ISME

سنجش دبی جریان هوا به روش فیلم داغ

محمدعلي اردكاني[1]
استاديار

به‌منظور بهینه‌سازي سيستم‌هاي سيالاتي نياز است كه دبي‌سنجي انجام شود. دبي‌سنجي به روش‌هاي مختلفي نظير ديفرانسيلي (اختلاف فشاري)، خطي (اولتراسونیک، گردابه‌اي ...) و غير خطي(سيم و يا فيلم داغ) انجام مي‌شود. هريک از روش‌هاي فوق داراي مزايا و معايب مربوط به خود مي‌باشند. از جمله مزاياي دبي‌سنجي با استفاده از سيم و يا فيلم داغ دقت بالاي آن، اندازه‌گيري مقادير دبي كم، بازه وسيع دبي و همچنين افت كم فشار مي‌باشد. اين نوع دبي‌سنج داراي قسمت‌هاي مختلف نظير سنسور، مدارات الكترونيكي، نرم افزار و قسمت‌هاي مكانيكي نظير لوله، توري و لانه زنبوري براي يكنواخت نمودن جريان هوا است. در این مقاله منحنی‌های کالیبراسیون سنسورهای سیم و فیلم داغ با یکدیگر مقایسه شده و با توجه به نتایج حاصله سنسور مناسب دبی‌سنج انتخاب شده است. سپس اثر توری و نوع آن بر یکنواخت نمودن جریان و کاهش شدت اغتشاش‌های جریان هوا مورد بحث قرار گرفته و مكان مناسب براي تعبيه سنسور دبی‌سنج تعیین می‌شود. در مورد تأثیر دما و اصلاح خطای ناشی از تغییر دمای جریان هوا نیز روش مناسب ارایه شده و در خاتمه نیز کالیبراسیون دبی‌سنج ساخته شده، ارایه می‌شود.

واژه‌هاي راهنما: دبي‌سنجي، سنسور سيم داغ و فيلم داغ، یکنواختی جریان، توری و اثر دما

۱ـ مقدمه

در صنايع امروزي، اندازه‌گيري دبي حجمي و يا دبي جرمي‌جريان هوا از اهميت خاصي برخوردار است. در صنايع پتروشيمي، گاز، نفت و غيره به‌منظور كنترل كيفيت فرايندهاي شيميايي و فيزيكي نياز به اندازه‌گيري دبي حجمي و يا جرمي هوا مي‌باشد. در صنايع مرتبط با سوخت و احتراق به‌منظور بهينه سازي فرايند احتراق و كاهش آلاينده‌ها، همچنين براي بررسي عملكرد موتورهاي احتراق داخلي نياز به اندازه‌گيري دبي حجمي و يا جرمي سوخت و هوا است. حداقل ۱۰۰ نوع دبي‌سنج [۱] در بازار موجود است كه مهندسان مي‌توانند براي اندازه‌گيري دبي حجمي و يا جرمي از آنها استفاده نمايند. نوع سيال (اعم از گاز، بخار و يا مايع)، بازه اندازه‌گيري دبي حجمي و يا جرمي، دقت مورد نياز براي اندازه‌گيري و قيمت دبي‌سنج از جمله پارامترهاي مهم در انتخاب و خريد دبی‌سنج‌ها است.

---

[1] عضو هيئت علمی پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ardekani@irost.org

اساس عملكرد بسياري از دبی‌سنج‌ها را مي‌توان به‌صورت عملكرد ديفرانسيلي، خطي و غير خطي تقسيم‌بندي نمود. دبي‌سنج با عملكرد ديفرانسيلی، دبي حجمي و يا جرمي هوا را بر اساس اندازه‌گيري اختلاف فشاري كه ناشي از اوريفيس، نازل و توري در جهت جريان ايجاد مي‌شود، اندازه‌گيري مي‌كند. در اين نوع دبی‌سنج، اختلاف فشار (ولتاژ خروجي دبي‌سنج) با دبي حجمي و يا جرمي رابطه توان دوم دارد. اما خروجي دبي‌سنج با عملكرد خطی با دبي حجمي و يا جرمي هوا، رابطه خطي دارد. دبی‌سنج‌هاي توربيني، گردابه‌اي و اولتراسونيك از اين نوع دبی‌سنج‌ها مي‌باشند. مهمترين نوع دبی‌سنج‌هاي غيرخطي، دبی‌سنج‌هايي از نوع سيم و يا فيلم داغ مي‌باشند. اين نوع دبی‌سنج‌ها براساس انتقال حرارت از يك سنسور سيم و يا فيلم داغ به هوا عمل مي‌كنند. اين نوع دبی سنج‌ها دارای ويژگي‌های منحصر به فرد بوده و قابليت اندازه‌گيری دبی‌های پايين را دارا می‌باشد، كه دبی‌سنج‌های ديگر قادر به اندازه‌گيری آن نمی‌باشند [۲]، همچنين با استفاده از اين نوع دبی‌سنج می‌توان بازه وسيعی از دبی حجمی و يا جرمی را اندازه‌گيری نمود. از اين‌رو استفاده از اين نوع دبی‌سنج برای اندازه‌گيری دبی جرمی جريان هوای ورودی به موتور خودرو در شرايط مختلف كاری مناسب می‌باشد. از ديگر مزايای دبی‌سنج از نوع سيم و يا فيلم داغ، پاسخ فركانسی سريع آن می‌باشد[۴،۳]، كه می‌تواند تغييرات سريع دبی جريان را اندازه‌گيری نمايد. افت فشار در مسير اين‌گونه دبی‌سنج‌ها نيز كم می‌باشد. علی‌رغم مزايای فوق، اين نوع دبی‌سنج، سرعت محلی را در مركز دبی‌سنج اندازه‌گيری می‌نمايد كه بايد در آن محل سرعت جريان هوا، يكنواخت و شدت اغتشاش‌های آن نيز كم باشد. بدين‌منظور برای كاهش انحراف جريان هوا و شدت اغتشاش‌های آن از لانه زنبوری و توری استفاده می‌شود[۶،۵]. همچنين تغيير دمای جريان هوا سبب بروز خطا در اندازه‌گيری دبی حجمی و يا جرمی می‌شود كه بايد اصلاحات لازم را انجام داد[۹-۷]. انتخاب نوع سنسور برای عملكرد مناسب دبی‌سنج نيز از اهميت ويژه‌ای برخوردار است.

در اين مقاله اصول عملكرد دبی‌سنج با سنسور سيم و يا فيلم داغ بيان شده و اجزای دبی‌سنج فيلم داغ توصيف می‌شود. سپس منحنی كاليبراسيون سنسورهای سيم داغ و فيلم داغ با يكديگر مقايسه شده و سنسور مناسب برای سنجش دبی هوا انتخاب می‌شود. همچنين تأثير دما بر روی اندازه‌گيری دبی جريان هوا بررسی شده و روش مناسبی برای محاسبه خطای جريان ناشی از آن ارايه می شود. در ادامه تأثير توری بر روی كاهش غير يكنواختی و شدت اغتشاش‌های جريان هوا بررسی شده و مكان مناسب برای نصب توری و سنسور مشخص می‌شود. در خاتمه نيز منحنی كاليبراسيون دبی‌سنج ارايه می‌شود.

۲ـ روش آزمايش

آزمايش‌های مورد نظر در آزمايشگاه تونل باد پژوهشكده مكانيک سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ايران انجام گرفته است. آزمايش‌هاي انجام شده براي سنجش دبي جريان هوا به روش فيلم داغ به شرح زير است:

۱) بررسی منحنی‌های كاليبراسيون سنسورهای سيم و فيلم داغ و همچنين اثر دما بر روی مقدار خطای اندازه‌گيری

۲) بررسی يكنواختی و كاهش شدت اغتشاش‌های جريان پايين‌دست توری در دبی‌سنج

۳) كاليبره نمودن دبی‌سنج و سنجش دبی‌های مختلف جريان هوا

برای به‌دست آوردن منحنی مشخصه و کالیبراسیون سنسورهای فوق، از یک تونل باد کوچک مدار باز استفاده شده است (شکل ۱). این تونل باد از نوع دمنده بوده که با استفاده از یک دستگاه کنترل دور موتور، دور فن و در نتیجه سرعت جریان هوا کنترل می‌شود. به‌منظور به‌دست آوردن جریان یکنواخت با اغتشاش‌های کم، در این تونل باد از چهار سری توری و یک شبکه لانه زنبوری استفاده شده است. برای ایجاد تغییرات دما نیز، المنت‌های حرارتی به‌همراه یک دستگاه دیمر به‌کار گرفته شده است. المنت‌های حرارتی در بالادست توری‌ها و در داخل محفظه دیفیوزر قرار دارند. برای کالیبراسیون سنسورهای فوق در دستگاه جریان‌سنج از لوله استاتیکی پیتوت به‌همراه فشارسنج الکترونیکی استفاده شده است.

سنسورهای مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع سیم و فیلم داغ می‌باشند که مشخصات آنها در جدول ۱ ارایه شده است. دستگاه جریان‌سنج مورد استفاده از نوع دما ثابت CTA (Constant-Temperature Anemometer) ساخت شرکت فراسنجش صبا می‌باشد.

به‌منظور بررسی یکنواختی و کاهش شدت اغتشاش‌ها، مطابق شکل ۲ قسمت‌های مکانیکی دبی‌سنج ساخته شده و در آن لانه زنبوری و توری نصب شده و پایین دست توری با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده پراب و جریان‌سنج سیم داغ توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان اندازه‌گیری می‌شوند. بدین منظور مطابق شکل ۳ يك بستر تست ایجاد شده و در آن با استفاده از فن سانتریفیوژ که دور موتور آن توسط کنترل دور تنظیم می‌شود، جریان هوا با دبی کنترل شده‌ای ایجاد می‌شود. به‌منظور به‌دست آوردن پروفیل سرعت توسعه یافته از لوله‌ای به‌طول $1/5\ m$ استفاده شده است. قطر داخلی لوله دبی‌سنج $100\ mm$ بوده که برای اندازه‌گیری دبی جرمی kg/h ۱۰۰۰ـ۱۰ مناسب می‌باشد. مشخصات توري‌هاي مورد استفاده در این آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. در جدول فوق β نسبت سطح باز توري به سطح کامل، f نسبت شدت اغتشاش‌های قبل به بعد توری، K ضریب افت فشار در توری، d قطر سیم توری، l فاصله بین مرکزهای دو سیم و Mesh تعداد سوراخ‌های توری در طول یک اینچ می‌باشد. آزمایش‌ها در سرعت‌هاي $10\ m/s$، $20\ m/s$ و $30\ m/s$ انجام شده است.

