اثر دوپلر

پارسا رنگریز

آزمایشگاه فیزیک ۳، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

۱ مقدمه

کریستیان دوپلر فیزیکدان و ریاضیدان اتریشی در سال ۱۸۴۲ میلادی نشان داد که رنگ یک جسم نورانی به حرکت نسبی جسم و ناظر بستگی دارد. این اثر که اثر دولپر نامیده می‌شود در مورد تمام امواج مشاهده می‌شود. دوپلر به برقراری این اثر درباره امواج صوتی نیز اشاره کرده است. وقتی یک چشمه صوت (مانند سوت قطار) نسبت به محیط انتشار حرکت می‌کند، اگر به شنونده نزدیک شود صدا زیرتر (بسامد بیش‌تر) و اگر شنونده دور شود صدا بم‌تر (بسامد کمتر) خواهد بود. همچنین اگر شنونده در محیطی که صوت منتشر می‌شود به چشمه صوت نزدیک شود، بسامد صوت بیش‌تر و اگر از چشمه دور شود بسامد صوت کم‌تر خواهد بود. بنابراین بسامد صوتی که شنونده دریافت می‌کند بستگی به حرکت نسبی چشمه صوت و شنونده در محیط انتشار صوت دارد.

۲ مدل و نظریه

فرض کنیم که چشمه صوت و آشکارساز (ناظر) نسبت به محیطی که صوت در آن منتشر می‌شود ساکن باشند. بسامدی که آشکارساز دریافت می‌کند برابر است با $\nu = \frac{u}{\lambda}$ که u سرعت انتشار صوت در محیط و λ طول موج آن است. اگر چشمه صوت با سرعت $u_s < u$ (نسبت به محیط انتشار) به طرف آشکارساز حرکت کند، به ازای هر نوسان چشمه مسافت $\frac{u_s}{\nu}$ را طی می‌کند و طول موجی که آشکارساز دریافت می‌کند برابر است با:

$$\lambda' = \lambda - \frac{u_s}{\nu} = \frac{u - u_s}{\nu} \tag{۱}$$

بسامد موجی که آشکارساز دریافت می‌کند برابر است با

$$\nu' = \frac{u}{\lambda'} = \frac{\nu}{1 - \frac{u_s}{u}} \tag{۲}$$

یعنی بسامدی که آشکارساز دریافت می‌کند از بسامد ν بزرگتر است. اگر چشمه صوت با سرعت u_s از آشکارساز دور شود، طول موجی که آشکارساز دریافت می‌کند برابر است با

$$\lambda'' = \lambda + \frac{u_s}{\lambda} = \frac{u + u_s}{\nu} \tag{۳}$$

شکل ۱: دوپلر

بسامد موجی که آشکارساز دریافت می‌کند برابر است با

$$\nu'' = \frac{u}{\lambda'} = \frac{\nu}{1 + \frac{u_s}{u}} \tag{۴}$$

یعنی بسامدی که آشکارساز دریافت می‌کند از بسامد ν کوچکتر است.
اگر آشکارساز با سرعت u $u_0 < u$ به طرف چشمه حرکت کند، در یک ثانیه تعداد نوسان‌های بیش‌تری را دریافت می‌کند یعنی بسامدی که آشکارساز دریافت می‌کند برابر است با

$$\nu' = \nu + \frac{u_0}{\lambda} = \nu(1 + \frac{u_0}{u}) \tag{۵}$$

بنابراین بسامدی که آشکارساز دریافت می‌کند از بسامد ν بزرگتر است.
اگر آشکارساز با سرعت u_0 از چشمه صوت دور شود بسامدی که آشکارساز دریافت می‌کند برابر است با

$$\nu'' = \nu - \frac{u_0}{\lambda} = \nu(1 - \frac{u_0}{u}) \tag{۶}$$

در حد $u \ll u_s$، می‌توان نشان داد که معادله ۲ به معادله ۵ و معادله ۴ به معادله ۶ تبدیل می‌شود یعنی بین حالتی که چشمه صوت متحرک است با حالتی که آشکارساز متحرک است تفاوتی وجود ندارد.

