1}{2} h_g^2 V_{yy}(i, j) \end{aligned} \quad (14)$$



شکل ۶ قسمتی از یک شبکه در استفاده از روش تفاضل محدود

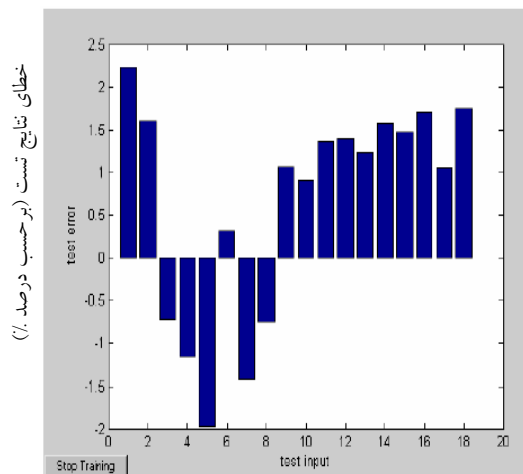
نتایج شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی طراحی و آنالیز یک فلومیتر الکترومغناطیسی ارائه شده است. برای افزایش دقت در این نتایج، ابتدا با استفاده از شبکه‌های عصبی سه لایه و با کمک روش پس‌انتشار خطا (BP)، ضریب تصحیح فلومیتر به شکل دقیقی تعیین می‌شود. سپس با استفاده از روش تفاضل محدود (FDM)، دیگر نتایج تحلیل فلومیتر ارائه می‌گردد. این نتایج از قبیل محاسبه اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود و تابع توزیع وزن در حالت‌های مختلف سطح مایع، و اثرات ضریب رسانایی مایع عبوری و ارتفاع سطح مایع در ولتاژ القایی می‌باشد که در ادامه آورده خواهد شد.

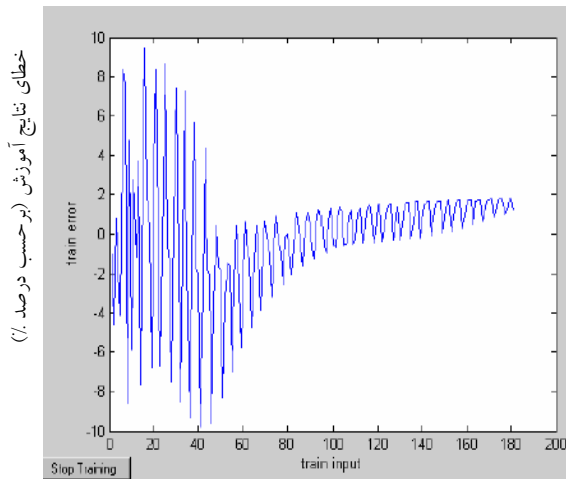
تقسیم نماییم، آنگاه مجموعاً $200 = 5 \times 40$ حالت ایجاد می‌شود. از این ۲۰۰ حالت، ۱۸۲ حالت آن برای آموزش شبکه عصبی پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد و ۱۸ حالت باقیمانده نیز برای آزمون شبکه به کار می‌رود. خطای ایجاد شده در ۱۸۲ حالت مربوط به آموزش شبکه عصبی مورد نظر در شکل (۷) نشان داده شده است. پس از آموزش مطلوب شبکه و به‌منظور آزمون آن در تعیین تابع ضریب تصحیح، ۱۸ حالت باقیمانده را به‌عنوان حالت‌های آزمون در نظر می‌گیریم که نتایج آن در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین خطای ارائه‌شده در جدول (۱) نیز در شکل (۸) به نمایش گذاشته شده است. تابع ضریب تصحیح به‌دست آمده پس از آموزش شبکه عصبی با ۱۸۲ حالت انتخابی و ۱۸ حالت برای آزمون شبکه عصبی به‌صورت زیر می‌باشد.

$$k_{h\sigma} = 0.2332 \frac{1}{1 + e^{(-0.8846h - 2.1292(\sigma_w / \sigma_t))}} + 5.2222 \frac{1}{1 + e^{(3.2627h - 5.8061(\sigma_w / \sigma_t))}} + 0.8628 \frac{1}{1 + e^{(0.7366h - 2.7901(\sigma_w / \sigma_t))}} \quad (18)$$