برای کالیبراسیون دبی‌سنج نیز از بستر آزمایش مطابق شکل ۳ استفاده شده است که دبی‌سنج ساخته شده را به‌طور سری با دبی‌سنج استاندارد ساخت شرکت Sensy flow قرار داده و منحنی ولتاژ خروجی دبی‌سنج بر حسب دبی جرمی اندازه‌گیری شده از دبي‌سنج Sensy flow به‌دست می‌آید.

۳ـ اصول عملکرد دبي‌سنج سیم و یا فیلم داغ

اصول اندازه‌گيري در دبي‌سنج سيم داغ، برپايه انتقال حرارت همرفت از سنسور به جريان هوا مي‌باشد که اين انتقال حرارت را مي‌توان توسط معادله (۱) بيان نمود:

$$Q = h.A_s.(T_w - T_a) = hA_s\left(\frac{R_w - R_a}{R_a\alpha}\right) \qquad (۱)$$

در معادله فوق h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، A_s سطح جانبي سنسور، T_w دماي سنسور، T_a دماي محیط، R_w مقاومت سنسور در دمای T_w، R_a مقاومت سنسور در دمای محیط و α ضریب حرارتی سنسور می‌باشد. در این قسمت ابتدا انتقال حرارت از سیم با طول بي‌نهایت که داراي توزیع یکنواخت دماي T_w

است، بررسي شده و سپس به مبحث انتقال حرارت از سيم داغ با طول محدود l مي‌پردازيم. انتقال حرارت جابه‌جايي اجباري براي سيمی با طول بلند را مي‌توان به‌صورت معادله (۲) بيان نمود [۱۰].

$$Nu = 0\cdot42\,Pr^{0\cdot20} + 0\cdot57\,Pr^{0\cdot33}\,Re^{0\cdot50} \quad (۲)$$

در معادله فوق خواص سيال در دمای فیلم $T_f = (T_w + T_a)/2$ برحسب درجه حرارت کلوین محاسبه می‌شود. همچنین $Nu=hd/k$ عدد نوسلت، $Pr=\mu Cp/k$ عدد پرانتل و $Re=\rho Ud/\mu$ عدد رینولدز بوده که در اعداد بی‌بعد فوق d قطر سنسور، h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا، k ضریب هدایت گرمایی هوا، μ لزجت دینامیکی، Cp گرمای ویژه در فشار ثابت هوا و ρ چگالی هوا است. مقدار حرارت تولید شده در سیم داغ به‌صورت معادله (۳) بیان می‌شود:

$$\dot{Q} = R_w I^2 \quad (۳)$$

که I جریان الکتریکی عبوری از سیم گرم مي‌باشد و با توجه به معادله (۱) خواهیم داشت:

$$R_w I^2 = hA_s(T_w - T_a)$$
$$R_w I^2 = h\,\pi\,d\,l(T_w - T_a) = \pi\,l\,Nu\,k(T_w - T_a) \quad (٤)$$

در معادله فوق l طول سنسور می‌باشد. با ادغام معادله‌هاي (۲) و (۴) معادله (۵) به‌دست مي‌آيد:

$$R_w I^2 = \frac{\pi\,l\,k}{\alpha_a}\left(\frac{R_w - R_a}{R_a}\right)(0.42\,Pr^{0.2} + 0.57\,Pr^{0.33}\,Re^{0.5}) \quad (۵)$$

معادله فوق را نيز مي‌توان به‌صورت معادله تواني بيان نمود:

$$\frac{R_w I^2}{(R_w - R_a)} = A + BU^{0.5} \quad (٦)$$

در معادله فوق U سرعت جریان هوا بوده و مقادیر ثابت A وB عبارتند از:

$$A = 0.42\left(\frac{\pi\,k\,l}{R_a\alpha_a}\right)\left(\frac{\mu\,c_p}{k}\right)^{0.2} \quad (۷)$$

$$B = 0.57\left(\frac{\pi\,k\,l}{R_a\alpha_a}\right)\left(\frac{\mu\,c_p}{k}\right)^{0.33}\left(\frac{\rho\,d}{\mu}\right)^{0.5} \quad (۸)$$

معادله‌های (٦) الی (٨) به‌صورت تحليلي براي انتقال حرارت از سيم بلندي که در آن فقط انتقال حرارت جابه‌جايي اجباري در نظر گرفته شده، به‌دست آمده است. با توجه به این‌که در سنسور سیم و یا فیلم داغ بیشترین انتقال حرارت به‌صورت جابه‌جايي اجباري است، بنابراين معادله‌هاي فوق مبناي مناسبي براي تحليل عملکرد سنسورهای سیم و یا فیلم داغ مي‌باشند. معادله (۶) غيرخطي بوده و مقادير A و B طبق معادله‌هاي (۷) و (۸) به مقدار مقاومت سنسور، قطر آن و مشخصه‌هاي سيال بستگي دارند.

با توجه به این‌که طول سنسور محدود بوده، روابط انتقال حرارت آن با طول بي نهايت، متفاوت بوده و انتقال حرارت هدایت از سنسور به پايه‌هاي نگه‌دارنده آن نیز وجود دارد. بنابراين رابطه ميان سرعت U و ولتاژ خروجي E دبی‌سنج را مي‌توان طبق رابطه توانی زير بيان نمود [۱۱]:

$$(\overline{E} + e)^2 = E^2(t) = A + BU^n(t) \quad (۹)$$

که مقادير A,B,n از طريق کاليبراسيون به‌دست مي‌آيند. در رابطه فوق $E(t)$ ولتاژ خروجی به‌صورت لحظه‌ای، $U(t)$ سرعت لحظه‌ای جریان هوا، $\overline{E}$ مقدار متوسط ولتاژ خروجی و e نوسان‌های ولتاژ خروجی می‌باشد.

مقدار n در معادله (۹) بین ۰/۴ تا ۰/۵۵ است. طبق مرجع [۱۲] بـرای بـازه $0/01<Re<44$، بهتـرین مقـدار برای n در معادله فوق ۰/۴۵ می‌باشد. برای سنسور سیم داغ به قطر ۵ میکرومتر، سـرعت جریـان هـوا بـرای $Re=25$ حدود ۷۰ m/s است. مقادیر ضرایب A , B برای سنسورهای مختلف متفاوت است.

۴ـ اجزای تشکیل دهنده دبی‌سنج سیم و یا فیلم داغ

دبی‌سنج سیم و یا فیلم داغ شامل قسمت‌های سنسور، مدارهای الکترونیکی دما ثابت *CTA* و لوله دبـی‌سـنج مـی‌باشـد. سنسـور دبـی‌سـنج مـی‌توانـد از نـوع سـیم داغ از جـنس تنگسـتن بـا قطـر ۵ μm، فـیلم داغ بـا قطر ۱۵۰ـ۵۰ μm باشد. سنسور سیم داغ پاسخ فرکانسي وسیعي نسبت به تغییرات جریان سیال داشـته امـا استحکام مکانیکي آن محدود است. همچنین با توجه به قطر کم آن، نسبت به ذرات موجـود در جریـان هـوا بسیار حساس می‌باشد.

به‌منظور افزایش استحکام سنسور و کاهش حساسیت آن نسبت به آلودگیها، پـراب بـا سنسـور فـیلم داغ طراحي و ساخته شده است [۱۳]. این سنسور به‌طور قابل توجهي مقاوم‌تـر از سنسـور سـیم داغ اسـت ولـي حساسیت کمتري نسبت به تغییر سرعت لحظه‌اي جریان سیال دارد. سنسورهاي فیلم داغ، يك لايه نازك به ضخامت تقریبي ۰/۱ μm از نیکل مي‌باشند که بر روي يك عايق از جنس کوارتز به شکل استوانه لایه‌گـذاري مي‌شوند.

مدار الکترونیکي دما ثابت CTA یکي از قسمت‌هاي اصلي دستگاه دبي‌سنـج سیـم و یـا فـیلم داغ اسـت، شکل ۴ این مدار را به‌طور شماتيك نشان مي‌دهد. مدار الکترونیکـي دمـا ثابـت CTA شـامل پـل وتسـون، تقویت‌کننده تفاضلي، تنظیم‌کننده پاسخ فرکانسي و تقویت‌کننده جریان است. مـدار الکترونیکـي دمـا ثابـت CTA طوري طراحي شده است که به‌طور خودکار پل وتسون را متوازن مي‌کند [۱۴]. با اسـتفاده از مقاومـت متغیر R_3، سنسور دستگاه جریان‌سنج R_w گرم شده و مقاومت سنسور سیم داغ طبق رابطـه $R_w=(R_3.R_1)/R_2$ محاسبه می‌شود. دماي سنسور در مقاومت R_w نیز طبق رابطه $R_w = R_a(1+\alpha(T_w - T_a))$ محاسبه می‌شـود. هنگامي‌که سنسور در جریان سیال قرار مي‌گیرد، مقاومت سنسور کاهش یافته و پل وتسون از حالـت تـوازن خارج می‌شود، به‌منظور توازن پل وتسون جریان الکتریکي بیشتري به‌طور خودکار بر روي پل اعمال می‌شود، بنـابراین ولتـاژ بـالاي پـل E افـزایش یافتـه و ایـن ولتـاژ بـا سـرعت جریـان سـیال طبـق معادلـه (۹) $E^2(t)=A+BU^n(t)$ نیز مشخص می‌شود.

به‌منظور اندازه‌گیری دبی جریان، سنسور را باید درون لوله دبی‌سنج نصب نمود. لوله‌ای که سنسور در آن قرار می‌گیرد باید طوری طراحی شود که نصب آن راحت و توزیع سـرعت در آن کمتـر تحـت تـأثیر جریـان بالادست قرار گیرد. از این‌رو به‌منظور یکنواخت نمودن جریان و کاهش شدت اغتشاش‌های جریان در لوله، از توری با مش‌های مختلف و برای مستقیم نمودن جریان و کـاهش انحـراف جریـان از لانـه زنبـوری اسـتفاده می‌شود. افت فشار Δp در توري‌ها طبق معادله (۱۰) به‌دست مي‌آید:

$$\Delta p = K\frac{1}{2}\rho U^2 \qquad (۱۰)$$

که U سرعت در پایین دست توري، ρ چگالي جریان هوا و K ضریب افت فشار است کـه طبـق معادلـه (۱۱) به‌دست مي‌آید [۵] :

$$K = 6(1-\beta)\beta^{-5/3}(\frac{Ud}{\nu})^{-1/3} \quad (۱۱)$$

d قطر سيم توري، ν لزجت سينماتيکی و β نسبت سطح مقطع باز به سطح کل توري است و طبق معادله (۱۲) به‌دست مي‌آيد:

$$\beta = \left[1-\frac{d}{l}\right]^2 \quad (۱۲)$$

l فاصله بين مرکزهاي دو سيم توري است. کاهش شدت اغتشاش‌های جريان هوا توسط توري‌ها طبق معادله‌های (۱۳) و (۱۴) مشخص مي‌شوند[۶]:

$$f = \frac{1}{\sqrt{1+K}} \quad (۱۳)$$

$$f = \frac{\sqrt{(\overline{u'_2})^2}}{\sqrt{(\overline{u'_1})^2}} \quad (۱۴)$$

$\sqrt{(\overline{u'_1})^2}$ و $\sqrt{(\overline{u'_2})^2}$ شدت اغتشاش‌هاي قبل و بعد از توري می‌باشند. مقادير و مشخصه‌های توری‌های مورد استفاده در دبی‌سنج در جدول ۲ نشان داده شده است.