۳ وسایل آزمایش

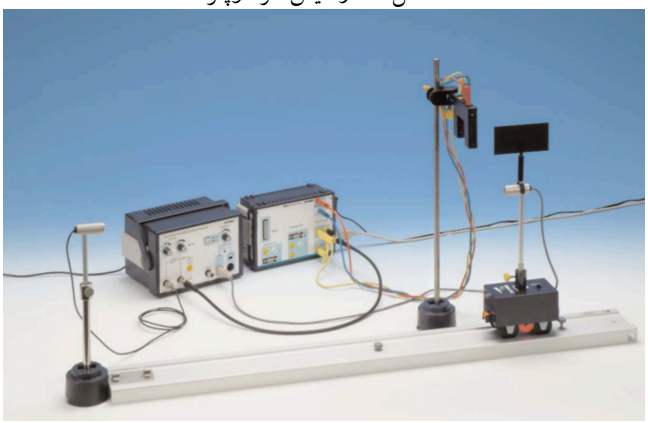
دستگاه Ultrasonic فرستنده امواج ،Ultrasonic آشکارساز امواج ،Ultrasonic دستگاه ،Cobra۳ سد نوری، ریل به طول ۹۰ سانتی‌متر، ماشین برای حرکت روی ریل، صفحه به طول ۱۰ سانتی‌متر برای نصب کردن روی ماشین، پایه استوانه‌ای شکل (۲ عدد)، میله به طول ۱۶ سانتی‌متر، میله به طول ۶۰ سانتی‌متر، گیره برای قرار دادن سد نوری روی میله، کابل ،BNC تطبیق‌دهنده ،BNC سیم رابط (۵ عدد)

۴ روش آزمایش

۱.۴ اندازه‌گیری سرعت حرکت ماشین روی ریل

مطابق شکل‌های ۲ و ۳ مدار آزمایش را می‌بندیم. برای اندازه‌گیری سرعت حرکت ماشین روی ریل از سدنوری استفاده می‌کنیم که مطابق شکل ۳ به دستگاه Cobra۳ وصل می‌شود. فرستنده و آشکارساز امواج Ultrasonic به دستگاه Ultrasonic وصل می‌شوند و برای ثبت بسامدی که آشکارساز دریافت می‌کند این دستگاه به دستگاه Cobra۳ وصل می‌شود. کابل USB دستگاه Cobra۳ را به کامپیوتر متصل

شکل ۲: آزمایش اثر دوپلر



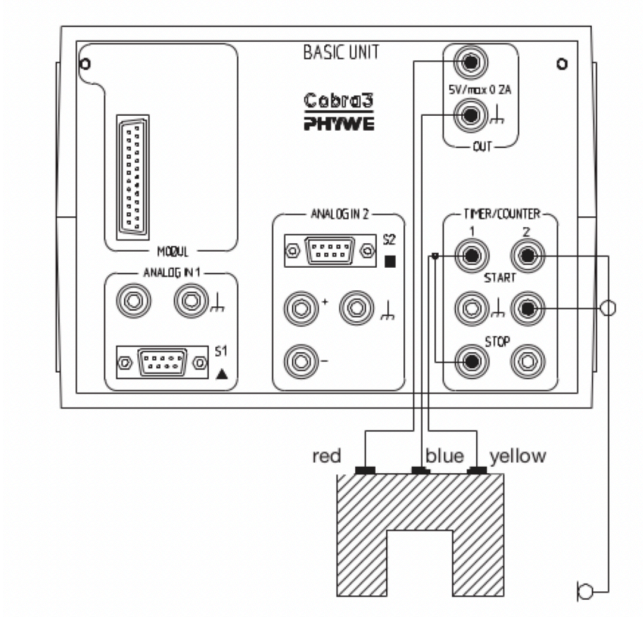
کرده و برنامه Measure را اجرا کنید. از نوار بالا روی Gauge کلیک کرده و گزینه Time/Counter را انتخاب می‌کنیم. صفحه‌ای مانند شکل ۴ باز خواهد شد. از نور بالا روی Timer کلیک می‌کنیم، پارامترهای این صفحه را درست مانند شکل ۴ تنظیم می‌کنیم.

روی Continue کلیک کرده و سرعت حرکت ماشین را ثبت می‌کنیم. سرعت ماشین را چندین بار در دو جهت مختلف اندازه‌گیری کرده و اطمینان حاصل می‌کنیم که تقریبا یکسان است.