تعیین ضریب تصحیح توسط شبکه عصبی. به منظور ایجاد ورودی‌های یک شبکه عصبی، داخل لوله نمونه را به ۱۰ قسمت تقسیم نموده و فرض می‌کنیم که یک مایع عبوری با ضریب رسانایی بین ۰/۰۱ تا ۱ و در سطح مایع بین قسمت‌های ۵ تا ۱۰ از داخل لوله عبور نماید. با توجه به آنکه تغییرات ضریب رسانایی بین ۰/۰۱ تا ۱ را به ۴۰ قسمت و سطح مایع بین ۵ تا ۱۰ را به ۵ قسمت



شکل ۸ نتایج تست شبکه عصبی با ۱۸ حالت



شکل ۷ نتایج آموزش شبکه عصبی با ۱۸۲ حالت

تحلیلی محاسبه اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود و تغییرات آن به ازای عبور سیال مایع داخل لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های (۹) و (۱۰)، توزیع پتانسیل الکتریکی بین دو الکتروود در ناحیه اندازه‌گیری شده از مقطع دایره‌ای را برای دو حالت دویعدی و سه‌بعدی و برای دو حالت کاملاً توپر لوله و حالت ۶۰٪ سطح مایع نمایش می‌دهد. مکان دو الکتروود در صفحه $(x-y)$ بر روی موقعیت (۶، ۱) و (۶، ۱۱) می‌باشد که پتانسیل دو الکتروود به ترتیب برابر یک و صفر پریونیت در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در این دو شکل مشاهده می‌شود، خطوط هم‌پتانسیل در اطراف الکتروود 1μ بسیار فشرده بوده و هر چه به سمت الکتروود با ولتاژ صفر پریونیت می‌رویم، از این تراکم خطوط، کاسته می‌شود. البته در حالتی که لوله کاملاً توپر باشد، توزیع پتانسیل الکتریکی به صورت متقارن می‌باشد که در شکل (۹) مشخص است. این در حالی است که در حالت لوله با ۶۰٪ سطح مایع، حالت‌های ناهمگون فلوی عبوری بخوبی نمایان است که تاثیر ضریب رسانایی مایع عبوری را نسبت به ضریب رسانایی هوا (که همان ۴۰٪ بالای سطح مایع است) نشان می‌دهد.

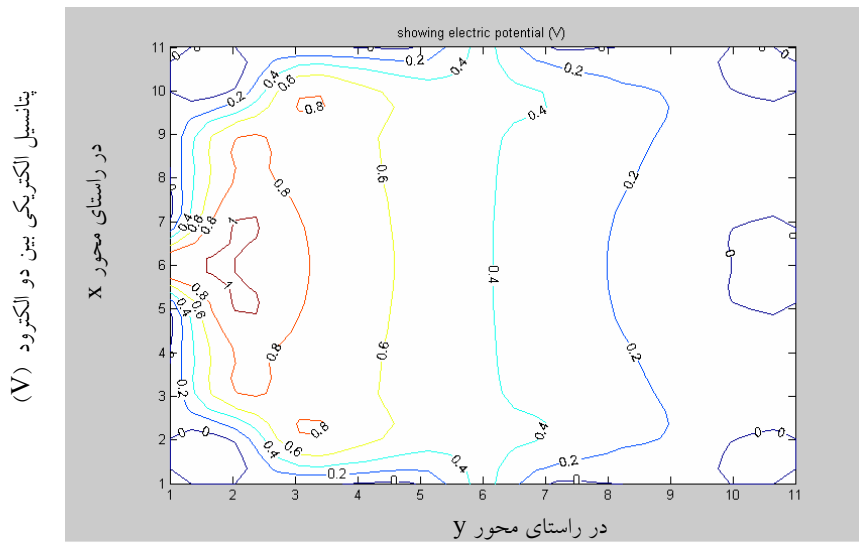
تغییرات تابع توزیع وزن بین دو الکتروود در حالت‌های مختلف سطح مایع. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، نحوه تغییرات تابع توزیع وزن شرکلیف در دو حالت کاملاً توپر لوله و ۶۰٪ سطح مایع داخل لوله نشان داده شده است. در شکل (۱۱) با توجه به ساختار لوله و شرایط کاملاً توپر لوله، تابع توزیع وزن بدون در نظر گرفتن ضریب α برای نرمالیزه کردن جریان بخوبی مشخص شده است. همچنین در شکل (۱۲) مشخص می‌شود که در حالت توپر نبودن فلوی عبوری سیال در لوله، نمی‌توان پروفیل تابع توزیع وزن متقارن را برای لوله فلومیترومتر ارائه نمود. بعلاوه در این وضعیت، نمی‌توان تشخیص داد که در کدام قسمت از لوله، سرعت سیال