۵ـ بررسی نتايج

۱ـ۵ـ بررسي منحني کاليبراسيون سنسورهاي سيم و فيلم داغ

منحني کاليبراسيون سنسورهای سيم و فيلم داغ در نسبت فراگرمايي $\left(\frac{R_w - R_a}{R_a}\right) = 0.6$ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل فوق ديده می‌شود دو منحنی غيرخطی بوده و می‌توان آن‌را با معادله چند جمله‌ای از مرتبه ۳ و ٤ يا معادله توانی (۹) به‌طور مناسبی تقريب نمود که مقدار n در معادله (۹) حدود ۰/٤۵ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است تغييرات ولتاژ خروجی دستگاه جريان‌سنج در سرعت‌های کم بالا بوده و شيب آن در سرعت‌های بالا کاهش يافته و در نتيجه می‌توان از اين سنسورها برای اندازه‌گيری سرعت‌های کم استفاده نمود. همچنين با توجه به تغيير شيب منحنی فوق می‌توان تشخيص داد که خطای نسبی در بازه وسيع سرعت، مشابه بوده است، از اين‌رو با استفاده از اين سنسورها می‌توان در بازه وسيعی تغييرات سرعت و يا دبی را اندازه‌گيری نمود که با استفاده از دبی‌سنج‌های ديفرانسيلی نمی‌توان بازه وسيع تغييرات دبی را اندازه‌گيری کرد. با توجه به شکل ۵ (الف) می‌توان تشخيص داد که مقدار ولتاژ خروجی سنسور فيلم داغ در دستگاه جريان‌سنج به مراتب بالاتر از سنسور سيم داغ در دستگاه جريان‌سنج می‌باشد. همچنين با توجه به شکل ۵ (ب) می‌توان تشخيص داد که مقادير A و B در سنسور فيلم داغ به مراتب بالاتر از سنسور سيم داغ می‌باشد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است رابطه E^2 و $U^{0.45}$ به‌طور خطی است و مقدار ولتاژ در سرعت صفر E_{zero} برای سنسور سيم داغ (v) ۱/۲۳ و برای سنسور فيلم داغ (v) ۲/۳۵ می‌باشد. اين امر ناشی از اختلاف سطح جانبی سنسورها می‌باشد. معادله‌های (۷) و (۸) تأييد کننده اين موضوع می‌باشند. اگرچه پاسخ فرکانسی سنسور فيلم داغ کمتر از سنسور سيم داغ است، اما با توجه به اين‌که ولتاژ خروجی سنسور فيلم داغ در دستگاه جريان‌سنج از سنسور

سیم داغ بالاتر می‌باشد، در دستگاه دبی‌سنج بهتر است که از سنسور فیلم داغ استفاده نمـود. در ایـن حالـت نیازی به استفاده از مدار تطبیق دهنده سیگنال جهت تقویت ولتاژ خروجی وجود ندارد. آزمایش‌های مختلفی بر روی منحنی‌های کالیبراسیون سنسورهای سیم و یا فیلم داغ انجام گرفته که نشان می‌دهـد منحنـی‌هـای کالیبراسیون برای هر سنسور منحصر بـه خـود آن سنسـور بـوده و قابـل اسـتفاده بـرای سنسـورهای دیگـر نمی‌باشد. برای استفاده از منحنی کالیبراسیون می‌توان به دو روش شکل ۵ (الـف) و (ب) اسـتفاده نمـود، در حال حاضر با توجه به رشد سرعت تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط رایانه‌ها می‌توان به‌راحتی از شـکل ۵ (الـف) استفاده و مقدار $E(t)$ را بـه $U(t)$ تبـدیل نمـود و بـا اسـتفاده از سـرعت لحظـه‌ای، اغتشـاش‌هـای جریـان را به‌دست‌آورد.

۲ـ۵ـ بررسی اثر دماي محیط بر سرعت و یا دبي اندازه‌گیری شـده توسـط سنسـور فیلم داغ

همان‌گونه که بیان شد، دبي‌سنج با استفاده از روش فیلم داغ بر مبنـاي انتقـال حـرارت از سنسـور گـرم بـه محیط مي‌باشد. این مقدار انتقال حرارت بستگي به اختلاف دماي سنسور و جریان هوا $(T_w - T_a)$ و همچنین سرعت جریان هوا دارد. با تغییر دماي جریان هوا از دماي مرجع (دما در هنگام کالیبراسیون)، سرعت جریـان هواي اندازه‌گیري شده داراي خطا مي‌شود که این خطا حدود ۲% به‌ازاي هر $1^\circ C$ مـي‌باشـد [۱۵]. از ایـن‌رو نیاز است که سرعت اندازه‌گیري شده اصلاح شود. ایـن امـر بـه دو روش سـخت‌افـزاري و نـرم‌افـزاري انجـام مي‌پذیرد. در روش سخت‌افزار با استفاده از مقاومت حساس به دمـا و قـراردادن آن در پـل وتسـون، اخـتلاف دماي سنسور و جریان هوا $(T_w - T_a)$ ثابت نگه‌داشته مي‌شود. در این حالت اگر دماي جریان هوا افزایش یابد، مقاومت حساس به دما طوري عمل مي‌کند که نسبت فراگرمایي سنسور افزایش و در نتیجه T_w نیـز افـزایش یافته و مقدار $(T_w - T_a)$ ثابت شود. در روش تحلیلي پس از اندازه‌گیري دماي جریان هوا، ضریب اصلاح طبق معادله زیر:

$$\left(\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a}\right)^n \qquad (۱۵)$$

تعیین مي‌شود [۱۵]. در معادله فوق T_a دماي جریان هوا و T_r دماي مرجع و T_w دماي سنسـور مـي‌باشـد. n ضریب ثابت بوده و حدود ۰/۵ مي‌باشد. پس از اندازه‌گیري ولتـاژ خروجـي *CTA*، ولتـاژ را در ضـریب اصـلاح معادله (۱۵) ضرب نموده سپس با استفاده از معادله کالیبراسیون، سرعت جریان هوا اندازه‌گیری مي‌شود.

شکل ۶ تأثیر افزایش دماي جریان هوا نسبت به دماي ثابت مرجع T_r =$22^\circ C$ را براي سنسـور فـیلم داغ در دماي T_w =$191^\circ C$ نشان مي‌دهد. با افزایش دماي جریان هوا، خطاي سرعت اندازه‌گیـري شـده، افـزایش مي‌یابد و سرعت جریان هوا را کمتر از مقدار واقعي نشان مي‌دهد. همچنین در شکل فوق پس از اصلاح تأثیر دما، سرعت اندازه‌گیري شده نیز نشان داده شده است. همان‌گونه در شکل فوق نشان داده شده، براي افزایش دماي حدود $36^\circ C$ از دماي مرجع، خطایي حدود ۷۰% وجود دارد. در صورت انتخاب n=۰/۶ در معادله (۱۵) این خطا ناچیز مي‌شود. شکل ۷ تأثیر کاهش دماي جریان هوا نسـبت بـه دمـاي مرجـع T_r =$58^\circ C$ را بـراي سنسور فیلم داغ در دمـاي $T_w = 191^\circ C$ نشـان مـي‌دهـد. بـا کـاهش دمـاي جریـان هـوا، خطـاي سـرعت

اندازه‌گيري شده افزايش يافته و مقدار سرعت جريان هوا نيز بيشتر از مقدار واقعـي نشـان داده مـي‌شـود. بـا اصلاح تأثير دما، خطاي سرعت اندازه‌گيري شده كاهش مي‌يابد و در صورت انتخـاب n=۰/۴ در معادلـه (۱۵) اين خطا ناچيز مي‌شود. از اين‌رو مقدار صحيح n در معادله (۱۵) بستگي به نوع افـزايش و يـا كـاهش دمـاي جريان هوا نسبت به دماي مرجع دارد و بهتر است كه از معادله دو ضابطه‌اي زير:

$$\left(\frac{T_w - T_r}{T_w - T_a}\right)^{0.5(1\pm m)} \qquad (۱۶)$$

استفاده شود [۱۴]. هنگامي‌كه دماي جريـان هـوا نسـبت بـه دمـاي مرجـع افـزايش مـي‌يابـد علامـت (+) و هنگامي‌كه دماي جريان هوا نسبت به دماي مرجع كاهش مي‌يابد علامت (-) مورد اسـتفاده قـرار مـي‌گيـرد. بهترين مقدار m در معادله (۱۶) برابر ۰/۲ مي‌باشد كه در اين حالت خطاي ناشي از تغييرات دما ناچيز است.

۳ـ۵ـ بررسي اثر توري بر روي توزيع سرعت و شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا

به‌منظور بررسي اثر توري بر روي توزيع سرعت جريان هوا و شدت اغتشاش‌هاي آن، توزيع سرعت جريان هوا و شدت اغتشاش‌هاي آن در جهت پايين‌دست توري مورد بررسـي قـرار گرفتـه اسـت. در شـكل ۸ تغييـرات سرعت جريان هوا در پايين‌دست توري در دبي‌سنج براي توري‌هاي مختلف و بدون توري نشان داده مى‌شود. جريان هوا در نزديكي توري در حد فاصل كمتر از mm ۵ الي mm ۱۵ ناپايدار بوده و اندازه‌گيري آن بسـتگي شديدي به موقعيت پراب نسبت به سيم‌هاي توري دارد. اين ناپايداري ناشي از جت‌هاي جريان از سوراخ‌هاي توري و يا دنباله سيم توري است. همان‌گونه كه در شكل ۸ نشان داده شده است، تغييرات سرعت بستگي به موقعيت پراب نسبت به توري دارد. براي يك توری‌كه $\beta = 0.51$ است، پراب در ناحيه جـت ناشـي از تـوري قرار گرفته و سرعت آن بيشتر از سرعت بالادست توری مى‌باشد و براي توری‌كه $\beta = 0.43$ مي‌باشد پراب در ناحيه دنباله سيم توري قرار گرفته است از اين‌رو سرعت اندازه‌گيری شـده كمتـر از سـرعت بالادسـت تـوری است. با افزايش فاصله پايين‌دست (x) در حدود ۲۰mm سرعت جريان هوا يكنواخت مى‌شود. بنابراين با توجه به يكنواخت شدن جريان هوا مي‌توان بعد از اين منطقه سنسور فيلم داغ را قـرار داد. لازم بـه ذكـر اسـت بـا توجه به شكل فوق با افزايش پايين‌دست جريان، سرعت جريان كمي افزايش پيدا مي‌كند كه ايـن بـه دليـل افزايش ضخامت لايه مرزي مي‌باشد.