۲.۴ بررسی اثر دوپلر برای امواج Ultrasonic

در شکل ۴ از نوار بالا روی Counter کلیک می‌کنیم، پارامترهای این صفحه را درست مانند شکل ۵ تنظیم می‌کنیم.

شکل ۳: نحوه اتصال سیم‌های سد نوری و دستگاه‌ها



با استفاده از تنظیم‌کننده‌های دستگاه Ultrasonic دامنه فرستنده و تقویت‌کننده آشکارساز را روی مقدار متوسط تنظیم می‌کنیم. اطمینان حاصل می‌کنیم در وضعی که آشکارساز بیش‌ترین فاصله را از فرستنده دارد امواج دریافت شده به اندازه کافی تقویت شده باشند. با کلیک کردن روی space اندازه‌گیری شروع می‌شود. در سه حالت، حالتی که فرستنده به آشکارساز نزدیک می‌شود، حالتی که فرستنده و آشکارساز ساکن هستند را اندازه‌گیری می‌کنیم (شکل ۶) با فرض اینکه سرعت انتشار امواج ۳۴۰ متر بر ثانیه است، نتایج بدست آمده از نمودار را با نظریه مقایسه می‌کنیم.

با تغییر سرعت چشمه صوت آزمایش را تکرار می‌کنیم و جدول ۱ را کامل می‌کنیم. با استفاده از روش کمترین مربعات منحنی نمایش تغییرات ν' را بر حسب u_s رسم می‌کنیم و به وسیله شیب خط سرعت انتشار امواج در محیط را تعیین می‌کنیم.

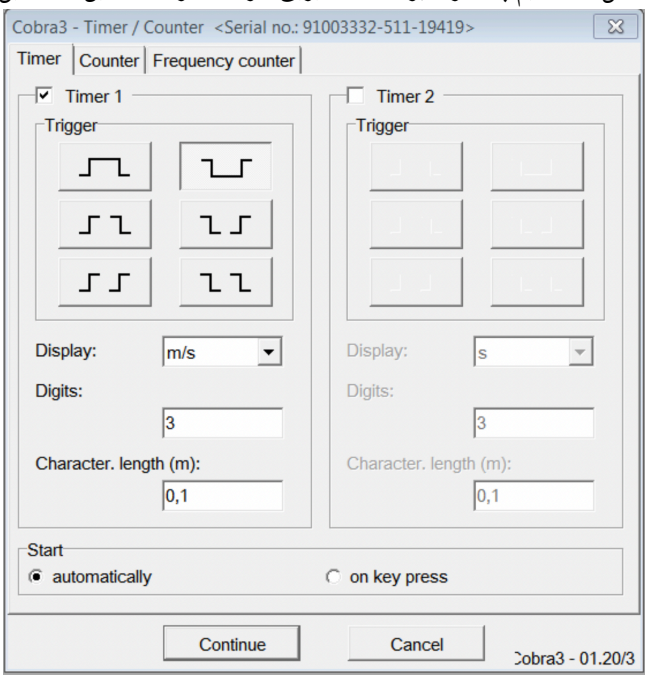
آشکارساز امواج Ultrasonic را روی ماشین قرار داده و آزمایش را تکرار می‌کنیم (شکل ۷) با فرض اینکه سرعت انتشار امواج ۳۴۰ متر بر ثانیه است، نتایج بدست آمده از نمودار را با نظریه مقایسه می‌کنیم.

با تغییر سرعت آشکارساز آزمایش را تکرار می‌کنیم و جدول ۲ کامل می‌شود.

با استفاده از روش کمترین مربعات منحنی نمایش تغییرات ν'' را بر حسب u_0 رسم می‌کنیم و به وسیله شیب خط سرعت انتشار امواج را در محیط تعیین می‌کنیم.