جدول ۱ نتایج آزمون شبکه عصبی برای ۱۸ حالت

حالات آزمون	خروجی شبکه عصبی	خروجی واقعی	مقدار خطا (%)
۱	۱۳/۷۱۰۹۶	۱۴/۰۲۳۳	۲/۲۲۷۳
۲	۹/۴۵۹۱۸	۹/۶۱۲۸	۱/۵۹۸۱
۳	۶/۰۰۹۱۶	۵/۹۶۵۶	-۰/۷۳۰۲
۴	۴/۶۴۲۳۴	۴/۵۸۸۷	-۱/۱۶۸۹
۵	۳/۸۳۹۴۶	۳/۷۹۸۷	-۱/۰۷۲۹
۶	۳/۵۷۸۹۳	۳/۵۸۹۹	۰/۳۰۵۶
۷	۱/۶۱۳۷۰	۱/۵۹۱۰	-۱/۴۲۶۸
۸	۱/۲۸۱۳۵	۱/۲۷۱۷	-۰/۷۵۸۸
۹	۱/۰۸۴۹۲	۱/۰۹۶۵	۱/۰۵۶۱
۱۰	۰/۶۷۹۰۲	۰/۶۸۵۲	۰/۹۰۲۰
۱۱	۰/۷۲۶۷۴	۰/۷۳۶۸	۱/۳۶۵۴
۱۲	۰/۶۹۸۴۳	۰/۷۰۸۳	۱/۳۹۳۲
۱۳	۰/۸۶۲۶۸	۰/۸۷۳۴	۱/۲۲۷۸
۱۴	۰/۴۶۰۴۳	۰/۴۶۷۸	۱/۵۷۴۵
۱۵	۰/۶۲۸۱۸	۰/۶۳۷۵	۱/۴۶۳۳
۱۶	۰/۳۷۴۶۹	۰/۳۸۱۲	۱/۷۰۸۸
۱۷	۱/۰۲۹۵۷	۱/۰۵۰۶	۱/۰۵۰۱
۱۸	۰/۳۵۵۹۰	۰/۳۶۲۲	۱/۷۳۸۵

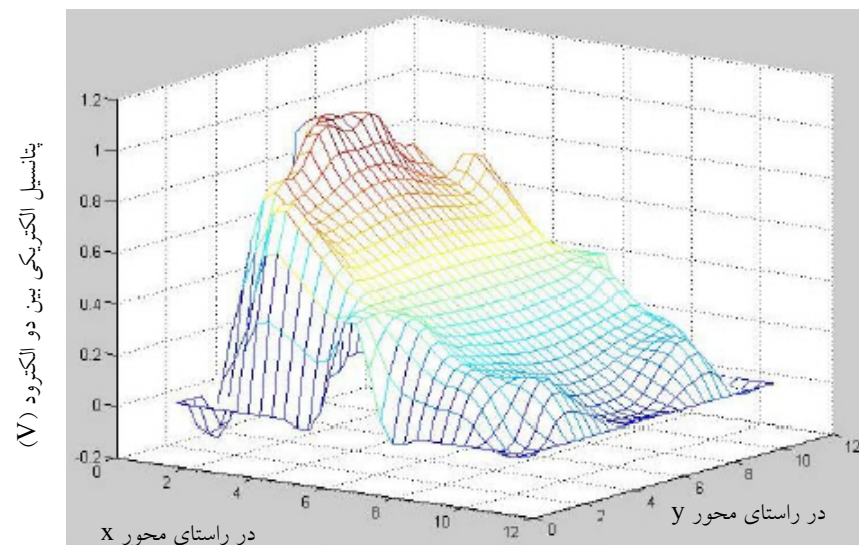
رابطه اخیر، مقدار ضریب تصحیح را برای تمام مقادیر ضرایب رسانایی دیواره لوله و مایع (σ_w, σ_f) و همچنین سطح مایع (h) در حین اندازه‌گیری شار عبوری در یک فلومیترومغناطیسی، مشخص می‌کند. همچنین از نتایج جدول (۱) نیز مشخص است که تعیین ضریب تصحیح با استفاده از شبکه‌های عصبی دارای خطایی کمتر از ۲/۵٪ می‌باشد. از این رو، نتایج به دست آمده، به روشنی دقت شبکه‌های عصبی را (همراه با سرعت بالای آن) در تعیین این ضریب و در روند طراحی فلومیترومترهای الکترومغناطیسی نمایش می‌دهد.