تغييرات شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا در پايين‌دست توري در شكل ۹ نشان داده شده است. شدت اغتشاش‌هاي جريان با توجه به رابطه $T_u = \frac{\sqrt{(\overline{u'})^2}}{U}$، تعريف مى‌شود. (u') اغتشاش‌هاي جريان هوا و U سرعت متوسط جريان است. همان‌طور كه در شكل فوق نشان داده شده است در نزديكي توري شدت اغتشاش‌ها بسيار بالا بوده (بيشتر از $T_u =$ %۱۰) كه چندين برابر شدت اغتشاش‌هاي فاقد توري مي‌باشد. اين امر ناشي از آثار جت و دنباله سيم‌هاي توري مي‌باشد. با افزايش پايين‌دست (هنگامي‌كه از توري فاصله مي‌گيريم) شدت اغتشاش‌هاي جريان سيال كاهش مي‌يابد، به‌طوري‌كه در حد فاصل حدود mm ۴۰ـ۳۰ شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا كمتر از حالتي است كه دبي‌سنج توري ندارد. شيب اين كاهش در نزديكي توري تا فاصله ۴۰mm بسيار شديد بوده و پس از آن به آرامي‌كاهش مي‌يابد به‌طوري‌كه بعد از فاصله

حدود ۷۰mm از توري اين شيب تقريباً نزديک صفر است. اين پديده را مي‌توان به اين صورت بيان نمود که توري سبب شكسته شدن گردابه‌هاي بزرگ به گردابه‌هاي كوچك شده كه قدرت اين گردابه‌هاي كوچك در پايين دست جريان كاهش مي‌يابد. شكل ۱۰ تغييرات شدت اغتشاش‌هاي سرعت جريان هوا را در پايين‌دست توري در نقطه $x=$۱۰۰mm، بر حسب سرعت جريان هوا نشان مي‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، با افزايش سرعت جريان هوا، مقدار شدت اغتشاش‌های سرعت جريان هوا افزايش می‌يابد، اين افزايش برای حالتی‌که توری وجود ندارد به مراتب بالاتر از حالتی است که توری وجود دارد. به عبارت ديگر وجود توری در مسير جريان هوا در دبی‌سنج علاوه بر کاهش شدت اغتشاش‌های جريان باعث کاهش سرعت تغييرات آن نيز می‌شود.

با توجه به بحث‌هايي كه در قسمت تئوري انجام شده و نتايج آن در جدول شماره ۱ براى سرعت ۲۰m/s نشان داده شده است، كاهش شدت اغتشاش‌ها براي توري با ضرايب $\beta = 0.43,0.51$ به ترتيب برابر ۳۰% و ۴۰% مي‌باشد كه نتايج به‌دست آمده از آزمايش با روابط مربوطه همخواني مناسبي دارد.

با توجه به اين‌كه شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا بر اندازه‌گيري سرعت متوسط جريان هوا با استفاده از جريان سنج سيم داغ تاثير مي‌گذارد، بنابراين بايد شدت اغتشاش‌ها را تا حد لازم پايين آورد. اثر شدت اغتشاش‌ها بر اندازه‌گيري سرعت متوسط در شكل ۱۱ نشان داده شده است [۱۷]. هنگامي‌كه شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا حدود ۳۰% است. اندازه‌گيري سرعت متوسط با استفاده از جريان سنج سيم داغ داراي ۵% خطا مي‌باشد. با كاهش شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا، در صد خطاي اندازه‌گيري سرعت متوسط توسط جريان‌سنج سيم داغ كاهش مي‌يابد. هنگامي‌كه شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا به مقدار كمتر از ۳%-۲% مي‌رسد، خطا در اندازه‌گيري سرعت جريان هواي ناشي از شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا قابل اغماض است. از اين‌رو به‌منظور كاهش خطای اندازه‌گيری، در صورتي كه كاهش شدت اغتشاش‌ها توسط يک توری به مقدار كمتر از ۲% نرسد، نياز است كه از دو عدد توري استفاده شود. با در نظر گرفتن منحني‌هاي شكل‌هاي ۸، ۹ و ۱۰ مي‌توان منطقه قرارگيري سنسور را در فاصله ۳۰ mm الی ۵۰ mm پايين دست توری مشخص نمود كه در منطقه فوق جريان هوا ناپايدار نبوده و شدت اغتشاش‌هاي آن نيز مناسب است. همچنين در اين ناحيه فركانس اغتشاش‌هاي اندازه‌گيري شده، كمتر از ۱۰۰Hz بوده، بنابراين اندازه‌گيري سرعت لحظه‌اي با استفاده از سنسور فيلم داغ مشكل نبوده و مي‌توان با استفاده از درگاه سريال، داده‌هاي اندازه‌گيري شده را نيز به رايانه ارسال نمود.

٤-٥- اثر توري بر روي لايه مرزي

همان‌گونه كه بيان شد سنسور فيلم داغ قادر به اندازه‌گيري سرعت محلي مي‌باشد. به‌منظور اندازه‌گيري دبي جريان هوا بهتر است كه توزيع سرعت جريان هوا در مقطعي كه سنسور فيلم داغ قرار دارد داراي يكنواختي مناسبي بوده و حتي‌المقدور ضخامت لايه مرزي كوچک باشد. با استفاده از توري مي‌توان ضخامت لايه مرزي را كاهش داد. شكل ۱۲ اثر توريهاي مختلف با ضرايب $\beta = 0.43, 0.51$ بر روي توزيع جريان هوا را در سرعت $U=$۲۰m/s نشان مي‌دهد.

همان‌طور كه در شكل فوق نشان داده شده با قرار دادن توري ضخامت لايه مرزي كاهش يافته كه اين كاهش با كاهش β افزايش مي‌يابد. لازم به ذكر است كه اندازه‌گيري ضخامت لايه مرزي با استفاده از دستگاه جريان سنج سيم داغ مشكل مي‌باشد، بنابراين به‌منظور مشخص نمودن كاهش ضخامت لايه مرزي توسط توري، ضخامت جابه‌جايي لايه مرزي طبق معادله زير تعريف می‌شود:

$$\delta^* = \frac{1}{U}\int_{-D/2}^{D/2}(U-u)dy \qquad (۱۷)$$

در معادله فوق U سرعت متوسط در مركز دبي‌سنج و u سرعت محلي مي‌باشد.

شكل ۱۳ تغييرات ضخامت جابه‌جايي لايه مرزي را براي حالت‌هايي كه توري با مش‌هاي مختلف در دبي‌سنج قرار دارد نشان مي‌دهد. همچنين در شكل فوق تغييرات ضخامت جابه‌جايي لايه مرزي نسبت به سرعت‌هاي مختلف نشان داده شده است. با افزايش سرعت جريان هوا، ضخامت لايه مرزي كاهش مي‌يابد. با توجه به شكل فوق مي‌توان دريافت كه اثر توري بر روي كاهش ضخامت جابه‌جايي لايه مرزی بسيار موثر بوده و با افزايش نسبت β ضخامت جابه‌جايي لايه مرزي و تغييرات آن با سرعت كاهش مي‌يابد، به‌طوري‌كه تغييرات ضخامت جابه‌جايي براي توري در بازه سرعت ۱۰ *m/s* الي ۳۰ *m/s* قابل اغماض مي‌باشد، بنابراين استفاده از توري با $\beta = 0.43$ در بالادست سنسور مناسب است. شكل ۱۴ تأثير توری برروی توزيع شدت اغتشاش‌های جريان هوا را در فاصله $x=$ ۵۰*mm* پايين دست توری نشان می‌دهد. همان‌گونه كه در شكل فوق نشان داده شده است شدت اغتشاش‌ها در نزديكي ديواره داخل لايه مرزی بالا بوده و با خارج شدن از لايه مرزی شدت اغتشاش‌ها كاهش می‌يابد. در داخل لايه مرزی اثر توری بر روی شدت اغتشاش‌ها محسوس نبوده ولی در مركز لوله، توری سبب كاهش شديد اغتشاش‌های جريان می‌شود.

۵ـ۵ـ كاليبراسيون دبي‌سنج فيلم داغ

پس از بررسي منحني‌هاي مشخصه‌هاي سنسورهاي سيم و فيلم داغ و تأثير توري بر روي كاهش غير يكنواختي جريان هوا و ضخامت جابه‌جايي لايه مرزي، دبي‌سنج از نوع فيلم داغ ساخته شد. طول اين دبی‌سنج حدود ۳۰۰ *mm* و قطر آن حدود ۱۰۰ *mm* می‌باشد. به‌منظور كاهش شدت اغتشاش‌های جريان هوا و يكنواخت نمودن جريان هوا، توری با نسبت سطح باز به سطح بسته $\beta = 0.51$ در ورودی دبی‌سنج قرار گرفته، سپس پايين دست آن لانه زنبوری را نصب نموده، در فاصله ۱۰۰ *mm* پايين دست لانه زنبوری توری دوم را با نسبت $\beta = 0.43$ قرار داده و پايين دست آن به فاصله ۴۰ *mm* سنسور فيلم داغ نصب می‌شود. به‌منظور به‌دست آوردن بازه مناسب ولتاژ خروجي دبي‌سنج، به ولتاژ خروجي مدار *CTA* آفست ۲ ولتي اعمال مي‌شود. سپس دبي سنج فوق را با استفاده از بستر آزمايش مطابق شكل ۳ به‌همراه دبي‌سنج استاندارد *Sensy Flow* به‌طور سري قرار داده و دبی‌سنج ساخته شده فوق را كاليبره نموده، كه منحني كاليبراسيون در شكل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌طور كه در شكل فوق نشان داده شده است، تغييرات ولتاژ خروجي دستگاه دبي‌سنج براي دبي‌هاي كم بالا بوده، از اين‌رو اين نوع دبي‌سنج براي اندازه‌گيري دبي‌هاي كم مناسب مي‌باشد. همچنين تغييرات ولتاژ خروجي براي دبي‌هاي بالا كم بوده و با استفاده از اين نوع دبي‌سنج مي‌توان

بازه وسيعي از دبي جرمي را اندازه‌گيري نمود. دبي‌سنج فوق در حال حاضر به‌عنوان يكي از سلول‌هاي اندازه‌گيري در يكي از شركت‌هاي موتورسازي در حال بهره‌برداري مي‌باشد.