۵ جدول داده‌ها

شکل ۴: تنظیم پارامترها برای اندازه‌گیری سرعت حرکت ماشین روی ریل

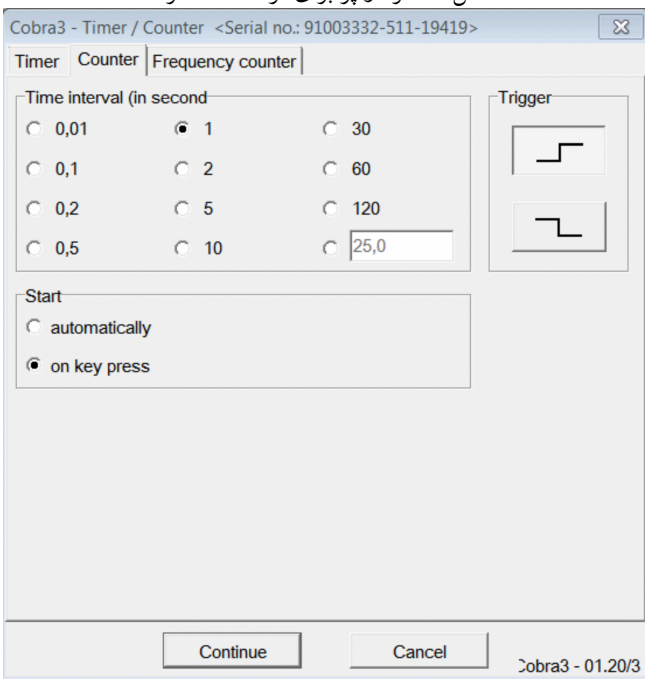


جدول ۱: اثر دوپلر برای حالتی که چشمه صوت با سرعت ب u_sه آشکارساز نزدیک و یا دور می‌شود.

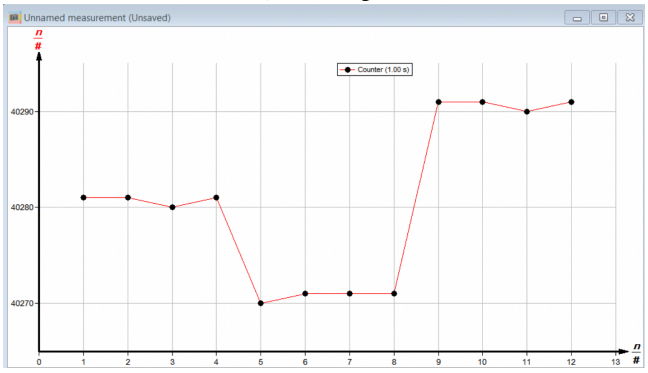
$\nu''(Hz)$	$\nu'(Hz)$	$u_s(m/s)$
40280	40280	0
– – –	40291.75	0.108
40270	– – –	0.111
– – –	40294.25	0.124
40268	– – –	0.126
– – –	40300.75	0.160
40263.5	– – –	0.146
– – –	40301.75	0.173
40265.75	– – –	0.140

۶ نمودار داده‌ها

شکل ۵: اثر دولپر برای فرستنده متحرک



شکل ۶: اثر دوپلر

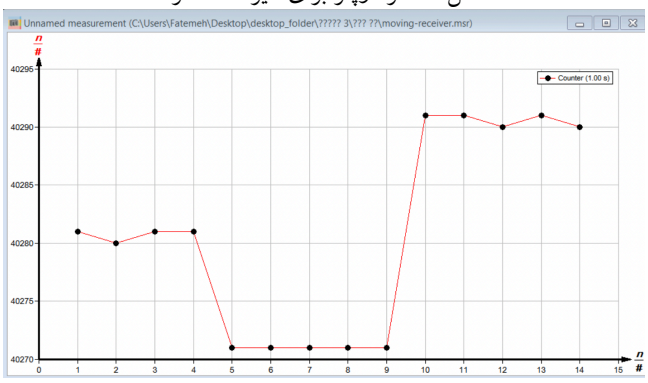


۷ خطا

به طور کلی اگر y یک تابعی از x_i تا x_n باشد و برای هر کدام از x_iها، $\langle x_i \rangle$ و Δx_i مشخص باشند، آنگاه Δy اینگونه محاسبه می‌شوند:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \qquad (۷)$$

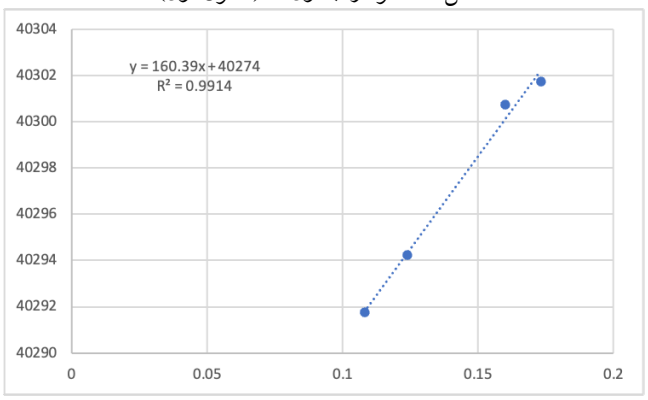
شکل ۷: اثر دوپلر برای گیرنده متحرک



جدول ۲: اثر دوپلر برای حالتی که چشمه صوت با سرعت ب u_0ه آشکارساز نزدیک و یا دور می‌شود.