تغییرات پتانسیل الکتریکی بین دو الکتروود در حالت‌های مختلف سطح مایع. در این قسمت، نتایج



پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود (V)

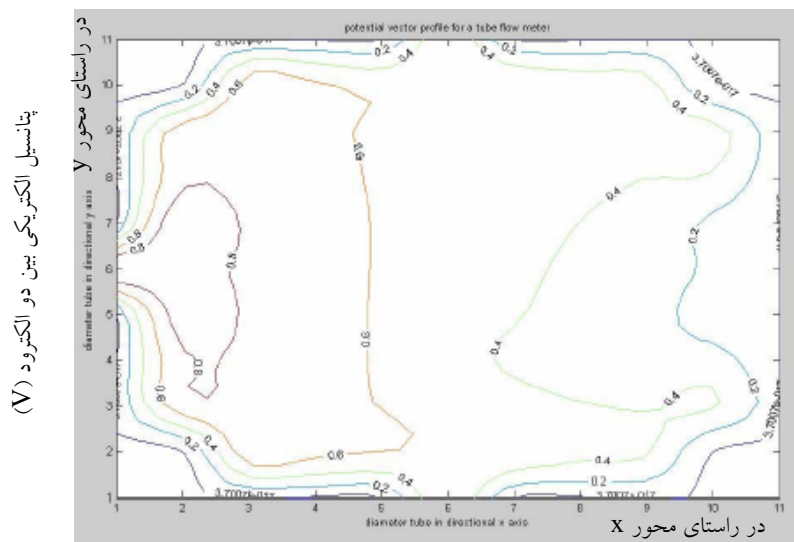
(الف)



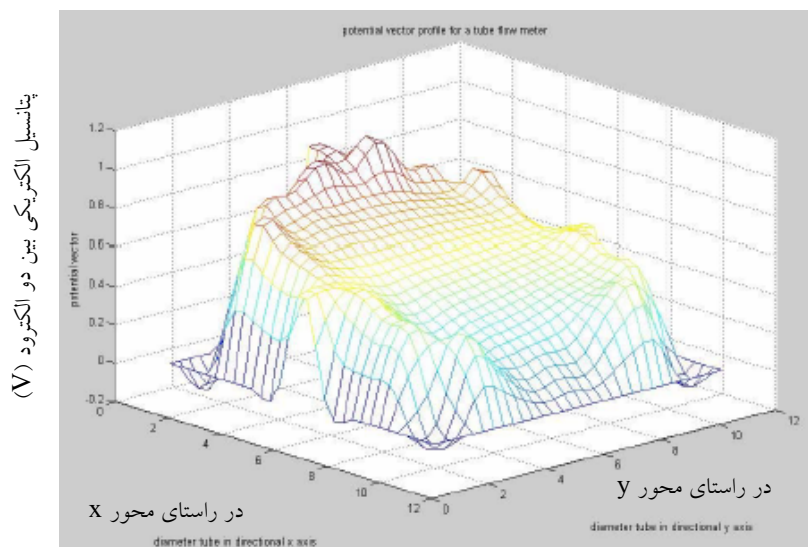
پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود (V)

(ب)

شکل ۹ نمایش توزیع پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود در حالت توپر بودن لوله؛ (الف) نمایش دوبعدی (ب) نمایش سه بعدی

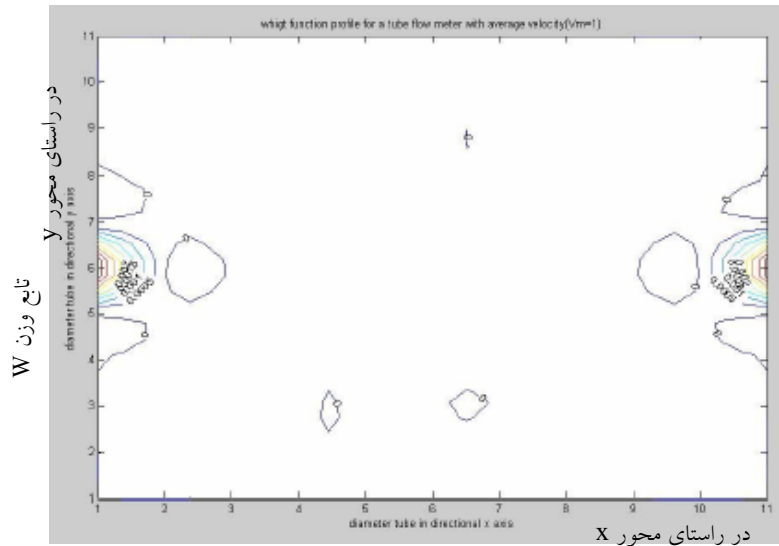


(الف)