به‌منظور يكنواخت نمودن جريان هوا و كاهش شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا از توری در دبی‌سنج استفاده می‌شود. شدت اغتشاش‌هاي پايين‌دست توري در فاصله كمتر از ۳۰*mm* نه تنها كاهش نمي‌يابد، بلكه بر اثر وجود دنباله و جت ناشي از توري افزايش مي‌يابد. با افزايش فاصله از پايين‌دست توري شدت اغتشاش‌ها كاهش يافته كه با روابط ارايه شده توسط محققان ديگر همخواني مناسبي دارد [۶]. كاهش شدت اغتشاش‌هاي جريان با استفاده از توري با افزايش سرعت، افزايش مي‌يابد. با استفاده از توري مي‌توان ضخامت جابه‌جايي لايه مرزي را به شدت كاهش داد. اين كاهش در فاصله ۵ *cm* از توري كمتر از نصف خواهد بود. براي كاهش غيريكنواختي سرعت جريان سيال و شدت اغتشاش‌هاي آن در دبي‌سنج ها مي‌توان از توري استفاده نمود. محل مناسب قرارگيري سنسور ۳۰ *mm* تا ۵۰ *mm* پايين‌دست توري است. در دبي‌سنج سيم داغ نياز است كه شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا كمتر از ۲% باشد. بنابراين با استفاده از ۱ يا ۲ عدد توري مناسب بايد شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا را به كمتر از ۲% رسانيد.

٦ـ نتیجه‌گیری

سنجش دبی جریان هوا با استفاده از سیم و یا فیلم داغ از روش‌های دقیق بوده که با استفاده از آن می‌توان بازه وسیعی از دبی جرمی را با دقت بالا اندازه‌گیری نمود که با دیگر دبی‌سنج‌ها این امر به‌سادگی میسر نمی‌باشد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده و بررسی نتایج می‌توان موارد زیر را بیان نمود.

• با توجه به منحنی کالیبراسیون سنسورهای سیم و فیلم داغ می‌توان تشخیص داد که استفاده از سنسور فیلم داغ به مراتب بهتر از استفاده از سنسور سیم داغ در دستگاه دبی‌سنج می‌باشد. تغييرات ولتاژ خروجي سنسور فيلم داغ در مدار CTA بالاتر بوده و نيازي به مدارهاي تطبيق دهنده سيگنال وجود ندارد، همچنين به‌علت دارا بودن سطح جانبي بالاتر سنسور فيلم داغ نسبت به سنسور سيم داغ، تأثير ذرات و آلودگی‌های جریان هوا بر روی سنسور فیلم داغ به مراتب کمتر از سنسور سیم داغ می‌باشد.

• با توجه به این‌که اصول عملکرد دبی‌سنجی با استفاده از روش فیلم داغ بر مبنای انتقال حرارت می‌باشد، از این‌رو نیاز است که تأثیر تغییرات دمای جریان هوا، بر اندازه‌گیری دبی جریان هوا مشخص و اصلاح شود. با استفاده از معادله دو ضابطه‌ای (۱۶) و انتخاب مقدار *m=* ۰/۲ میزان خطای ناشی از تغییر دمای جریان هوا را مي‌توان به كمتر از ۰/۱٪ به‌ازای هر درجه سانتيگراد رسانيد.

• استفاده از توري دبي‌سنج سبب يكنواخت شدن جريان هوا و كاهش شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا مي‌شود. اين كاهش بستگي به نسبت سطح باز به سطح كل توري دارد، به‌طوري‌كه با كاهش اين نسبت جريان يكنواخت‌تر و شدت اغتشاش‌هاي آن نيز كاهش مي‌يابد. اما در فاصله كمتر از ۱۵ *mm* توري، نه تنها جريان يكنواخت نشده بلكه با توجه به وجود دنباله و جت‌هاي ناشي از توري، شدت اغتشاش‌ها بسيار بالا مي‌باشد، بنابراين مكان مناسب براي نصب سنسور فيلم داغ در دستگاه دبي‌سنج در فاصله ۳۰ *mm* پايين‌دست توري پيشنهاد مي‌شود كه در اين مكان شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا توسط توري كاهش يافته است.

• استفاده از توري در دبي‌سنج سبب يكنواخت شدن جريان و كاهش ضخامت جابه‌جايي لايه مرزي مي‌شود. با كاهش مقدار نسبت سطح باز به سطح كل توري، ضخامت لايه مرزي در داخل دبي‌سنج كاهش مي‌يابد، همچنين تغييرات ضخامت جابه‌جايي لايه مرزي نسبت به سرعت نيز كاهش مي‌يابد. استفاده از توري با نسبت $\beta = 0.41$ سبب كاهش ضخامت جابه‌جايي از ۱۰/۵% به ۱% در سرعت ۱۰ m/s و همچنين كاهش ضخامت جابه‌جايي از ۶/۵% به ۰/۶% در سرعت ۳۰ m/s مي‌شود، از اين‌رو استفاده از توري فوق در بالادست سنسور مناسب مي‌باشد.

• در دبي‌سنج فيلم داغ به‌منظور اندازه‌گيري صحيح سرعت و دبي جريان، شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا بايد در محل نصب سنسور فيلم داغ، كمتر از ۲% باشد كه اين امر با استفاده از توري با نسبت $\beta = 0.53$ در ورودي دبي‌سنج و همچنين توري با نسبت $\beta = 0.41$ در بالادست سنسور ميسر شده است.

مراجع

[1] Miller, R. W., "*Flow Measurment Engineering Hand Book*", McGraw-Hill (1996).

[2] اردکانی. م. ع، " جریان‌سنج سیم داغ"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیر (۱۳۸۵).

[3] Weiss, J., Knauss, H., and Wagner, S., "Method for the Determination of Frequency Response and Signal to Noise Ratio for Constant-Temperature Hot-wire Anemometers", Review of Scientific Instruments., Vol. 72, Number 3, pp. 1904-1909 (2001).

[4] اردکانی. م. ع، روکی. ا و شاه حسینی. ا، "بررسی پاسخ فرکانسی جریان‌سنج سیم داغ برای سنسورهای سیم و فیلم داغ در جریان هوا"، چهاردهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۸۵).

[5] Wieghardt, K. E. G., "On the Resistance of Screens", Aeron. Quart. Vol. 4. pp. 186-192, (1953).

[6] Dryden, H. L., and Schubauer, G. B., "The Use of Damping Screen for the Reduction of Wind Tunnel Turbulence", J. Aero. Sci, Vol. 14, pp. 221-228, (1947).

[7] سالاری. م، اردکانی. م. ع و تقوی زنوز. ر، "بررسی تأثیر دما بر روی عملکرد بادسنج سیم داغ"، نشریه مکانیک و هوا فضا دانشگاه امام حسین (ع)، جلد ۲، شماره ۳، اسفند ۱۳۸۵، ص ۵۹-۵۷ .

[8] Sherif, S. A., "On the Propagation of Random Errors of Constant-Temparature Anemometers in Nonisothermal Flows", Fluid Measurment, Vol. 22, pp. 75-86, (1997).

[9] Takagi. S., "A Hot-wire Anempmeter Compensated for Ambient Temperature Variatinns", J. Phys. E: Sci. Instr. Vol. 19, pp. 739-743, (1986).

[10] Kramers, H., "Heat Transfer from Spheres to Flowing Media", Physica Vol. 12, pp. 61-80, (1946).

[11] Bradshaw, P., "*An Introduction to Turbulence and its Measurement. Pergamon Press*", Oxford, (1971).

[12] Collis, D. C., and Williams, M. J., Two-dimensional Convection from Heated Wires at Low Reynolds Numbers. J. Fluid Mech., Vol. 6, pp. 357-384, (1959).

[۱۳] اردکانی. م. ع، " گزارش طرح نیمه صنعتی سنجش جریان هوا با استفاده از فیلم داغ"، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران (۱۳۸۵).

[۱۴] اردکانی. م. ع، " گزارش طرح نیمه صنعتی بادسنج سیم داغ"، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران (۱۳۸۴).

[15] Improved Temperature Correction in StreamWare. DANTEC DYNAMICS, Technical Note of Dynamics, Publication No. TNO49909, P2, (2002).

[16] Kanevce, G., and Oka, S., "Correcting Hot-wire Reading for Influence of Fluid Temperature Variations", DISA Info, No. 15, pp. 21-24, (1973).

[17] Swaminathan, M. K., Rankin, G. W., and Sridhar, K., "A Note on the Response Equations for Hot-wire Anemometry", ASME, J. Fludis Eng., Vol. 108, pp. 115-118, (1986).