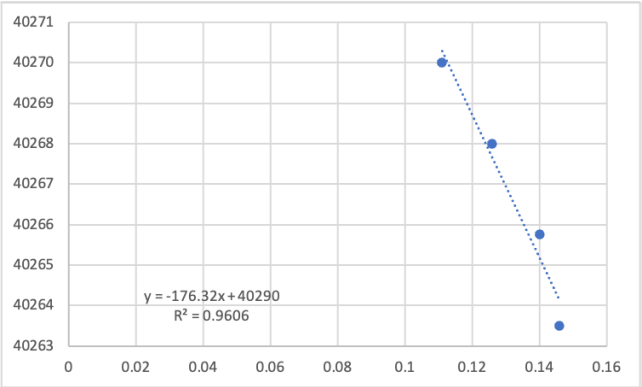
$\nu''(Hz)$	$\nu'(Hz)$	$u_s(m/s)$
40280	40280	0
– – –	40292.25	0.089
40268.5	– – –	0.094
– – –	40296	0.113
40267.75	– – –	0.109
– – –	40299.5	0.164
40264	– – –	0.154
– – –	40301.25	0.172
40264.75	– – –	0.142

شکل ۸: نمودار جدول ۱ (ستون اول)

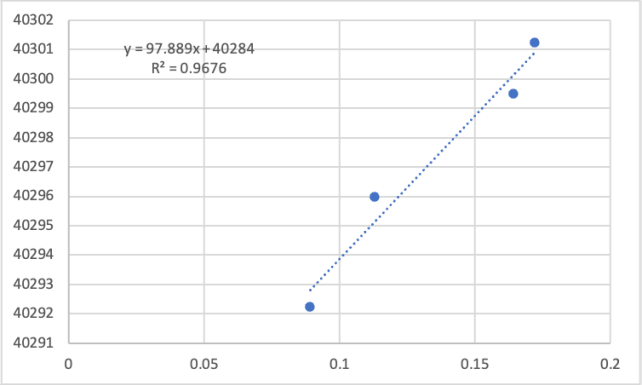


بنابراین در تمامی جداولی که میانگین حساب می‌شده این مقدار خطا محاسبه گشته و سپس با خطای دستگاه‌ها مقایسه شده و بیشینه این خطا بعنوان خطا گزارش شده است.

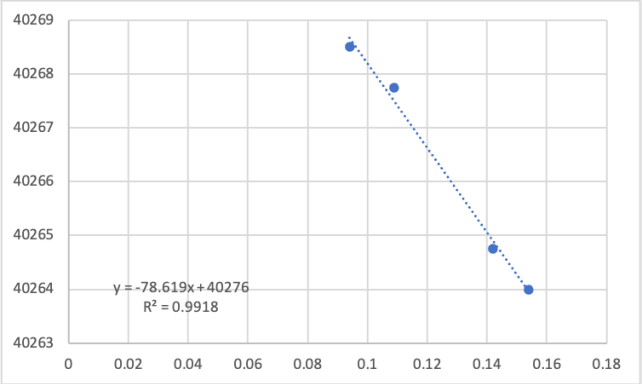
شکل ۹: نمودار جدول ۲ (ستون دوم)



شکل ۱۰: نمودار جدول ۲ (ستون اول)



شکل ۱۱: نمودار جدول ۲ (ستون دوم)



برای محاسبه خطای خط برازش در نمودارها می‌توان نوشت:

$$\Delta b = b\sqrt{\frac{1}{n-2}\left(\frac{1}{R^2}-1\right)} \tag{۸}$$

۸ نتیجه‌گیری

$$v = 411.52 m/s \pm 21\% \tag{۹}$$

$$v = 512.29 m/s \pm 51\% \tag{۱۰}$$