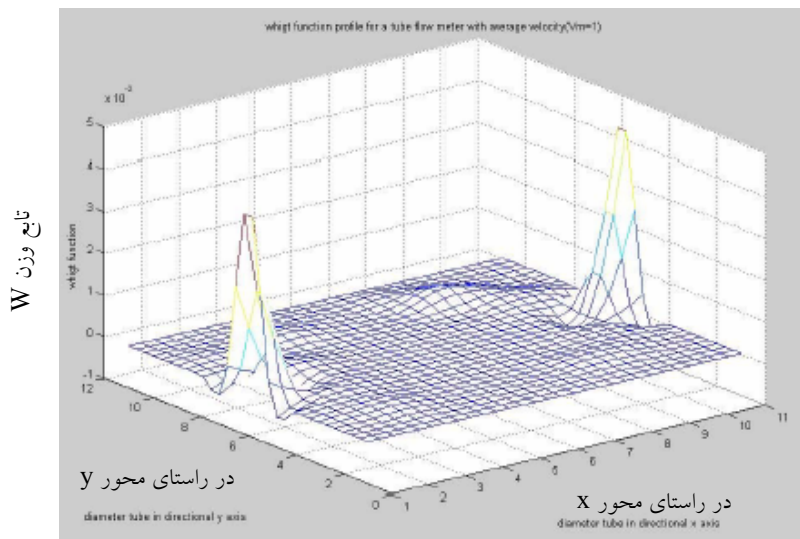


(ب)

شکل ۱۰ نمایش توزیع پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود با ۶۰٪ سطح مایع در لوله؛ (الف) نمایش دوبعدی (ب) نمایش سه‌بعدی

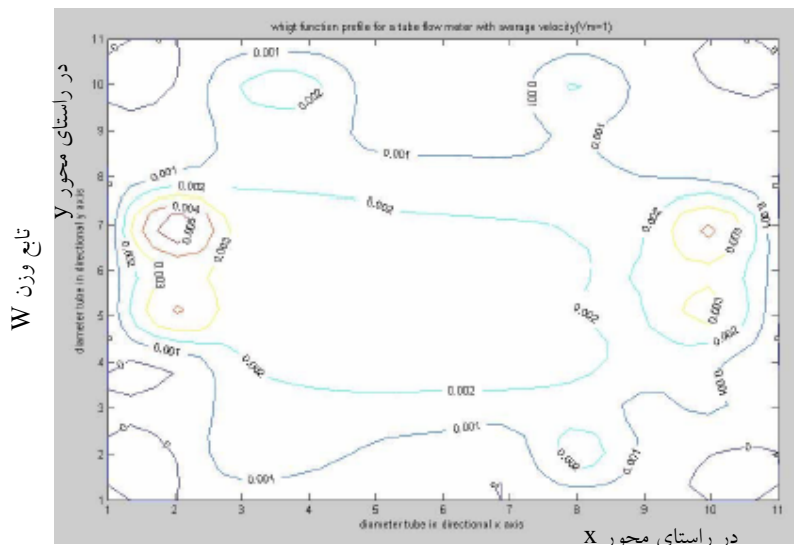


(الف)

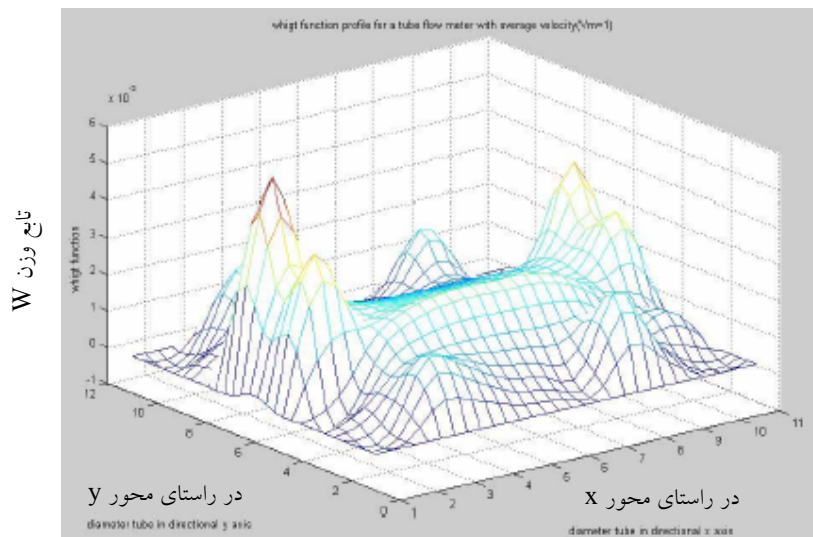


(ب)