فهرست نمادهاي انگليسی

A_s : سطح جانبي سنسور

Cp : گرمای ويژه در فشار ثابت هوا

d : قطر سيم توری، قطر سنسور

e : نوسان‌های ولتاژ خروجی

$E(t)$: ولتاژ خروجی به‌صورت لحظه‌ای

$\overline{E}$: مقدار متوسط ولتاژ خروجی

f : نسبت شدت اغتشاش‌های قبل به بعد توری

h : ضريب انتقال حرارت جابه‌جايی

K : ضريب افت فشار در توری

k : ضريب هدايت گرمايی هوا

l : فاصله بين مرکزهای دو سيم

$Mesh$: تعداد سوراخ‌های توری در طول يک اينچ

$Nu=hd/k$: عدد نوسلت

$Pr=\mu Cp/k$: عدد پرانتل

R_w : مقاومت سنسور در دمای T_w

R_a : مقاومت سنسور در دمای محيط

$Re=Ud/\mu\,\rho$: عدد رينولدز

T_w : دماي سنسور

T_a : دماي محيط

$U(t)$: سرعت لحظه‌ای جريان هوا

فهرست نمادهاي يونانی

α : ضريب حرارتی سنسور

β : نسبت سطح باز توری به سطح کامل

ρ : چگالی هوا

μ : لزجت ديناميکی

Δp : افت فشار

جدولها

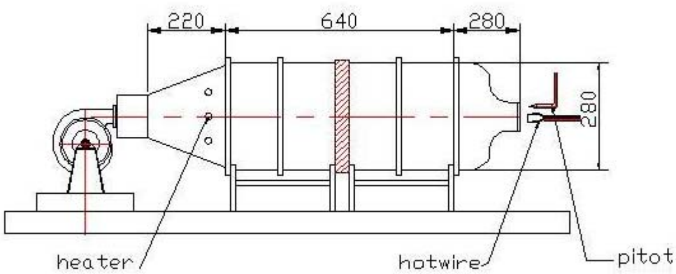
جدول ۱ـ مشخصات سنسورها

دماي متوسط سنسور T_w (°C)	نسبت فراگرمايي oh	ضريب دمايي مقاومت α_{20} (1/°C)	مقاومت R (Ω)	جنس	نوع سنسور
۱۴۰ ۱۹۸	۰/۴ ۰/۶	۰/۰۰۳۴۷۶	۵/۵	نیکل	فیلم داغ
۱۳۶ ۱۹۱	۰/۴ ۰/۶	۰/۰۰۳۶	۳/۵	تنگستن	سیم داغ

جدول ۲ـ مشخصه‌های توري‌هاي مورد استفاده در دبی‌سنج

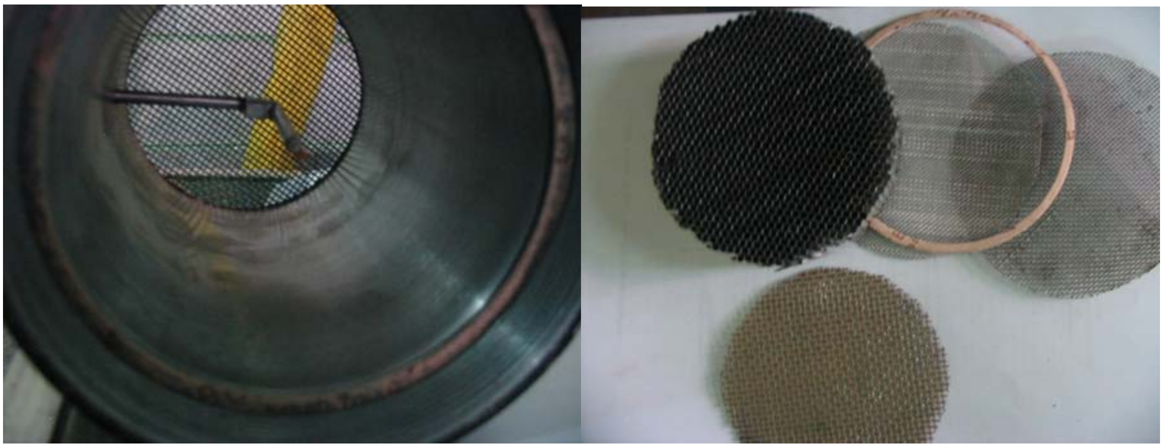
U(m/s)	f	K	B	d(mm)	l(mm)	Mesh(1/mm)
10	0.560815	2.179516	0.435392	0.36	1.058333	24
10	0.659874	1.296564	0.513423	0.48	1.693333	15
20	0.60524	1.729883	0.435392	0.36	1.058333	24
20	0.702021	1.029083	0.513423	0.48	1.693333	15
30	0.631045	1.511192	0.435392	0.36	1.058333	24
30	0.72567	0.898987	0.513423	0.48	1.693333	15

شکلها

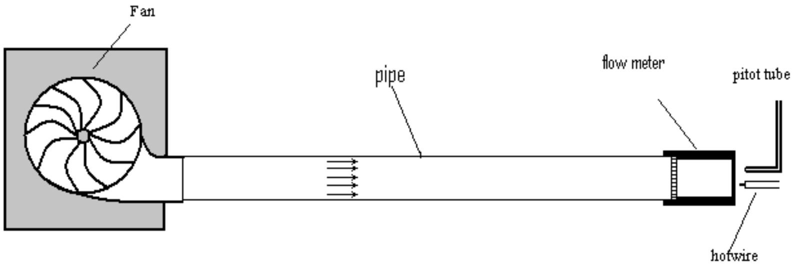


شکل ۱ـ شماتیک تونل باد کوچک و محل قرارگیری پیتوت و پراب دستگاه جریان‌سنج سیم داغ

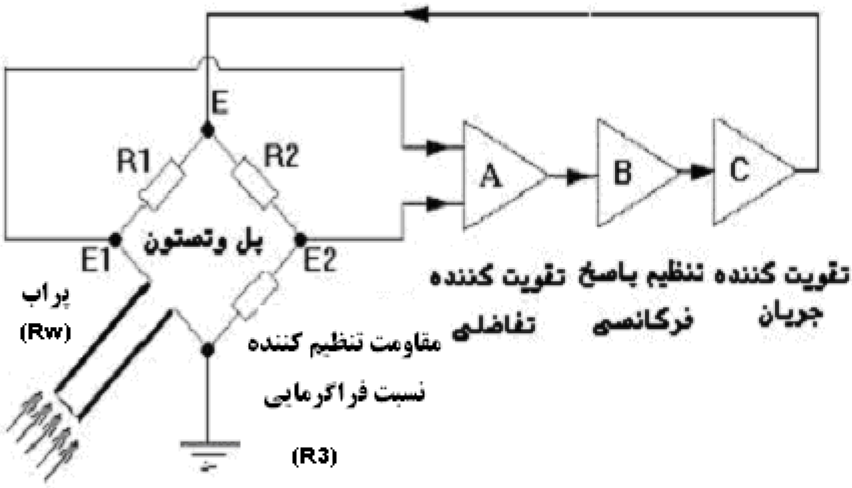
الف ب



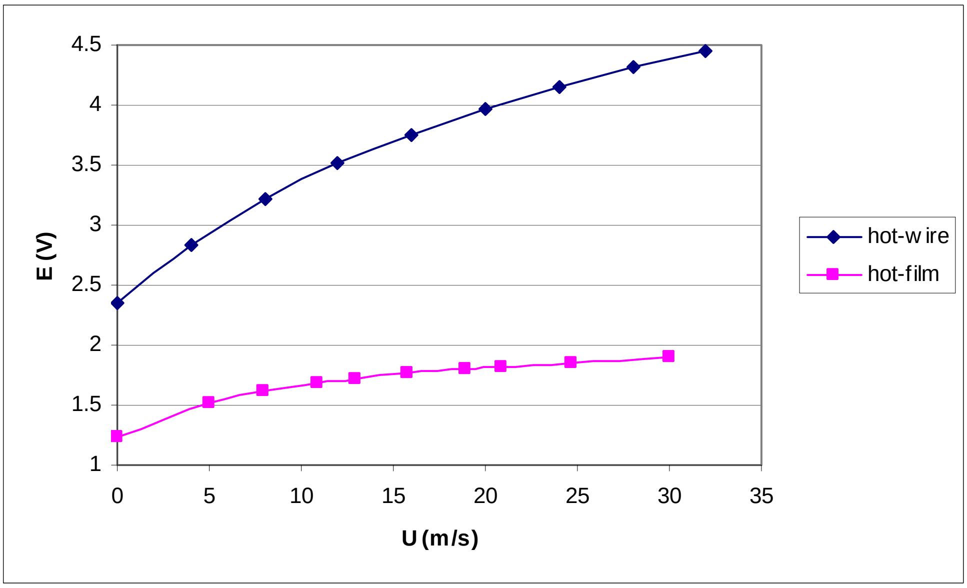
شکل ۲ـ الف ـ توري‌ها با مش‌های مختلف به‌کاررفته در آزمايش ب ـ لوله دبی‌سنج



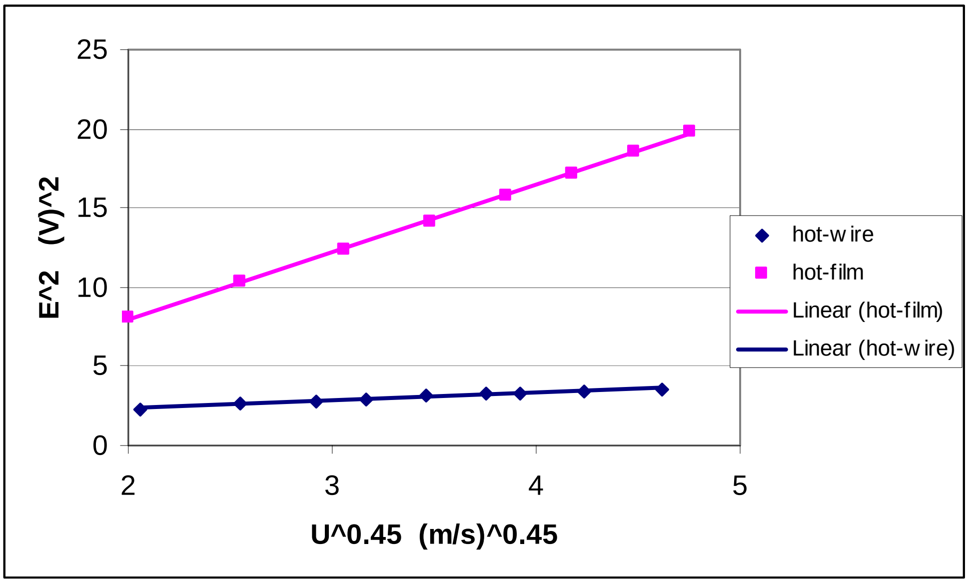
شکل ۳ـ بستر آزمايش دبي‌سنج



شکل ۴ـ مدار الکترونيکي دماثابت *CTA* به‌کار گرفته در دبی‌سنج



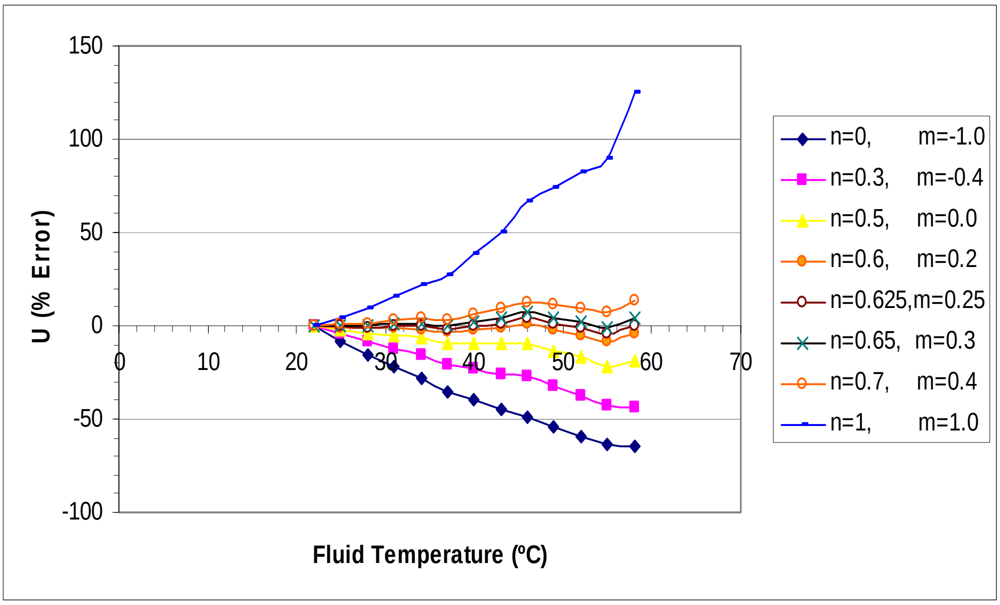
الف



ب

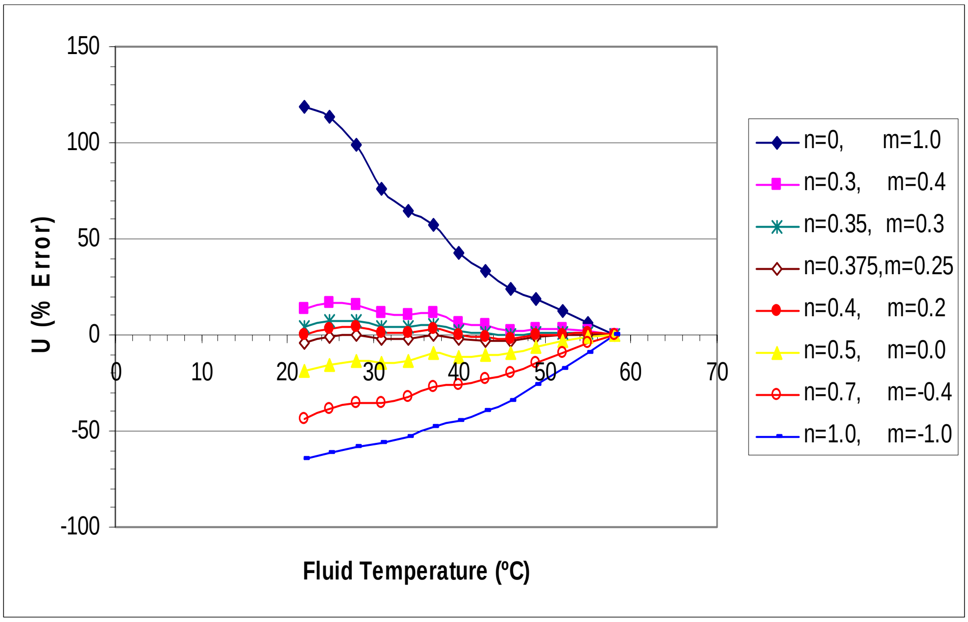
شکل ۵ـ منحنی‌های کالیبراسیون سنسورهای سیم و فیلم داغ در نسبت فراگرمایی

$$\left(\frac{R_w - R_a}{R_a}\right) = 0.6$$



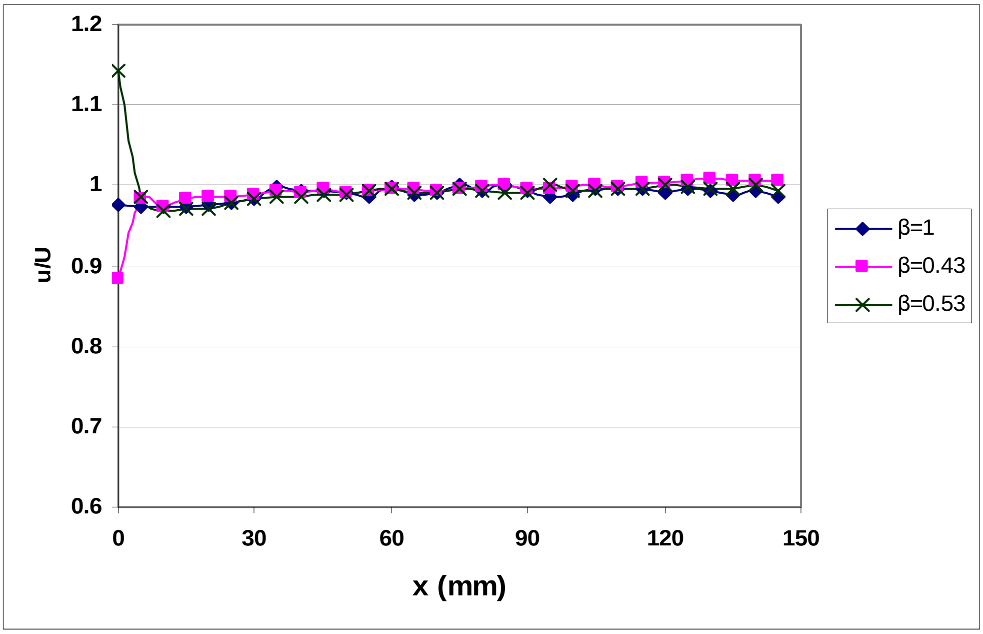
شكل ۶ـ تأثير افزايش دماى جريان هوا بر خطاى اندازه‌گيرى سرعت و نحوه اصلاح آن

$(T_r=۲۲^\circ C\ ,\ T_w=۱۹۱^\circ C)$

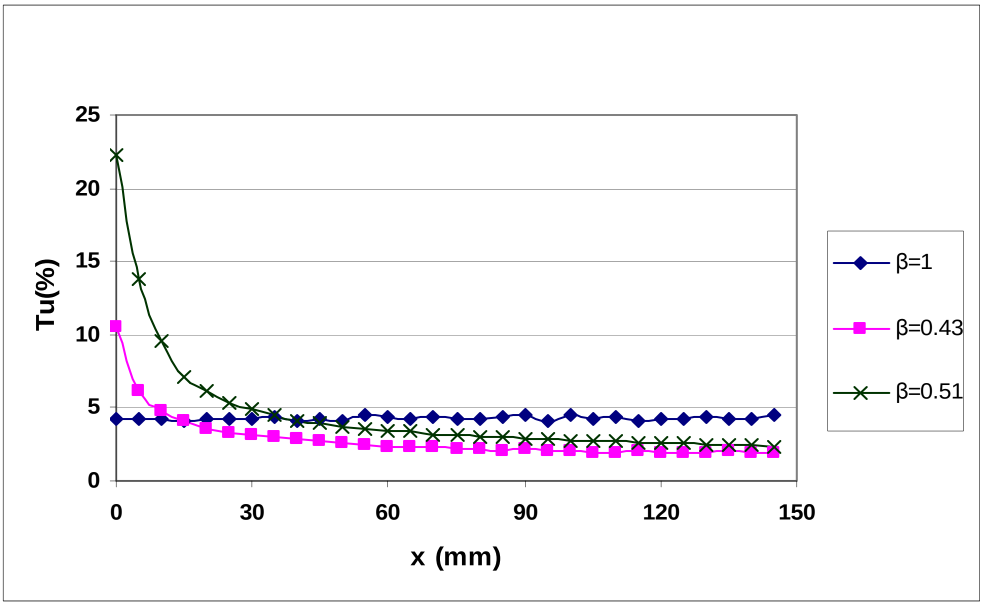


شكل ۷ـ تأثير كاهش دماى جريان هوا بر خطاى اندازه‌گيرى سرعت و نحوه اصلاح آن

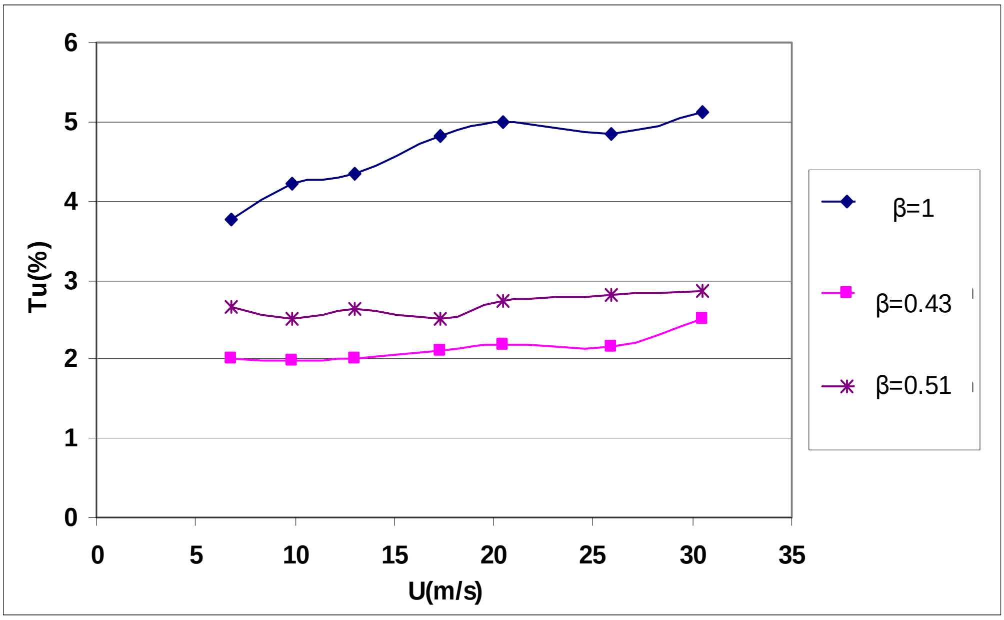
$(T_r=۵۸^\circ C\ ,\ T_w=۱۹۱^\circ C)$



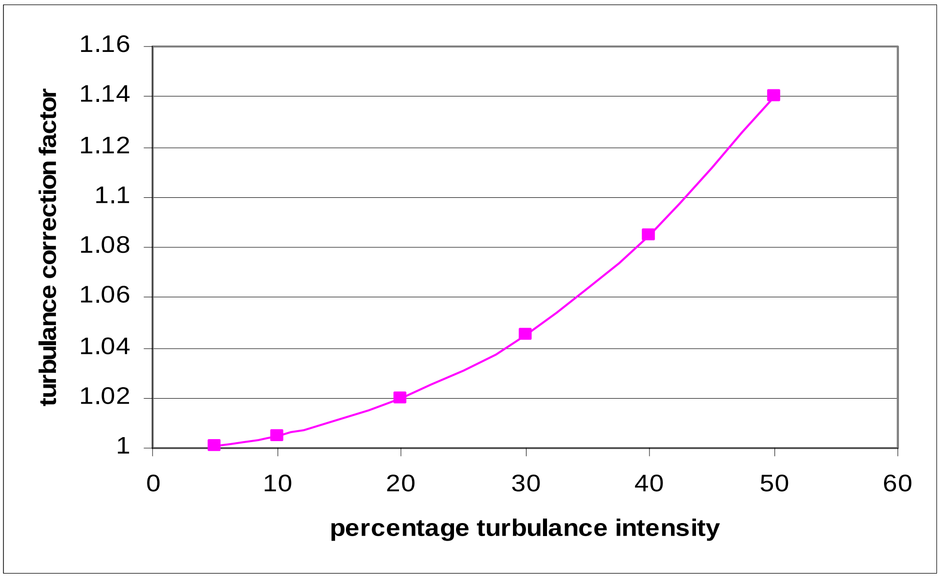
شکل ۸ـ تغییرات سرعت جریان هوا در پایین‌دست توري در دبي‌سنج *(U= ۲۰m/s)*