شکل ۱۱ نمایش تابع توزیع وزن داخل فلومیتر برای سرعت ثابت $v_m = 1m/sec$ در حالت توپر بودن لوله؛ (الف) دو بعدی (ب) سه بعدی



(الف)



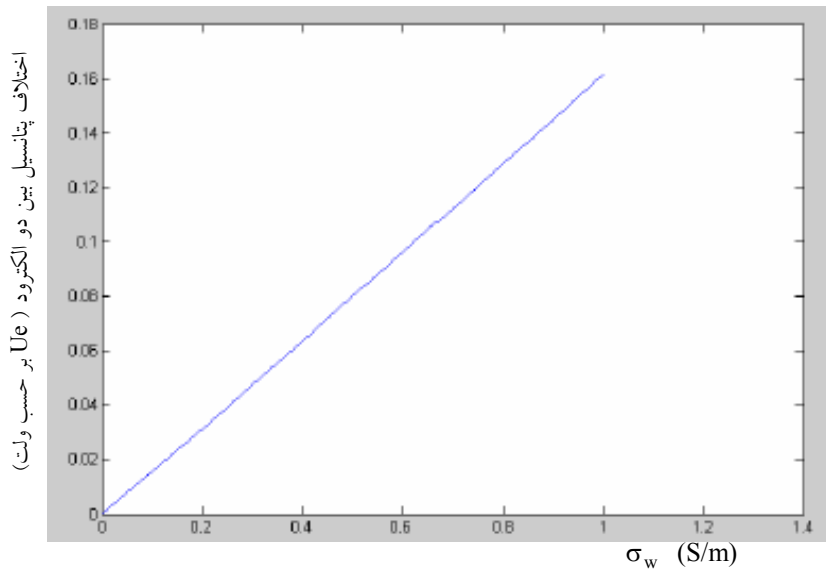
(ب)

شکل ۱۲ نمایش تابع توزیع وزن داخل فلومیتر برای سرعت ثابت $v_m = 1 \text{ m/sec}$ با $\sigma_w = 60\%$ سطح مایع در لوله؛ (الف) دو بعدی (ب) سه بعدی

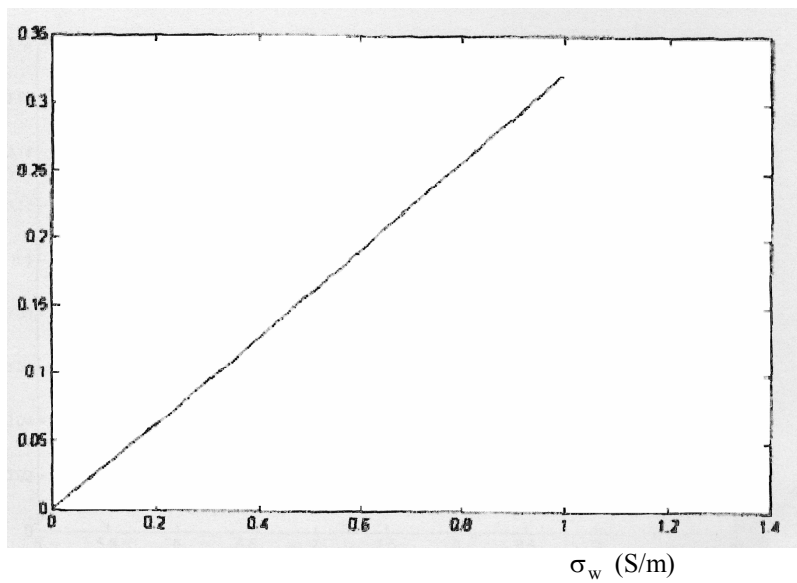
ثانیه نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل‌ها مشخص است، با افزایش ضریب رسانایی مایع عبوری (افزایش σ_w)، ولتاژ القایی بین دو الکترود، افزایش می‌یابد که البته نحوه تغییرات آن به صورت تقریباً خطی است. همچنین از مقایسه این دو شکل درمی‌یابیم که با افزایش سرعت مایع از 1 m/sec به 2 m/sec ، میزان ولتاژ القایی نیز تقریباً دو برابر می‌گردد.

عبوری، بیشترین تاثیر را در ولتاژ القاء شده خواهد داشت.

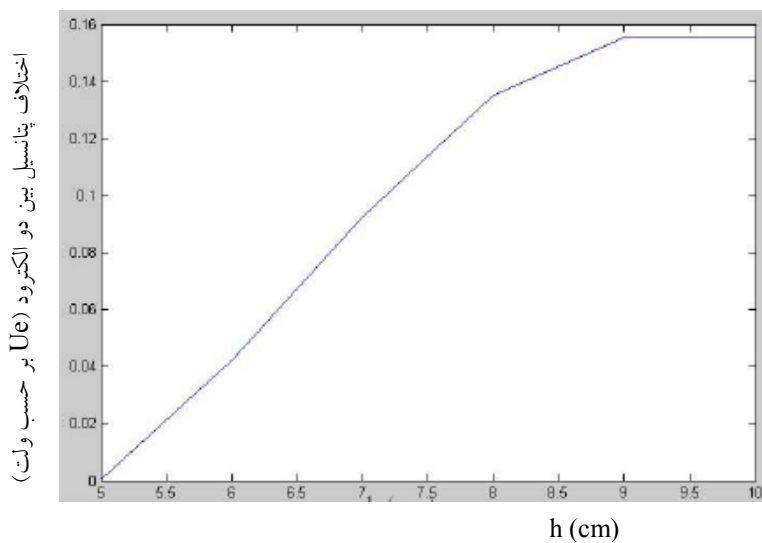
اثرات ضریب رسانایی مایع در ولتاژ القایی. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ولتاژ القاء شده بین دو الکترود را به‌ازای تغییرات در ضریب رسانایی مایع عبوری از داخل فلومیتر و به‌ازای سرعت‌های مختلف مایع با مقادیر ۱ و ۲ متر بر



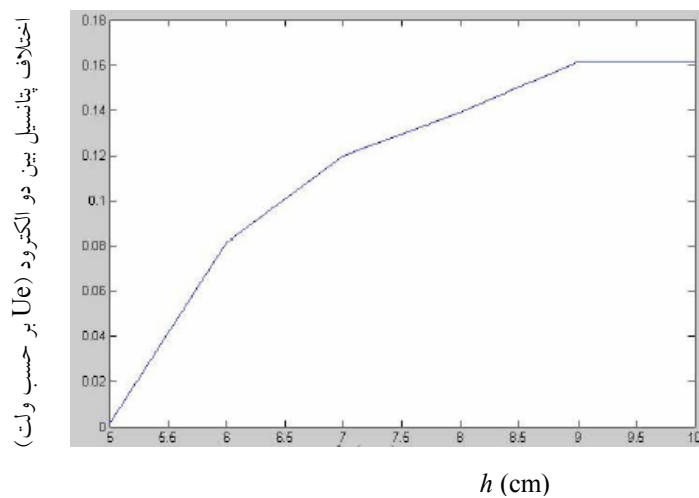
شکل ۱۳ ولتاژ القا شده بین دو الکترود در شرایط $\sigma_t = 0/1S/m$ و سرعت ثابت $v_m = 1m/sec$



شکل ۱۴ ولتاژ القا شده بین دو الکترود در شرایط $\sigma_t = 0/1S/m$ و سرعت ثابت $v_m = 2m/sec$



شکل ۱۵ ولتاژ القاء شده بین دو الکترود با تغییر در سطح آب به ازای $\sigma_w/\sigma_t = 1$



شکل ۱۶ ولتاژ القاء شده بین دو الکترود با تغییر در سطح آب به ازای $\sigma_w/\sigma_t = 10$

ارزیابی تغییرات ارتفاع سطح مایع در ولتاژ القاء شده بین دو الکترود، فلومیترومغناطیسی موردنظر، شبیه سازی شده که نتایج آن در شکل های (۱۵) و (۱۶) آورده شده است. این دو شکل برای نسبت های ضریب رسانایی مایع به سطح لوله، برابر ۱ و ۱۰ می باشد. با مقایسه نتایج این دو شکل درمی یابیم که با افزایش سطح

از این رو، در صورتی که ضریب رسانایی مایع عبوری، تغییر نکند، افزون بر آنکه تغییرات ولتاژ القایی نسبت به تغییرات σ_w رابطه خطی دارد، نسبت به تغییرات سرعت مایع عبوری نیز تغییرات خطی خواهد داشت.