شکل ۹ـ تغییرات شدت اغتشاش‌هاي جریان هوا در پایین‌دست توري *(U= ۲۰m/s)*

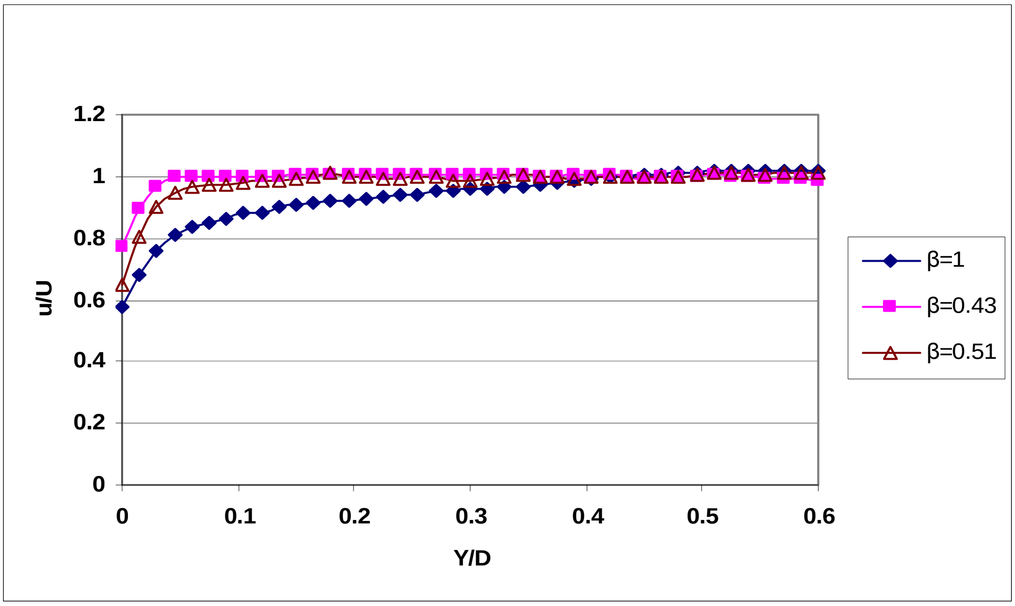


شكل ۱۰ـ تغييرات شدت اغتشاش‌هاي سرعت جريان در پايين‌دست توري
برحسب سرعت جريان هوا *(x= ۷۰ mm)*



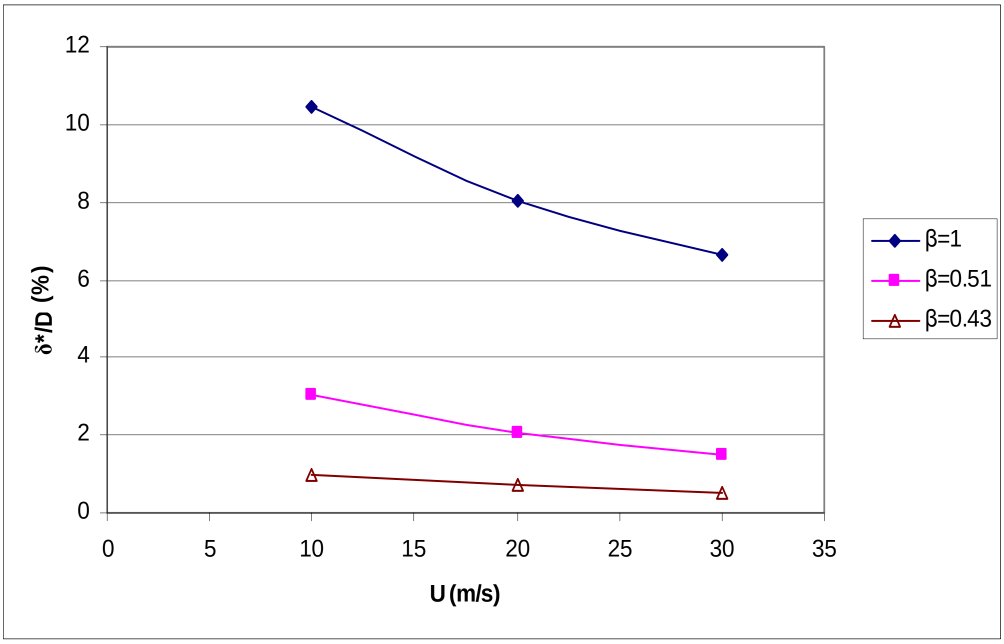
شكل ۱۱ـ اثر شدت اغتشاش‌هاي جريان هوا بر اندازه‌گيري سرعت متوسط

توسط سنسور سیم داغ [۱۷]

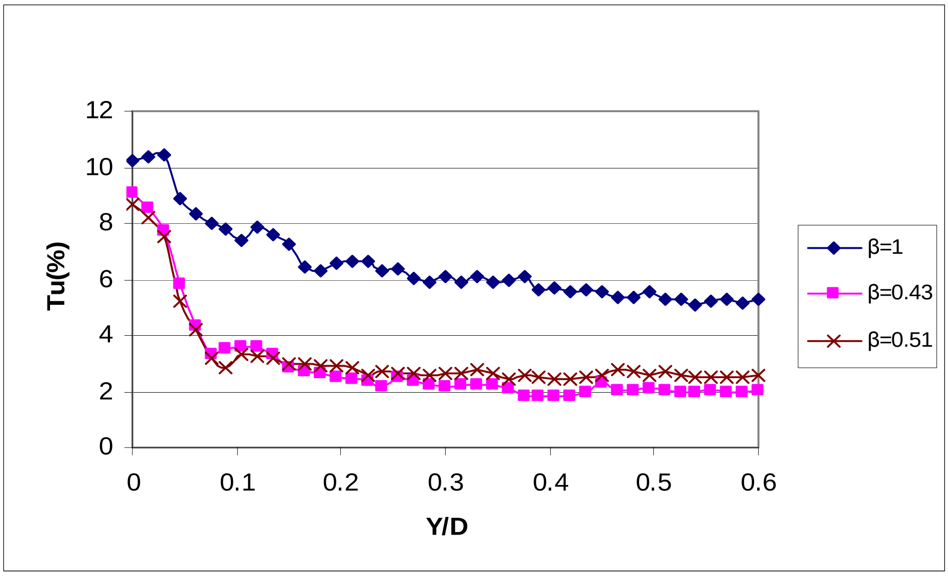


شکل ۱۲ـ تأثیرتوري برروي توزيع سرعت جريان هوا و كاهش ضخامت لايه مرزي

(U= ۲۰ m/s , x= ۳۰mm)

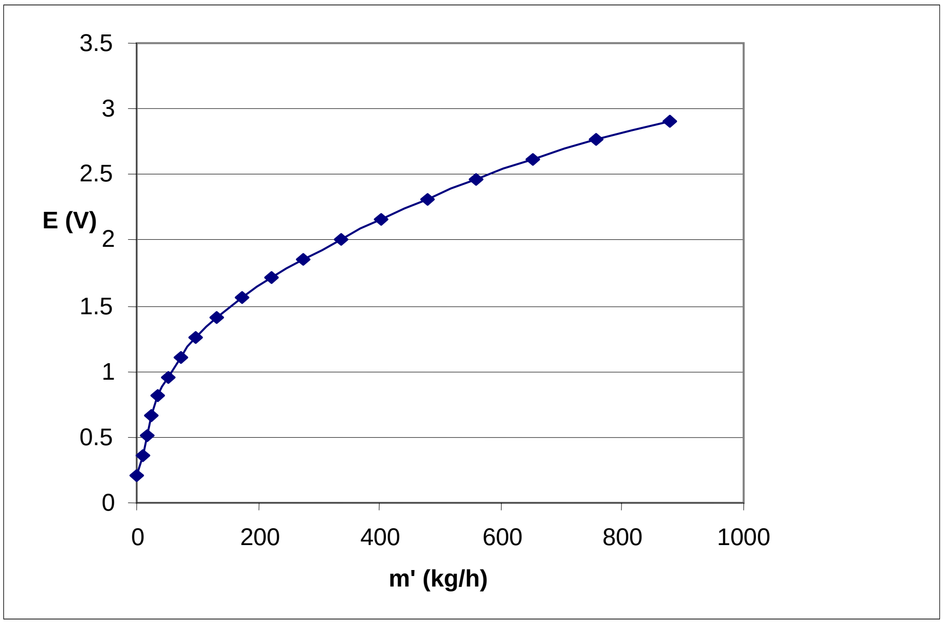


شکل ۱۳ـ تأثیرتوري برروي ضخامت جابه‌جایی لایه مرزی در سرعت‌های مختلف *(x=۳۰ mm)*



شکل ۱۴ـ تأثيرتوري برروي توزيع شدت اغتشاش‌های جريان هوا در عرض لوله دبي‌سنج

(x=۷۰ mm)



شکل ۱۵ـ منحني کاليبراسيون دبي‌سنج از نوع فيلم داغ

Abstract

Optimization of fluid systems requires flowmetry. Various flow measurement methods are used such as differential (pressure difference), linear (ultrasonic, vortex shedding) and non-linear (hot-wire/or hot-film). Each method has its own merits and demerits. The advantages of hot-wire or hot-film anemometry are high accuracy, ability to measure low flow rates, wide measurement range, and low pressure drop. This type of flow meter consists of a sensor, electronic circuits, software and various mechanical parts such as tube, screen and honeycomb for obtaining a uniform air flow. In this paper the calibration curves for hot-wire and hot-film sensors have been compared, and suitable sensors for flow meter applications have been selected. The effect of type of screen on the uniform air flow and reduction of air turbulence has been discussed, and suitable sensor position has been determined. The effects of temperature on the sensor calibration and the required factor for the correction of the temperature effects have been presented. Calibration of the flow meter has been given for completion of the paper.