اثرات ارتفاع سطح مایع در ولتاژ القایی. به منظور

برخوردار باشد. همچنین نحوه تغییرات ولتاژ القایی بین دو الکتروود و تابع توزیع وزن به‌ازای حالت‌های توپیر بودن لوله و ۶۰٪ سطح مایع و اثرات ضریب رسانایی مایع و ارتفاع سطح آن بر روی این ولتاژ، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. کاربرد این نحوه اندازه‌گیری نرخ فلوی سیال برای مایعات، بسیار وسیع می‌باشد و به‌طور کلی می‌تواند برای هر نوع مایع رسانا نظیر اسیدها و پلیمرها در صنعت شیمی و مایعات رادیواکتیویته و مخصوصاً پس‌آب‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین دو مورد مدل عددی و تابع ضریب تصحیح k_{HS} برای تغییراتی که در این طراحی وجود داشتند و محاسبه گردیده‌اند، کالیبراسیون خشک برای فلومیترا را مقدور می‌سازد. این تغییرات k_{HS} شامل سطح مایع، ضریب رسانایی مایع و دیواره لوله می‌باشد. بنابراین، یک تابع انتقال برای فلومیترا و تخمین خطای اندازه‌گیری به‌علت تغییر مشخصات فلوی مایع را می‌توان در طول مراحل طراحی به‌دست آورد.

مایع در داخل لوله (به‌شرط ثابت بودن سرعت مایع عبوری)، اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود افزایش می‌یابد. البته در صورتی که لوله در وضعیت تقریباً توپیر قرار گیرد، ولتاژ القایی ثابت خواهد ماند. گفتنی است با توجه به آنکه الکتروودها را به‌صورت نقطه‌ای در نظر گرفته‌ایم، برای یک فلومیترا با مقطع دایره‌ای، سطح مایع نباید کمتر از نصف لوله باشد؛ زیرا به‌ازای حالت‌هایی که سطح مایع عبوری، تماسی با الکتروودها نداشته باشد آنگاه ولتاژ القایی به‌وجود آمده نیز مقادیر دقیق و قابل قبولی را برای اندازه‌گیری به نمایش نمی‌گذارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، آنالیز و طراحی فلومیتراهای الکترومغناطیسی برای مایعات رسانا به شکل مناسبی ارائه شده است. در این طراحی، با استفاده از شبکه‌های عصبی، کالیبراسیون این نوع فلومیتراها انجام گردیده است تا نتایج شبیه‌سازی بعدی از دقت بسیار زیادی

مراجع

1. J. A. Shercliff, 'The Theory of Electromagnetic Flow Measurement', London, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, pp. 10-35, (1962).
2. A. Michalski, and S. Wincenciak, 'Weight Vector in Designing of Primary Transducers for Electromagnetic Flowmeters', *Archives Electronic Engineering*, Vol. XLVII, No. 183-1, pp. 81-99, (1998).
3. M. K. Bevir, 'The Theory of Induced Voltage Electromagnetic Flowmeters', *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 43, part 3, pp. 577-590 (1970).
4. E. G. Strangas, and T. W. Scott, 'Design of a Magnetic Flowmeter for Conductive Fluids', *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, Vol. 37, No. 1, pp. 35-38, (1998).
5. R. C. Baker, 'Flow Measurement Handbook: Industrial Design, Operating, Performance, and Applications', Cambridge University Press, (2005).
6. A. Michalski, J. Starzynski, and S. Wincenciak, 'Optimal Design of the Coils of the Electromagnetic Flowmeter', *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol 34, No. 5, pp. 2563-2566, (1998).

7. J. E. Cha, Y. C. Ahn, and M. H. Kim, 'Flow measurement with an electromagnetic flowmeter in two-phase bubbly and slug flow regimes', *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 12, No. 2, pp. 329-339., (2002).
8. A. Michalski, 'Dry Calibration Procedure of Electromagnetic Flowmeter for Open Channels', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 49, No. 2, pp. 435-438, (2000).
9. A. Michalski, 'Flow Measurement in Open Irrigation Channels', *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, Vol. 3, No. 3, pp. 12-16, (2000).
10. A. Michalski, J. Starzynski, and S. Wincenciak, 'Electromagnetic Flowmeters for Open Channels- Two Dimensional Approach to Design Procedures', *IEEE Sensors Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 52-61, (2001).
11. B. Li, J. Yao, and X. Li, 'The Analysis and Application of the Rectangular Electromagnetic Flowmeter', *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Vail, CO, USA, May, pp. 490-494., (2003).